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 do comportamento corrosivo dos revestimentos de níquel (Inconel 625) depositados por soldagem MIG sobre substrato API 5L Gr. B.

Francisco de Assis Souza Neto[1] , Marcelo César Dias da Cunha[2] , Paulo Naftali da Silva Casciano[3] , Renato Alexandre Costa de Santana[4] , Marco Antonio dos Santos[5] , Theophilo Moura Maciel[6]

Abstract

In activities related to maintenance of the petrololeum industries, welding is one of the procedures used for the recovery of transport facilities, storage and refining units. A major use of this process in this sector is the application of nickel alloy lining on the inner surface of pipes for corrosion protection. This study aimed to evaluate the behavior of the corrosion resistance of these alloys applied on pipeline segments API 5L Gr B used to transport oil and gas. The alloy Inconel 625 coatings were applied on the substrate steel API 5L Gr B by varying the welding parameters (voltage, welding speed and power wire) with and without preheating at 150 °C. A factorial design 2^2 was used. as optimization tool. It was observed that the coatings obtained with preheating showed corrosion potential more positive and a coating dissolution behavior similar to coatings obtained without preheating. The best welding obtained with preheating was that obtained with the lowest voltage (22 V) and with the lowest wire speed, (5 m/min).

Resumo

Em se tratando de atividades relacionadas à manutenção das indústrias petrolíferas a soldagem é uma das soluções para recuperação de equipamentos de transporte, de armazenamento e de unidades de refino. Uma das principais utilizações deste processo neste setor é a aplicação de revestimento interno de ligas de níquel em dutos para proteção contra a corrosão. Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento da resistência a corrosão dessas ligas sobre segmentos de dutos API 5L Gr. B. utilizados para transporte de petróleo e gás. Os revestimentos foram obtidos variando os parâmetros de soldagem (tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame) de ligas Inconel 625 sobre o substrato de aço API 5L Gr. B com pré-aquecimento de 150 ^oC e sem pré-aquecimento. Como ferramenta de otimização foi utilizado um planejamento fatorial 2^2. Foi observado que os revestimentos obtidos com pré-aquecimento mostroaram potencial de corrosão mais positivos e o mesmo comportamento de dissolução do revestimento quando comparado com os revestimentos

[1]Mestrando-Estudante - Universidade Federal de Campina Grande
[2]Graduand0-Estudante - Universidade Federal de Campina Grande
[3]Doutorando-Estudante - Universidade Federal do Ceará
[4]Dr.- Pesquisador- Universidade Federal do Ceará
[5]Dr.-Professor - Universidade Federal de Campina Grande
[6]Dr.-Professor - Universidade Federal de Campina Grande

obtidos sem pré-aquecimento. As condições ótimas de soldagem obtidas com pré-aquecimentos foi com a menor tensão de soldagem 22 V e menor velocidade alimentação do arame 5 m/min.

Palavras-chave: Revestimentos de Níquel, Soldagem, Corrosão

Introdução

O petróleo, devido a sua composição química e à presença de diversas impurezas, apresenta um elevado grau de corrosividade. O processo de corrosão, principalmente por corrosão naftênica, que ocorre no interior dos dutos, que transportam óleo ou gás, é um problema de relevância na indústria do petróleo e pode afetar de forma significativa a vida útil dos mesmos, causando aumento de custos de manutenção, produção e até a interrupção da tubulação para a substituição de alguma parte da mesma (Bernardes, 2005).

Quando o referido processo não é controlado, ocorre o inevitável vazamento das tubulações, causando danos irreparáveis ao meio ambiente. Este aspecto exige dos diversos tipos de materiais empregados na fabricação dos dutos uma elevada resistência à corrosão (Gentil, 2007).

A corrosão é influenciada de forma significativa pela velocidade do fluido em contato com a superfície do duto. A prática mostra que o ataque corrosivo se dá preferencialmente na parte inferior do tubo, onde ocorre o contato da água com alto teor de sais minerais e a parede de aço carbono (Gomes, 2003).

Uma das soluções empregadas para a correção dos equipamentos degradados é a recuperação por soldagem e a outra seria a substituição das instalações empregando-se materiais compatíveis com os atuais níveis de agressividade (Clara, 2002).

Em qualquer um desses casos, o desafio principal é encontrar materiais resistentes às severas condições de corrosão e ainda que atendam às diferentes condições de temperatura e de tensões (Gentil, 2007).

Neste contexto, destaca-se a importância de um trabalho voltado para o estudo da compatibilidade metalúrgica de revestimentos a base de superligas de níquel, depositados por soldagem em chapas de aço C-Mn (Chaitman, 1996). A partir de um estudo detalhado de vários processos de deposição, assim como do desempenho físico-metalúrgico destes revestimentos em segmentos de tubo será possível definir as melhores alternativas para suas aplicações com revestimento interno em tubulações (Casti, 2000). Neste estudo, serão avaliados os revestimentos de liga de níquel (Inconel 625) aplicados por soldagem pelo processo MIG com Ar puro como gás de proteção em aço API 5L Gr B utilizadas para transporte de petróleo e gás.

Experimental

O material a ser estudado são segmentos de dutos de Aço API 5L Gr B soldados revestidos com uma superliga a base de níquel (Inconel 625), apresentando uma solda de união. Os parâmetros de soldagem que variaram foram preliminarmente: tensão de soldagem (22 V e 24 V) e velocidade de alimentação do arame (5 m/min a 7 m/min).

Para a realização dos ensaios de corrosão, as amostras foram serradas com altura de 3 mm e com área exposta de 66 mm^2 . Posteriormente, foi realizado o embutimento com resina epóxi das amostras. As amostras foram inicialmente polidas com lixa de grana 400, 600 e 1200 e em seguida foram introduzidas em solução diluída 10 % NaOH para remover substâncias orgânicas e de 1 % de H_2SO_4 .

As medidas eletroquímicas de corrosão foram executadas em uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos. Foram utilizadas duas técnicas eletroquímicas: Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL) e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE). Para realizar as medidas foi utilizado um potenciostato/galvanostato PG STATE30 da Autolab conectado aos softwares GPES e FRA2. O eletrodo de referência utilizado foi prata cloreto de prata (Ag/AgCl), onde todos os potenciais foram referidos a este eletrodo. O contra-eletrodo utilizado foi uma placa de platina com área superficial de 2,5 cm^2. Os eletrodos de trabalho foram as ligas de níquel dos revestimentos. O meio corrosivo utilizado foi o NaCl 1 mol/L e temperatura dos ensaios foi de aproximadamente 30 ^oC.

Foi utilizado um planejamento experimental fatorial completo (2^2), com o objetivo de otimizar os resultados e minimizar a quantidade de experimentos para o presente estudo, reduzindo assim os custos das pesquisas. Os fatores (variáveis) foram tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame. Apresentando um total de oito experimentos para cada matriz. Sendo utilizadas amostras com pré-aquecimento a 150 °C, sem pré-aquecimento e com valores elevados de tensão de soldagem e velocidade do arame sem pré-aquecimento, resultando em 2 matrizes do tipo 2^2.

O tratamento dos dados do planejamento experimental foi feito com o auxílio do *software* ESTATISTICA 5.0. Desta forma foi avaliado quantitativamente a influência das variáveis de entrada sobre o comportamento corrosivo, tendo como respostas: Potencial de corrosão (E_{Corr}) e Resistência de polarização (Rp).

Para a análise da composição da liga foi utilizado o aparelho de energia dispersiva de raio X, Philips XL30 (EDAX). Para a análise da superfície foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), Philips XL30.

Resultado e Discussão

Os resultados obtidos por meio dos parâmetros de soldagem utilizados nos corpos de prova selecionados com valor de tensão de soldagem de 22 V e 24 V, velocidade do arame de 5 m/min e 7 m/min sem e com pré-aquecimento de 150 °C.

As variáveis de resposta selecionadas na condição 22 V e 24 V, velocidade do arame de 5 m/min e 7 m/min sem e com pré-aquecimento de 150 °C foram através da tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame (Tabela 1). As Tabelas 2 e 3 mostram o projeto da matriz experimental utilizado no processo de revestimento por soldagem da liga Ni com pré-aquecimento de 150 ^{o}C e sem pré-aquecimento respectivamente, com os níveis experimentais das variáveis independentes (fatores), junto com os resultados dos fatores estudados (Calado e Montgomery, 2003). O modelo linear proposto para cada variável de resposta (Yi) é:

$$Yi = \beta_o + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_{1,2} xy \quad (1)$$

Onde β_o é o termo constante, β_1 e β_2 os coeficientes lineares e $\beta_{1,2}$ o coeficiente de interação. Os parâmetros do modelo foram obtidos por regressão linear múltipla.

Efeito da tensão de soldagem e da velocidade de alimentação do arame com pré-aquecimento de 150 ^{o}C.

Os resultados foram submetidos à análise de regressão não-linear múltipla para obter os coeficientes para cada um dos parâmetros. Estimativas dos coeficientes com níveis mais alto que 95 % (P < 0,05) foram incluídos no modelo final. O potencial de corrosão (E_{Corr}.) e resistência de polarização (R_p) podem ser expressos na forma de uma função dos fatores independentes por um modelo matemático de 1º ordem representados pelas Equações 2 e 3, onde (A) é tensão de soldagem, (B) velocidade de alimentação do arame e (A·B) interação entre a tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame. Os valores em negrito nestas equações correspondem aos valores significativos e são mostrados a seguir:

$$E_{Corr} = \mathbf{-\ 0{,}748} + 0{,}003 \cdot A - 0{,}014 \cdot B \mathbf{+\ 0{,}032 \cdot A \cdot B} \quad (2)$$

$$R_p = \mathbf{401070 - 236470 \cdot A} + 31320 \cdot B - 27780 \cdot A \cdot B \quad (3)$$

A análise de variância (ANOVA) para o modelo foi realizada com um nível de confiança de 95% para P < 0,5. O ajuste do modelo também foi expresso pelo coeficiente de regressão (R^2), que foi igual a 0,84 e 0,95 para o potencial de corrosão e resistência de polarização respectivamente. Segundo Barros Neto *et al*. os valores de R^2 devem ser próximos da unidade. A análise de variância e de regressão dos dados demonstrou a significância estatística do modelo, justificando desta forma o uso do modelo de 1º ordem para o estudo estatístico.

A Figura 1 mostra à superfície de resposta da tensão de soldagem em função da velocidade de alimentação do arame tendo como resposta o potencial de corrosão. Foi observado que o valor ótimo encontrado foi obtido com a menor tensão e menor velocidade.

A Figura 2 mostra à superfície de resposta da tensão de soldagem em função velocidade de alimentação do arame tendo como resposta a resistência de polarização. Com a diminuição da tensão e diminuição da velocidade foram obtido os melhores valores de resistência de polarização.

Efeito da tensão de soldagem e da velocidade de alimentação do arame sem pré-aquecimento.

Os resultados foram submetidos à análise de regressão não-linear múltipla para obter os coeficientes para cada um dos parâmetros. Estimativas dos coeficientes com níveis mais alto que 95 % (P < 0,05) foram incluídos no modelo final. O potencial de corrosão ($E_{Corr.}$) e resistência de polarização (R_p) podem ser expressos na forma de uma função dos fatores independentes por um modelo matemático de 1º ordem representados pelas Equações 4 e 5, onde (A) é tensão de soldagem, (B) velocidade de alimentação do arame e (A·B) interação entre a tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame. Os valores em negrito nestas equações correspondem aos valores significativos e são mostrados a seguir:

$$E_{Corr.} = \mathbf{- 0{,}739 + 0{,}034 \cdot A - 0{,}026 \cdot B + 0{,}026 \cdot A \cdot B} \quad (4)$$

$$R_p = \mathbf{327887 - 63212 \cdot A - 63962 \cdot B} - 36662 \cdot A \cdot B \quad (5)$$

A análise de variância (ANOVA) para o modelo foi realizada com um nível de confiança de 95 % para P < 0,5. O ajuste do modelo também foi expresso pelo coeficiente de regressão (R^2), que foi igual a 0,92 e 0,97 para o potencial de corrosão e resistência de polarização respectivamente. Segundo Barros Neto *et al*. (1995) os valores de R^2 devem ser próximos da unidade. A análise de variância e de regressão dos dados demonstrou a significância estatística do modelo, justificando desta forma o uso do modelo de 1º ordem para o estudo estatístico.

A Figura 3 mostra à superfície de resposta da tensão de soldagem vs. velocidade de alimentação do arame tendo como resposta o potencial de corrosão. Foi observado que o valor ótimo encontrado foi obtido com a maior tensão e menor velocidade.

A Figura 4 mostra à superfície de resposta da tensão de soldagem *vs.* velocidade de alimentação do arame tendo como resposta a resistência de polarização. Com a diminuição da tensão e diminuição da velocidade foram obtido os melhores valores de resistência de polarização.

Estudo comparativo dos revestimentos obtidos com e sem pré-aquecimento do metal de base API 5L Gr.B.

Com os resultados obtidos pela otimização dos parâmetros de soldagem realizados com e sem pré-aquecimento foi comparado suas resistências a corrosão com o aço ARBL. A Figura 5 mostra as curvas de polarização potenciodinâmicas linear (PPL) dos melhores valores obtidos dos revestimentos aplicados com e sem pré-aquecimento e do aço ARBL. Foi observado que os revestimentos de níquel obtidos por soldagem deslocam o potencial de corrosão para potenciais mais positivos. Onde o melhor resultado do potencial de corrosão esta deslocado para a direita do gráfico, ou seja, quanto mais positivo for o potencial de corrosão mais será retardado o inicio do processo de corrosão. Os revestimentos obtidos com pré-aquecimento mostraram potencial de corrosão mais positivo e o mesmo comportamento

de dissolução do revestimento quando comparado com os revestimentos obtidos sem pré-aquecimento. Este é observado quando é comparado as correntes do eixo Y da Figura 5 referente aos dois revestimentos. Quanto menor a corrente menor será a dissolução do material.

Para confirmar os resultados obtidos com PPL foram realizadas medidas de impedância eletroquímica para avaliar a resistência de polarização da liga Inconel 625 e do aço-carbono. A resistência de polarização mede realmente a resistência a corrosão do material. Foi observado no gráfico da Figura 6 que as ligas obtidas com e sem pré-aquecimento possuem maiores valores de Rp, confirmando dessa forma a resistência a corrosão dessas ligas.

Medidas de composição dos revestimentos

O ensaio de EDX foi realizado por pontos na condição 22 V e 24 V, velocidade do arame de 5 m/min e 7 m/min sem e com pré-aquecimento de 150 °C para determinar a composição química do revestimento da amostra.

Conclusões

O menor valor obtido para diluição foi de 6,2 % e 8,2 % na condição de 22 V, velocidade do arame de 7 m/min, sem pré-aquecimento e 22 V, 5 m/min com pré-aquecimento de 150 °C, respectivamente.

Foi observado que com o pré-aquecimento de 150 ºC o valor ótimo encontrado tanto para o potencial de corrosão (E_{Corr}) quanto para a resistência de polarização (Rp), foi obtido com a menor tensão de soldagem e menor velocidade de alimentação do arame.

Foi observado que sem aplicação de um pré-aquecimento o valor ótimo encontrado para o pontencial de corrosão (Ecorr) foi obtido com a maior tensão e menor velocidade de alimentação do arame. E que com a diminuição da tensão e diminuição da velocidade obtiveram-se os melhores valores de resistência de polarização (Rp).

Com a aplicação de um pré-aquecimento de 150 ºC, obtém–se melhor comportamento à corrosão para a maioria das amostras comparando-as com as sem pré-aquecimento com os outros dois parâmetros de soldagem iguais (tensão de soldagem e velocidade de alimentação do arame).

Entre os melhores resultados das duas matrizes (com e sem pre-aquecimento) percebe-se que a com pré-aquecimento apresentou melhor comportamento perante à corrosão.

Referências bibliográficas

BARROS NETO B., SCARMINIO J.S., BRUNS R.E. **Planejamento e otimização de experimentos.** São Paulo: *Editora Unicamp*, 1995.

BERNARDES, R.. **Comportamento de Aços Inoxidáveis Comerciais e Inconel na Resistência à Corrosão Naftênica de Petróleos Nacionais: Uma Análise Fenomenológica**. 2005. Dissertação (Mestre em Engenharia Metalúrgica de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CALADO, V; MONTGOMERY, D.C. **Planejamento de experimentos usando estatística**. Rio de Janeiro: Editora e-papers, 2003.

CASTI metals black book – North American Ferrous Data. Edmonton: CASTI Pub. 2000. 4 th ed. Chapter 2 – **Wrought carbon & alloy steel metallurgy**, (p. 50-51).

CHAIRMAN, J. P. Hunt et al. Nickel and Cobalt alloys. In: AWS (Usa) (Comp.). **Welding Handbook.** 3. ed. Miami: AWS, Cap. 4, 1996. (p. 217-288).

CLARA, Manuel Saraiva. **Soldagem de Revestimento**. Núcleo Tecnológico de Soldagem e Qualidade. São Paulo-SP, 2002.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p.135 – 153, 2007.

GOMES, Ana Carolina Tedeschi**. Estudo do comportamento corrosivo de ácidos naftênicos em escoamento**. 2003. Proposta de projeto para tese de mestrado na área de concentração de Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Variáveis reais e codificadas da matriz do planejamento experimental 2^2.

Fatores	**Níveis**	
	-1	**+1**
(1) Tensão de soldagem (V)	22	24
(2) Veloc. De alimentação do arame (m/min)	5	7

Tabela 2 - Matriz do planejamento fatorial 2^2 da liga de Ni com pré-aquecimento de 150 °C.

Experimento	**Tensão de soldagem (V)**	**Vel. de alimentação do arame (m/min)**	E_{Corr} ($V_{Ag/AgCl}$)	R_p ($Ohm.cm^2$)
01	-1	-1	-0,704	313967
02	1	-1	-0,774	985988
03	-1	1	-0,77	351300
04	1	1	-0,824	299900
05	-1	-1	-0,707	295000
06	1	-1	-0,801	370700
07	-1	1	-0,766	328850
08	1	1	-0,847	393000

Tabela 3 - Matriz do planejamento fatorial 2^2 da liga de Ni sem pré-aquecimento (25 °C).

Experimento	**Tensão de soldagem (V)**	**Vel. de alimentação do arame (m/min)**	E_{Corr} ($V_{Ag/AgCl}$)	R_p ($Ohm.cm^2$)
01	-1	-1	-0,773	733366
02	1	-1	-0,672	586609
03	-1	1	-0,784	405000
04	1	1	-0,772	403200
05	-1	-1	-0,774	1050000
06	1	-1	-0,701	611020
07	-1	1	-0,777	425000
08	1	1	-0,801	370700

Tabela 4: Composição Química (%at.) da superfície do revestimento analisado com pré-aquecimento de 150 °C.

Tensão de soldagem (V)	Vel. do arame (m/min)	Diluição (%)	% Fe	% Ni	% Mo	% C	% O	%Cr
22—123	5	10,56 ± 0,80	9,82	34,57	7,22	34,55	0,89	12,95
22—149	7	12,68 ± 0,60	7,73	42,59	7,88	25,08	1,23	15,49
24—146	7	10,11 ± 0,33	4,56	52,15	8,2	15,6	0,73	18,76
24—124	5	6,00 ± 2,28	3,5	50,16	9,09	17,46	1,69	18,09

Tabela 5 - Composição Química (%at.) da superfície do revestimento analisado sem pré-aquecimento.

Tensão de soldagem (V)	Vel. do arame (m/min)	Diluição (%)	% Fe	% Ni	% Mo	% C	% O	%Cr
22—121	5	8,27 ± 1,41	1,27	52,37	8,65	17,53	1,18	19,01
22—140	7	7,52 ± 1,16	5,54	48,35	8,31	19,74	0,69	17,37
24—154	7	7,85 ± 0,14	6,46	49,69	8,55	14,99	2,44	17,87
24—121	5	7,53 ± 0,64	1,17	38,48	8,56	36,69	1,26	13,83

Lista de Figuras

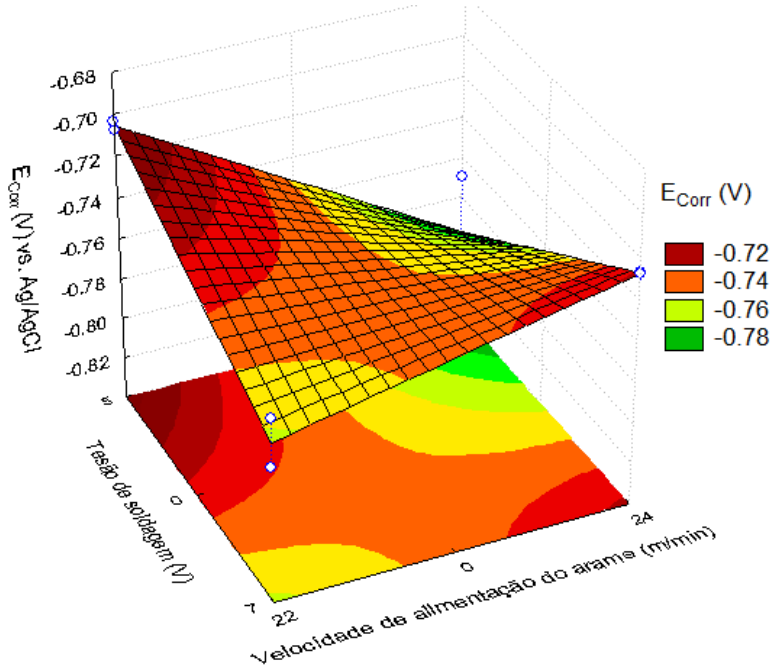

Figura 1 - Superfície de resposta da tensão de soldagem em função da velocidade de alimentação do arame tendo como resposta o potencial de corrosão.

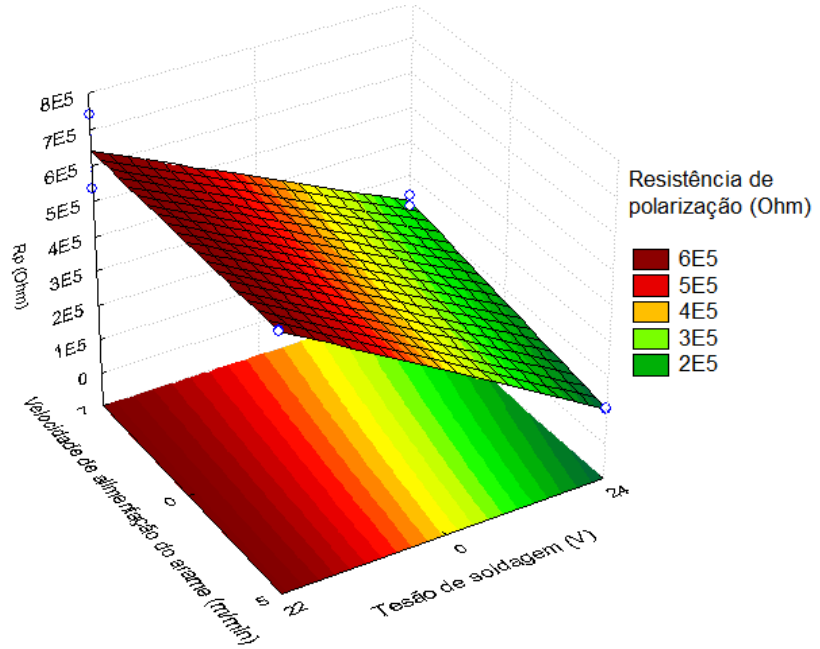

Figura 2 - Superfície de resposta da tensão de soldagem em função da velocidade de alimentação do arame tendo como resposta a resistência de polarização.

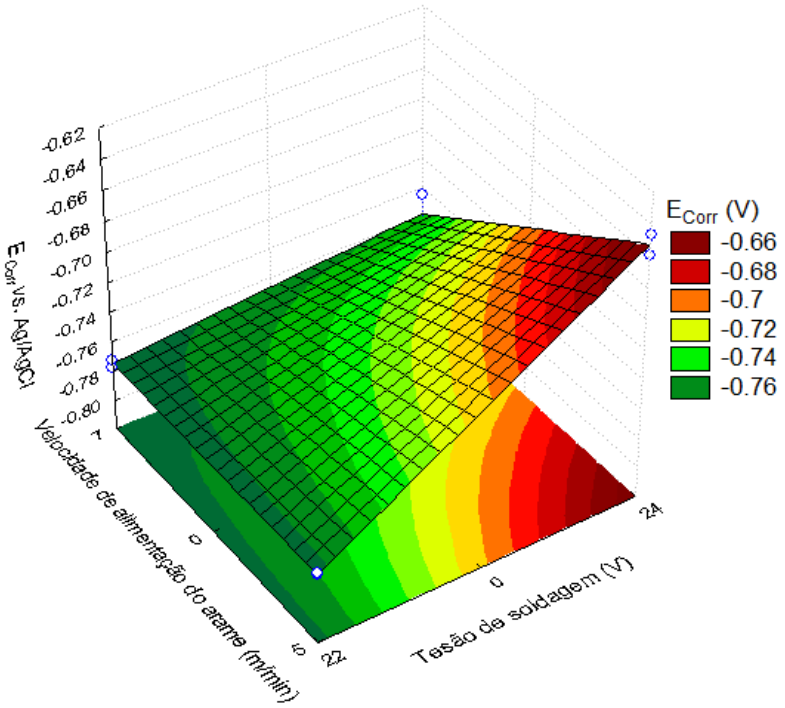

Figura 3 - Superfície de resposta da tensão de soldagem em função da velocidade de alimentação do arame tendo como resposta o potencial de corrosão.

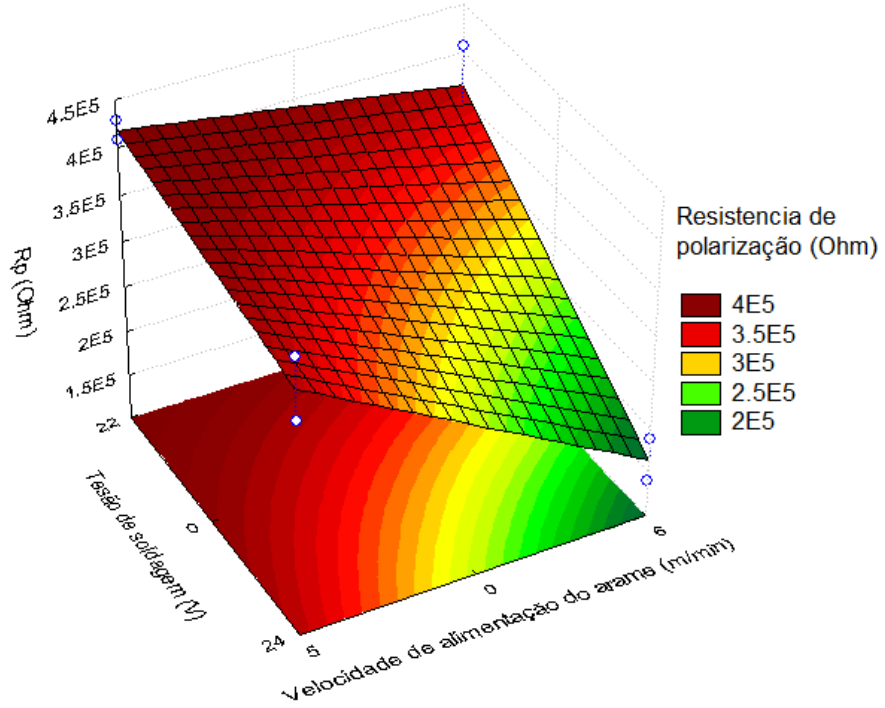

Figura 4 - Superfície de resposta da tensão de soldagem função da velocidade de alimentação do arame tendo como resposta a resistência de polarização.

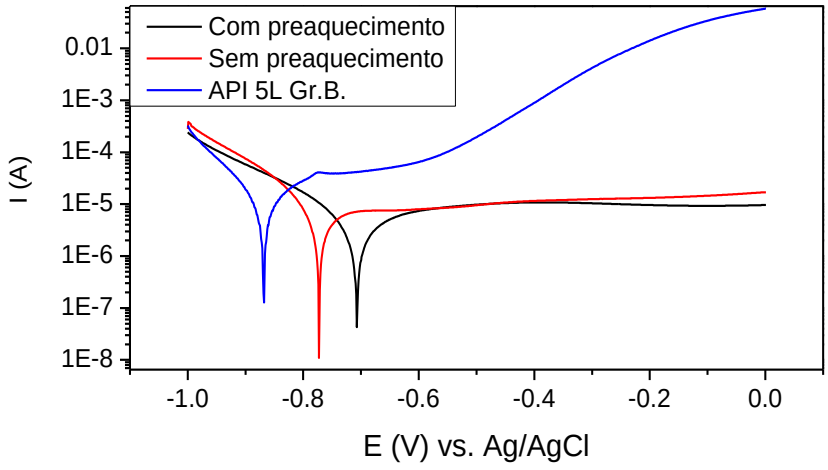

Figura 1 - Curva de polarização relacionadas aos revestimos otimizados obtidos com e sem preaquecimento, comparados com o substrato de aço-carbono.

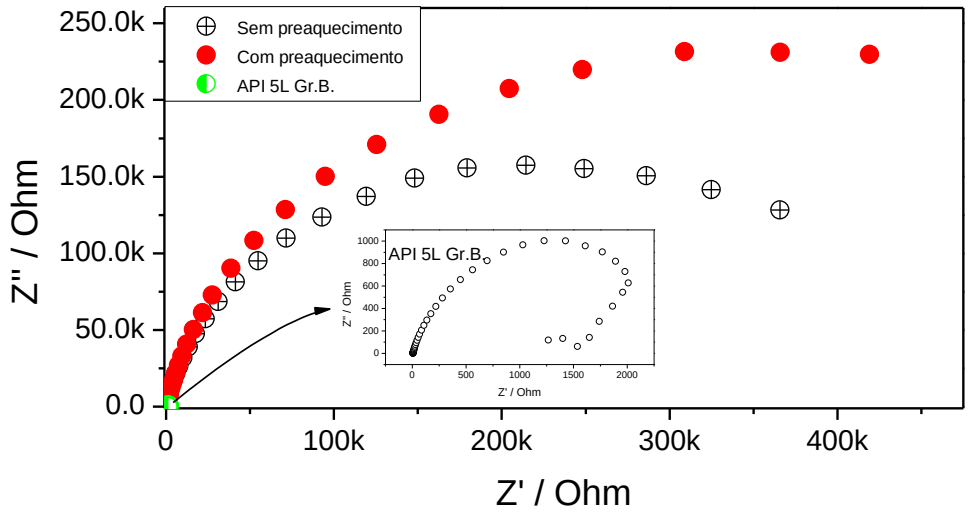

Figura 6 - Diagrama de impedância relacionado aos revestimos otimizados obtidos com e sem preaquecimento, comparados com o substrato de aço-carbono.