

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA RESULTANTE
DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR PARA O
REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇO CARBONO ABNT 1020 COM
AÇO INOXIDÁVEL ABNT 316L**

MARLON MUNIZ NUNES

Itajubá
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

MARLON MUNIZ NUNES

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA RESULTANTE
DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR PARA O
REVESTIMENTO DE CHAPAS DE AÇO CARBONO ABNT 1020 COM
AÇO INOXIDÁVEL ABNT 316L**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Materiais para Engenharia.

Orientador: Prof. Reny Angela Renzetti, Dra.

Coorientador: Prof. Tarcisio Gonçalves de Brito, Dr.

Itajubá
2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à DEUS por me conceder saúde e a força necessária para a realização de mais uma conquista.

À minha família, pela educação e suporte, por sempre acreditar em meu potencial.

À minha namorada, pela paciência, companheirismo e incentivo.

À professora Dra. Reny Angela Renzetti, pela orientação, paciência e ensinamentos passados, sempre se mostrou atenciosa e disposta a ajudar.

Ao Professor Dr. Tarcisio Gonçalves de Brito, pela coorientação e ensinamentos, por demonstrar interesse em meu desenvolvimento acadêmico.

Ao professor Dr. José Henrique de Freitas Gomes, por gentilmente ceder os corpos de prova.

À UNIFEI, pela oportunidade e disponibilização de recursos que garantiram a execução do trabalho.

Ao técnico de laboratório Jordânio Samuel Siqueira, pela colaboração e orientação durante a realização dos ensaios eletroquímicos.

Aos colegas de pós-graduação, pela convivência, amizade e apoio.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À todos os meus amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

NUNES, M. M. (2019), Análise e otimização da microestrutura resultante do processo de soldagem com arame tubular para o revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L, Itajubá, 80p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em materiais para engenharia) – Universidade Federal de Itajubá.

A corrosão do aço carbono compromete a eficiência e a vida útil de diversos componentes industriais, gerando grandes prejuízos à economia mundial. Nesse sentido, deve-se buscar maneiras de melhorar a resistência à corrosão desses materiais, de forma a minimizar os custos de manutenções e substituições de peças. Dentre os métodos utilizados para a obtenção de superfícies com propriedade anticorrosiva destaca-se a soldagem de revestimento. No entanto, para que o revestimento apresente máxima resistência à corrosão é necessário que os parâmetros de soldagem sejam controlados, uma vez que, as variáveis do processo influenciam diretamente a diluição e a microestrutura do material. Nesse contexto, foi realizado a deposição de uma camada de aço inoxidável ABNT 316L (aramé tubular) sobre chapas de aço carbono ABNT 1020, com o objetivo de identificar uma combinação ótima dos parâmetros de soldagem com arame tubular que permitisse a maximização do potencial de pite, minimização do grau de sensitização e ao mesmo tempo uma microestrutura e dureza desejável. As respostas de interesse foram obtidas por meio de ensaios eletroquímicos e ensaio de dureza Vickers. Os revestimentos foram caracterizados, microestruturalmente, por meio da microscopia óptica e eletrônica de varredura. Os parâmetros do processo analisados foram velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça. A otimização do processo de soldagem de revestimento foi realizada por meio do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMp). Os resultados mostraram que apenas a velocidade de alimentação não apresentou efeito significativo sobre o potencial de pite, grau de sensitização e dureza. Verificou-se que a resistência à corrosão foi reduzida devido à presença de precipitados, de martensita e de ferrita delta. A precipitação de carbonetos foi observada em todos os revestimentos. As curvas da polarização anódica mostraram que todos os revestimentos foram passivados em solução de 3,5%p. NaCl. O método EQMMp permitiu alcançar os resultados ótimos, caracterizando-se como uma ferramenta eficiente para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas com diferentes graus de importância.

Palavras-chave: Soldagem de revestimento, Aço carbono ABNT 1020, Aço inoxidável ABNT 316L, Corrosão, Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado.

ABSTRACT

The corrosion of carbon steel compromises the efficiency and the useful life of several industrial components, causing great damages to the world economy. In this sense, it is necessary to look for ways to improve the corrosion resistance of these materials, in order to minimize the costs of maintenance and replacement of parts. Among the methods used to obtain surfaces with corrosion property highlights the cladding process. However, in order for the cladding to exhibit maximum corrosion resistance, it is necessary that the welding parameters be controlled, since the process variables directly influence the dilution and microstructure of the material. In this context, the deposition of a layer of 316L stainless steel flux cored filler wire on AISI 1020 carbon steel plates was carried out, in order to identify an optimum combination of flux-cored arc welding parameters that allowed the maximization of pitting potential, minimization of the degree of sensitization and at the same time a microstructure and desirable hardness. The responses were obtained by means of electrochemical tests and Vickers hardness test. The claddings were characterized by optical microscopy and scanning electron microscopy. The process parameters examined were the wire feed rate, arc voltage, welding speed and contact tip to workpiece distance. The process optimization was performed using the Weighted Multivariate Mean Square Error (WMMSE). The results showed that only wire feed rate had no significant effect on pitting potential, degree of sensitization and hardness. It was found that the corrosion resistance was reduced due to the presence of precipitates, martensite and delta ferrite. The precipitation of carbides was observed in all claddings. The anodic polarization curves showed that all claddings were passivated in 3.5% wt. NaCl. The WMMSE allowed the optimal results were achieved, characterizing itself as an efficient tool for the optimization of multiple correlated responses with different degrees of importance.

Keywords: Cladding, AISI 1020 carbon steel, 316L stainless steel, Corrosion, Weighted Multivariate Mean Square Error.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Curva TTT comparando a cinética de precipitação de fases intermetálicas e carbonetos no aço tipo 316.	7
Figura 2- Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis.	9
Figura 3- Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%p.	10
Figura 4- Processo de soldagem de revestimento.	11
Figura 5- Características geométricas do cordão de revestimento.	12
Figura 6- Representação esquemática do equipamento para soldagem FCAW.	13
Figura 7- Mecanismo de formação de pite em um metal (M) exposto a uma solução de NaCl.	17
Figura 8- Representação de uma curva de polarização anódica típica para aços inoxidáveis. E_{CORR} – potencial de corrosão; E_{pp} – potencial de passivação; E_t – potencial de transpassivação; i_{pass} – densidade de corrente de passivação.	18
Figura 9 - Representação esquemática do fenômeno de sensibilização para aços inoxidáveis.	19
Figura 10- Diagrama esquemático do ensaio DL-EPR.	20
Figura 11- Arranjo composto central para três fatores.	23
Figura 12- Fluxograma do Procedimento para obtenção do EQMM.	25
Figura 13- Fluxograma detalhando os procedimentos realizados no trabalho. MSR– Metodologia de Superfície de Resposta; EQMM– Erro Quadrático Médio Multivariado.	30
Figura 14- Corte dos corpos de prova.	32
Figura 15- Corpos de prova: a) embutido em baquelite; b) embutido em resina epóxi.	32
Figura 16- Cordão de solda com números de 1 a 10 representando o ensaio de dureza.	33
Figura 17- Diagrama Schaeffler mostrando os pontos correspondentes ao aço carbono 1020, arame tubular de aço inoxidável ABNT 316L e ao metal de solda com 26 % de diluição.	35
Figura 18- Micrografias dos revestimentos obtidas por MEV com o uso de ataque eletrolítico com ácido oxálico: a) amostra 5; b) amostra 21.	37
Figura 19- Micrografia do revestimento obtida por microscopia ótica com a solução Kalling n.2 para a amostra 5.	38
Figura 20- Curvas de polarização anódica do revestimento em solução de 3,5%p. NaCl para as amostras 5 e 21. O potencial de pite, E_{pite} , está indicado para cada amostra.	39
Figura 21- Curvas obtidas pelo ensaio DL-EPR em solução de 0,5 M H_2SO_4 + 0,01 M KSCN para os revestimentos das amostras 5 e 21. I_r – corrente de reativação.	40

Figura 22- Efeitos da tensão (T), velocidade de soldagem (Vs), velocidade de alimentação (Va) e distância bico de contato peça (N) sobre o Grau de Sensitização (GS).....	44
Figura 23- Efeitos da tensão (T), velocidade de soldagem (Vs), velocidade de alimentação (Va) e distância bico de contato peça (N) sobre o Potencial de Pite (E_{pite}).	45
Figura 24- Efeitos da tensão (T), velocidade de soldagem (Vs), velocidade de alimentação (Va) e distância bico de contato peça (N) sobre a dureza Vickers (HV).	46
Figura 25- Efeito da interação entre velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre o Grau de Sensitização ($V_a = 8,5$ m/min; $T = 29,5$ V).	47
Figura 26- Efeito da interação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação sobre o Grau de Sensitização ($N = 20$ mm; $T = 29,5$ V).....	47
Figura 27- Efeito da interação entre distância bico de contato peça e tensão sobre o Potencial de Pite ($V_a = 8,5$ m/min; $V_s = 40$ cm/min).	48
Figura 28- Efeito da interação entre velocidade de alimentação e distância bico de contato peça sobre o Potencial de Pite ($V_s = 40$ cm/min; $T = 29,5$ V).	49
Figura 29- Planilha desenvolvida para a otimização do processo de soldagem de revestimento.	52
Figura 30- Planilha desenvolvida para a otimização ponderada da soldagem de revestimento.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Palavras-chave utilizadas para classificação dos trabalhos.	27
Tabela 2- Classificação dos trabalhos quanto as palavras-chave.....	29
Tabela 3- Composição química (% mássica) do metal base e metal de adição.....	30
Tabela 4- Parâmetros variáveis e níveis de trabalho do processo de soldagem.	31
Tabela 5- Composição química média e equivalentes de cromo e níquel para os aços 1020 e arame tubular 316L e para o revestimento com diferentes níveis de diluição.	36
Tabela 6- Matriz experimental.....	41
Tabela 7- Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos.	42
Tabela 8- Análise de Variância. Regr. – Regressão, Res. – Residual.	42
Tabela 9- Comparação entre os ajustes dos modelos completos (MC) e reduzidos (MR).....	43
Tabela 10- Estrutura de correlação entre as respostas.	49
Tabela 11- Análise de Componentes Principais.	50
Tabela 12- Dados utilizados para o cálculo de T_{PC1}	51
Tabela 13- Parâmetros ótimos da soldagem de revestimento.....	53
Tabela 14- Respostas Padronizadas.	54
Tabela 15- Ponderação das respostas.....	55
Tabela 16- Análise de Componentes Principais para as respostas ponderadas.....	56
Tabela 17- Dados utilizados para o cálculo de T_{PC1} para as respostas ponderadas.	56
Tabela 18- Parâmetros ótimos da soldagem de revestimento para as respostas ponderadas. ..	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP	Análise de Componentes Principais
AG	Algoritmo Genético
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	<i>Central Composite Design</i> ou Arranjo Composto Central
CCF	Arranjo Composto de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
DL-EPR	Reativação eletroquímica potenciodinâmica de duplo ciclo
DOE	<i>Design of Experiments</i> ou Projeto e Análise de Experimentos
EPR	Reativação eletroquímica potenciodinâmica
EQMM	Erro Quadrático Médio Multivariado
EQMM _p	Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado
FCAW	Flux Cored Arc Welding
HV	<i>Hardness Vickers</i> ou Dureza Vickers
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> ou Mínimos Quadrados Ordinários
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TTT	Transformação–Tempo–Temperatura
ZTA	Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carbono
Fe	Ferro
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
ZnSO ₄	Sulfato de zinco
Cr	Cromo
Cr ₂₃ C ₆	Carboneto de cromo
Mo	Molibdênio
Ti	Titânio
Nb	Nióbio
Ni	Nitrogênio
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Cr _{Eq}	Cromo equivalente
Ni _{Eq}	Níquel equivalente
γ	Austenita
δ	Ferrita delta
η	Fase intermetálica Laves
σ	Fase intermetálica Sigma
χ	Fase intermetálica Chi
<i>D</i>	Diluição
Ar	Argônio
CO ₂	Dióxido de carbono
<i>E</i>	Energia de soldagem
ϵ	Eficiência térmica do processo
<i>T</i>	Tensão
<i>I</i>	Corrente de soldagem
<i>V_s</i>	Velocidade de soldagem
<i>V_a</i>	Velocidade de alimentação
<i>N</i>	Distância bico de contato peça
<i>E_{corr}</i>	Potencial de corrosão
Δi_{crit}	Densidade de corrente crítica

E_{pite}	Potencial de pite
E_{pp}	Potencial de passivação
E_t	Potencial de transpassivação
$H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$	Ácido oxálico
GS	Grau de Sensitização
I_a	Densidade de corrente de ativação
I_{pass}	Densidade de corrente de passivação
I_r	Densidade de corrente de reativação
x	Variáveis independentes
y	Resposta de interesse
β	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
ε	Erro experimental
Σ	Somatório
α	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
R^2	Coefficiente de determinação
Π	Produtório
λ_{PC}	Autovalor do componente principal
λ^*_{PC}	Autovalor do componente principal das respostas ponderadas
ζ_y	Alvo definido para a resposta
σ_y	Desvio-padrão experimental da resposta
μ_y	Média experimental da resposta
PC	Modelo de superfície de resposta desenvolvido para os escores do componente principal
PC^*	Modelo de superfície de resposta desenvolvido para os escores do componente principal das respostas ponderadas
T_{PC}	Alvo em termo do componente principal
T^*_{PC}	Alvo em termos do componente principal das respostas ponderadas
$Z(y)$	Valor padronizado da resposta
X_{MS}	Teor percentual do elemento X no metal de solda
X_{MB}	Teor percentual do elemento X no metal de base
X_{MA}	Teor percentual do elemento X no metal de adição
D26%	Ponto de referência

SÚMARIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Aços.....	3
2.1.1	Aço carbono.....	3
2.1.2	Aços inoxidáveis.....	4
2.2	Soldagem.....	6
2.2.1	Metalurgia de soldagem de aços inoxidáveis austeníticos.....	6
2.2.2	Soldagem de revestimento.....	10
2.2.3	Soldagem com arame tubular.....	12
2.3	Corrosão.....	15
2.3.1	Corrosão por pite.....	16
2.3.2	Corrosão intergranular.....	18
2.4	Projeto e Análise de Experimentos.....	21
2.5	Metodologia de Superfície de Resposta.....	22
2.6	Erro Quadrático Médio Multivariado.....	24
2.7	Pesquisas relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.....	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Materiais.....	30
3.2	Métodos.....	30
3.2.1	Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho.....	31
3.2.2	Matriz experimental.....	31
3.2.3	Execução dos experimentos.....	31
3.2.4	Preparação das amostras.....	31
3.2.5	Ensaio de dureza.....	33
3.2.6	Análise microestrutural.....	33
3.2.7	Ensaio eletroquímico.....	34
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35

4.1	Análise Microestrutural	35
4.2	Ensaio eletroquímico	38
4.3	Modelagem matemática das respostas	40
4.4	Adequação e ajuste dos modelos	42
4.5	Análise dos efeitos principais dos parâmetros	43
4.5.1	Efeitos principais sobre o Grau de sensitização	43
4.5.2	Efeitos principais sobre o Potencial de Pite.....	44
4.5.3	Efeitos principais sobre a Dureza	45
4.6	Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros	46
4.6.1	Efeitos das interações sobre o Grau de Sensitização.....	46
4.6.2	Efeitos das interações sobre o Potencial de Pite.....	48
4.7	Otimização EQMM.....	49
4.7.1	Análise da correlação entre as respostas.....	49
4.7.2	Análise de Componentes Principais	50
4.7.3	Alvo em termos do componente principal.....	50
4.7.4	Formulação EQMM.....	51
4.8	EQMM Ponderado.....	53
4.8.1	Padronização e Ponderação das respostas	53
4.8.2	Análise de Componentes Principais	56
4.8.3	Alvo em termos do componente principal.....	56
4.8.4	Formulação EQMM Ponderado.....	57
5.	CONCLUSÕES	59
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – Medição de dureza.	69
	APÊNDICE B – Medição do potencial de pite.	70
	APÊNDICE C – Medição do grau de sensitização.....	71
	APÊNDICE D - Curvas de polarização anódica do revestimento em solução de 3,5%p. NaCl.	72

APÊNDICE E- Curvas obtidas pelo ensaio DL-EPR em solução de 0,5 M H ₂ SO ₄ + 0,01 M KSCN para os revestimentos.....	76
ANEXO I- Cálculo da diluição realizado pelo Dr. José Henrique de Freitas Gomes.....	80

1. INTRODUÇÃO

Os aços carbono são empregados em diversas áreas da engenharia, devido à boa resistência mecânica e ao baixo custo de produção. No entanto, a corrosão do aço carbono compromete a eficiência e a segurança de usinas nucleares e petrolíferas, tanques e tubulações podem apresentar falhas mecânicas e gerar impactos ambientais. A corrosão provoca danos à economia mundial, diferentes áreas dos setores produtivos são afetadas pela deterioração do aço. Em 2002, o custo relacionado a problemas de corrosão foi de 276 bilhões de dólares e estima-se que em 2016 o prejuízo tenha sido ainda maior, cerca de 2,2 trilhões de dólares em todo mundo (MOURA *et al.*, 2018). Desse modo, a extensão da vida útil dos componentes industriais pode resultar em economias significativas, reduzindo assim, os custos de manutenções e de substituições das peças. O processo de soldagem de revestimento pode ser utilizado para tais fins. As aplicações de revestimentos de aços inoxidáveis pelo processo de soldagem têm como objetivo obter superfícies resistentes aos ambientes corrosivos a partir de materiais comuns e de menor custo, como o aço carbono.

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam boa resistência à corrosão e soldabilidade, por esses motivos são comumente utilizados como metal de adição. No entanto, a união de materiais com composições químicas diferentes requer alguns cuidados. A mistura dos elementos presentes no aço carbono com os elementos do aço inoxidável pode resultar na formação de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6) e na segregação de elementos de liga. O elemento cromo é responsável pela formação da película passiva (óxido de cromo) sobre a superfície do material. A formação de novos compostos reduz a resistência à corrosão do revestimento, uma vez que, este elemento é removido da matriz austenítica.

Diante disso, se faz necessário o estudo e controle do processo de soldagem para que um revestimento de alta qualidade seja alcançado. Nesse contexto, métodos de otimização são utilizados. O Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) foi desenvolvido em 2008 para a otimização de problemas multivariados considerando a estrutura de correlação existente entre as respostas. Este método combina as técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e Análise de Componentes Principais (ACP). Desde então, o EQMM vem sendo aplicado em diversos trabalhos encontrados na literatura (PAIVA *et al.*, 2010; GOMES *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2016; CAMPOS *et al.*, 2017).

Esta pesquisa foi desenvolvida a partir dos experimentos realizados em Gomes (2010), onde foi realizada a deposição de uma camada de arame tubular inoxidável austenítico ABNT 316L sobre as superfícies de chapas de aço carbono ABNT 1020. O objetivo deste trabalho foi

analisar a microestrutura dos revestimentos e identificar uma combinação dos parâmetros do processo de soldagem com arame tubular que permita a maximização da resistência à corrosão por pite e intergranular (sensitização).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi identificar uma combinação ótima dos parâmetros de soldagem com arame tubular que permita a maximização da resistência à corrosão dos revestimentos de aço inoxidável ABNT 316L (AWS E316LT1) utilizando o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM). Os parâmetros do processo estudados foram velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça.

O objetivo principal pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência da microestrutura sobre a resistência à corrosão e dureza dos revestimentos.
- Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a dureza, potencial de pite e grau de sensitização;
- Identificação de uma combinação ótima dos parâmetros de soldagem visando: maximização do potencial de pite e minimização do grau de sensitização, sem perda considerável de dureza.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços

2.1.1 Aço carbono

Os aços são ligas ferro-carbono nos quais apresentam teores de carbono menores do que 2,11% em peso e podem ou não conter elementos de liga. Sendo assim, são classificados conforme o teor de carbono presente em sua composição. O aço baixo carbono apresenta até 0,30 % em peso desse elemento e possuem baixa resistência mecânica, alta ductilidade e tenacidade. Entre as suas principais aplicações estão chapas utilizadas em indústrias automobilísticas, perfis estruturais, placas utilizadas na fabricação de tubos, construção civil e eletrodomésticos (ASM, 2005; GOMES *et al.*, 2005).

Os aços de médio carbono (0,30- 0,55%p. C) são utilizados quando se deseja resistência mecânica mais elevada. Essa classe apresenta um bom equilíbrio entre resistência e ductilidade e são utilizados em rodas e equipamentos ferroviários, engrenagens, virabrequins e outras peças de máquinas que necessitem de razoável resistência mecânica (TOTTEN, 2006). Os aços com alto teor de carbono possuem entre 0,55 e 1,20%p. e apresentam maior custo de produção, baixa ductilidade e soldabilidade, em relação aos materiais descritos anteriormente. Eles podem ser aplicados em talhadeiras, folhas de serrote, martelos e facas (ASM, 2005, TOTTEN, 2006).

O aço baixo carbono ABNT 1020 (ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas) possui excelente ductilidade e soldabilidade, no entanto, é propenso à corrosão. Nas usinas nucleares, cerca de 27% do sistema de refrigeração é composto por tubulações de aço carbono e a corrosão compromete a eficiência e a segurança dessas usinas (ZHANG *et al.*, 2017).

A corrosão do aço carbono também traz danos para a indústria petrolífera. O petróleo apresenta diferentes componentes químicos, como sulfeto de hidrogênio (H₂S), gás carbônico, ácidos naftênicos e gotículas de água do mar, que, juntamente com o pH, a temperatura, o fluxo e as mudanças de pressão, potencializam a corrosão metálica. Visto isso, melhorar as propriedades superficiais deste aço tem sido um campo de pesquisa importante na ciência dos materiais. Rios e colaboradores (2015) estudaram o comportamento do aço ABNT 1020 quando exposto ao petróleo com diferentes concentrações. Eles observaram que as amostras imersas em óleo contendo 50 ppm de H₂S, assim como as amostras imersas em óleo contendo 4,0% v/v de água do mar, foram mais suscetíveis à corrosão por pite. A corrosão generalizada foi mais acentuada nas amostras expostas ao óleo contendo 3000 ppm de ácido naftênico. Além disso, os autores também observaram o efeito do tempo de exposição ao meio corrosivo, quando as amostras foram imersas na solução durante dois dias o fator mais importante sobre a corrosão

localizada foi a concentração de água do mar no óleo. Após 55 dias de imersão, os três componentes químicos contribuíram para a corrosão generalizada.

Desse modo, fica evidente a importância de se buscar maneiras de melhorar a resistência à corrosão dos aços carbono, de forma a preservar suas características estruturais e prolongar sua vida útil.

2.1.2 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de Fe-Cr contendo no mínimo 10,5%p. Cr. A elevada resistência à corrosão desses aços deve-se à formação de uma película fina de óxido de cromo que envolve a superfície do material, conhecida como camada passiva (SEDRIKS, 1996; ASM, 2005; TOTTEN, 2006). Devido a essa propriedade, os aços inoxidáveis são utilizados em diversos setores industriais, como na indústria de transporte, alimentos e bebidas, petroquímica e farmacêutica e também podem ser empregados em componentes marinhos e implantes biomédicos (JAYACHANDRAN; MURUGAN, 2012). Muitos fatores podem afetar a resistência à corrosão desses aços, como: temperatura, composição química do meio corrosivo (oxigênio, bactéria, entre outros), composição química do metal e distribuição de constituintes microestruturais, tempo de exposição ao meio corrosivo, condições da superfície do metal, tensões aplicadas ao metal durante a exposição ao meio e soldagem (ASM, 2005).

Elementos de liga são adicionados aos aços inoxidáveis para melhorar propriedades como resistência à corrosão e resistência mecânica. A adição de molibdênio (Mo) e nitrogênio (N), por exemplo, melhoram a resistência à corrosão por pites, já a adição de nióbio (Nb) e titânio (Ti) reduzem a possibilidade de ocorrer corrosão intergranular em juntas soldadas. Elementos como cromo (Cr) e níquel (Ni) aumentam a resistência mecânica e a resistência à oxidação a altas temperaturas. Logo, os aços inoxidáveis são divididos em diferentes classes conforme a composição química e são classificados como austenítico, ferrítico, martensítico, duplex e endurecidos por precipitação (SEDRIKS, 1996; ASM, 2005; TOTTEN, 2006).

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas Fe-Cr-Ni, onde o teor de cromo pode variar de 16% a 26%p., enquanto o teor de níquel é de até 35%p. (TOTTEN, 2006). Esses aços possuem estrutura cúbica de face centrada (CFC) a temperatura ambiente e não podem ser endurecidos por tratamento térmico. O aço inoxidável austenítico ABNT 316L, utilizado nesta pesquisa, possui boa ductilidade, resistência à corrosão e soldabilidade. Este aço é comumente aplicado em tubulações, trocadores de calor, *stents* e é um dos materiais mais utilizados em implantes ortopédicos (DADFAR *et al.*, 2007; GUILHERME *et al.*, 2014). A boa soldabilidade

dos aços austeníticos é devido à ausência de transformação martensítica durante a soldagem, assim, reduz a possibilidade de fragilização por hidrogênio (SEDRIKS, 1996; ASM, 2005).

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e com teor de cromo variando entre 10,5 e 30%p. Essas ligas são ferromagnéticas e não podem ser endurecidas por tratamento térmico. Os aços inoxidáveis ferríticos possuem, em sua maioria, maior resistência à corrosão e menor resistência ao impacto em comparação com os martensíticos (SEDRIKS, 1996; ASM, 2005; TOTTEN, 2006).

Os aços inoxidáveis martensíticos são geralmente ligas Fe-Cr-C, com teores de cromo entre 10,5 e 18%p. e concentração de no máximo 1,2%p. de carbono. Essas ligas são endurecíveis por tratamento térmico, sendo usadas, em geral, no estado temperado e revenido. Sua resistência à corrosão é inferior a dos outros tipos, sendo, contudo, adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão (SEDRIKS, 1996; ASM, 2005; TOTTEN, 2006).

Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni-Mo e apresentam uma estrutura composta por ferrita e austenita. As frações volumétricas de cada fase podem variar entre 0,3 e 0,7 (TOTTEN, 2006). Elementos de liga como cromo, molibdênio e nitrogênio, conferem a esses aços uma boa estabilidade química em ambientes salinos. Esse material apresenta resistência mecânica e resistência à corrosão por pites superior aos aços inoxidáveis austeníticos, baixo coeficiente de expansão térmica e boa condutividade térmica. O aço inoxidável duplex é utilizado em diversas áreas industriais, nos setores químico, petroquímico, de papel e celulose, em tubulações, evaporadores de água e trocadores de calor (ASM, 2005; NUNES *et al.*, 2011).

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são as ligas de Fe-Cr-Ni contendo elementos como cobre, alumínio ou titânio. Esses aços são endurecidos por meio do tratamento térmico de envelhecimento, o qual envolve a formação de fases intermetálicas que dificultam a movimentação de discordâncias durante a deformação, aumentando a resistência mecânica. O endurecimento por precipitação geralmente resulta em pequena redução da resistência à corrosão e no aumento da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio (ASM, 2005).

2.2 Soldagem

A soldagem é um dos mais importantes processos industriais de união de peças metálicas. Este processo é essencial para o desenvolvimento de muitos produtos, podendo ser utilizado na fabricação de estruturas simples, como portões, e em componentes com elevado grau de responsabilidade, como os empregados na indústria petrolífera e nuclear.

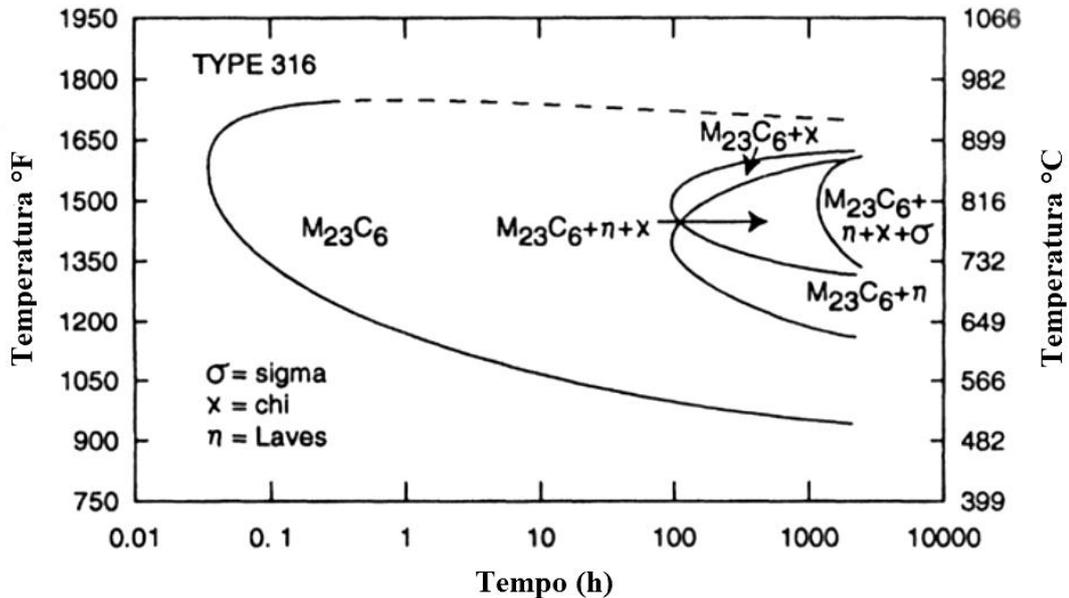
Classicamente, a soldagem é considerada como um método de união permanente de metais. A *American Welding Society* (AWS) define o processo como "Operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição". Além disso, os processos de soldagem também são utilizados na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte (ASM,1993; MARQUES *et al.*, 2011).

Diferentes processos de soldagem são utilizados com o objetivo de obter materiais resistentes a ambientes corrosivos. Técnicas como *Tungsten Inert Gas* (TIG), *Metal Inert Gas* (MIG) e *Metal Active Gas* (MAG), *laser* e arame tubular são comumente empregadas. O processo de soldagem é afetado por diversos fatores, como: tensão, corrente, velocidade de soldagem, distância entre o bico e a peça, vazão do gás de proteção e inclinação da tocha. Alguns desses parâmetros foram discutidos no Item 2.2.3, pois cada técnica de soldagem possui suas peculiaridades.

2.2.1 Metalurgia de soldagem de aços inoxidáveis austeníticos

Embora os aços inoxidáveis austeníticos possuam boa soldabilidade, a soldagem desses materiais pode causar sensitização e formação de ferrita delta (δ) e fases intermetálicas. A formação dessas fases e de precipitados reduz a resistência à corrosão do aço, uma vez que, cromo e molibdênio são removidos da matriz austenítica. A curva transformação-tempo-temperatura (TTT) para o aço inoxidável austenítico 316 mostra a cinética de precipitação de carbonetos $M_{23}C_6$ e fases intermetálicas Sigma (σ), Chi (χ) e Laves (η), conforme Figura 1. A formação dos carbonetos ocorre em um tempo muito reduzido em comparação com as fases intermetálicas, que requerem exposição de longa duração a elevadas temperaturas (SEDRIKS, 1996).

Figura 1- Curva TTT comparando a cinética de precipitação de fases intermetálicas e carbonetos no aço tipo 316.



Fonte: Adaptado de SEDRIKS (1996).

A presença de ferrita delta é comumente encontrada no cordão de solda de aços inoxidáveis austeníticos e recebe este nome porque se forma em elevadas temperaturas, diferente da ferrita alfa (ASM, 1993; PRABHU; ALWARSAMY, 2017). A ferrita delta é resultante da segregação de elementos de ligas ferritizantes (estabilizadores de ferrita), principalmente o Cr, durante a solidificação (LIPPOLD; KOTECKI, 2005). A presença dessa fase poderá ser benéfica ou maléfica, dependendo do local (metal de base ou metal de solda), da fração volumétrica e da aplicação da liga. A presença de aproximadamente 4 a 10%v. de ferrita contribui para uma melhor soldabilidade, evitando principalmente problemas de trincas de solidificação (LOTHONGKUM *et al.*, 2001; GARCIA *et al.*, 2008). A trinca de solidificação ou trinca a quente é resultado da segregação de elementos, tais como P, S e Si. A formação de compostos com baixo ponto de fusão no metal de solda leva ao trincamento, uma vez que, tensões internas são originadas durante a solidificação (PASSOS; OTUBO, 2010). Assim, a presença de ferrita δ nos contornos de grãos da austenita atua como barreira ao movimento das trincas (ASM, 1993). No entanto, a presença dessa mesma fase além de certos limites pode ser completamente indesejável (LOTHONGKUM *et al.*, 2001; GARCIA *et al.*, 2008; PASSOS; OTUBO, 2010). A presença de ferrita delta está diretamente relacionada com a resistência à corrosão por pite, quanto maior a sua quantidade menor é a resistência à corrosão do metal soldado (DADFAR *et al.*, 2007; LIQING *et al.*, 2010).

A fase sigma é encontrada com mais frequência nos aços austeníticos do que as demais fases intermetálicas, uma vez que, a ferrita delta é rica em elementos de liga que promovem tal transformação. Essa fase nucleia-se preferencialmente na interface ferrita-austenita quando o material é exposto à altas temperaturas durante várias horas. A fase sigma está associada à diminuição de ductilidade e tenacidade (ASM, 1993; BHADSHIA; HONEYCOMBE, 2006; KIM *et al.*, 2011).

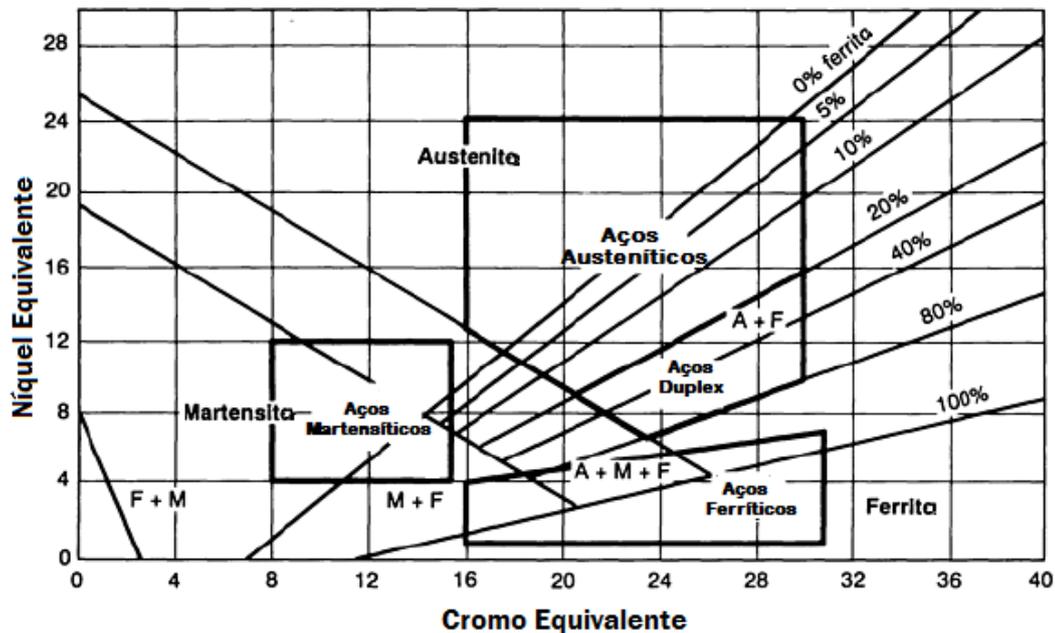
Assim, é importante estimar a microestrutura resultante do processo de soldagem. O diagrama de Schaeffler indica as fases presentes na solidificação de aços inoxidáveis em condições de equilíbrio, conforme Figura 2. Para utilizá-lo é necessário que os equivalentes de cromo (Cr_{eq}) e níquel (Ni_{eq}) sejam calculados, conforme Equações 1 e 2.

$$\text{Cromo Equivalente } (Cr_{Eq}): Cr \%p. + Mo \%p. + (1,5 \times Si \%p.) + (0,5 \times Nb \%p.) \quad (1)$$

$$\text{Níquel Equivalente } (Ni_{Eq}): Ni \%p. + (30 \times C \%p.) + (0,5 \times Mn \%p.) \quad (2)$$

O diagrama deve ser utilizado apenas como orientação para a soldagem de aços inoxidáveis, uma vez que, a microestrutura formada na solidificação pode variar conforme a composição química do metal base e a taxa de resfriamento da solda (ASM,1993). Em aplicações onde o processo de soldagem é realizado sobre materiais com composições diferentes, o ponto que representa a solda no diagrama está sobre o segmento de reta que une as composições do metal de base e o metal de adição. A posição desse ponto no segmento depende da diluição da solda, ficando mais próximo do metal de adição para soldas com menores índices de diluição (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

Figura 2- Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis.



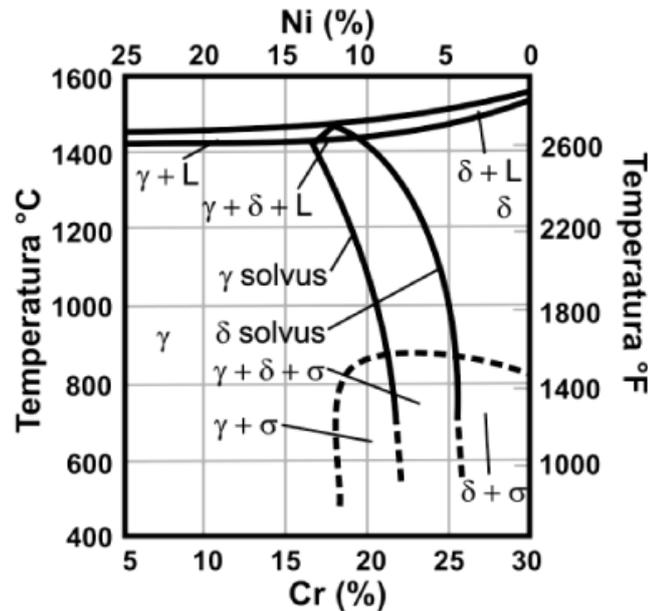
Fonte: Adaptado de ASM (1993).

Os mecanismos de solidificação podem ser iniciados com uma microestrutura austenítica, austenoferrítica, ferriticoaustenítica ou ferrítica, dependendo da relação entre cromo equivalente e níquel equivalente (LIPPOLD; KOTECKI, 2005; SILVA *et al.*, 2013). O modo austenoferrítico se inicia com a formação de dendritas de austenita, seguida da formação de ferrita nos braços dendríticos, causado pela segregação dos elementos de liga ferritizantes nestas regiões. O modo de solidificação conhecido como ferriticoaustenítica se inicia com a formação de dendritas ferríticas, seguida da transformação em austenita (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

O comportamento de transformação dos aços inoxidáveis austeníticos pode ser descrito usando o diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni com teor de ferro fixado em 70% p., Figura 3. A divisão entre os modos de solidificação é aproximadamente 18Cr-12Ni (razão igual a 1,5) no sistema ternário, pequena região triangular onde austenita, ferrita e líquido coexistem. Para maiores razões de cromo/níquel, a solidificação primária ocorre como ferrita delta e em proporções mais baixas como austenita. Quando a relação Cr_{eq}/Ni_{eq} é menor que 1,48, o metal de solda tende a solidificar-se com uma estrutura completamente austenítica. Por outro lado, quando a relação Cr_{eq}/Ni_{eq} é entre 1,5 e 1,95, a solidificação é ferriticoaustenítica (ASM, 1993; CHAKRABARTI *et al.*, 2013). Nessa região a maioria ou toda ferrita primária é transformada em austenita durante o resfriamento em condições de equilíbrio. Porém, o resfriamento rápido durante a soldagem, resultará em ferrita delta retida, uma vez que, se trata de um processo

difusional (LIPPOLD; KOTECKI, 2005; SILVA *et al.*, 2013). Para Cr_{eq}/Ni_{eq} maior que 1,95 somente a fase ferrítica é formada (ASM, 1993; CHAKRABARTI *et al.*, 2013).

Figura 3- Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%p.



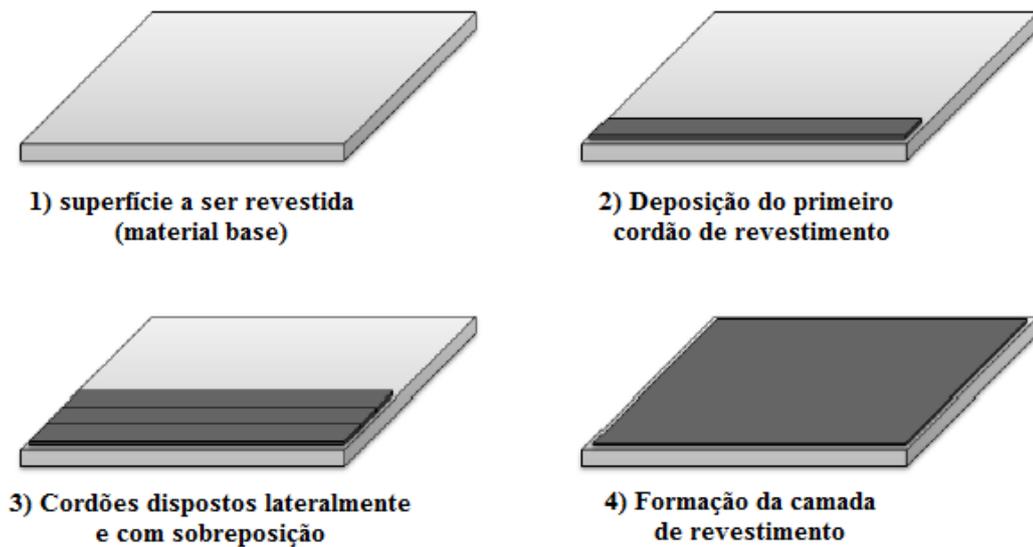
Fonte: Adaptado de LIPPOLD e KOTECKI (2005).

2.2.2 Soldagem de revestimento

A soldagem de revestimento é definida pela AWS como a deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro metal com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. O processo de revestimento ocorre de forma que os cordões sejam depositados lateralmente sobre o metal base até que toda a região de interesse seja recoberta, conforme Figura 4. Assim, metais de adição são depositados com a finalidade de recuperar peças desgastadas ou melhorar as propriedades como resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência à altas temperaturas e aumento da dureza (PALANI; MURUGAN, 2007; GOMES, 2010; JAYACHANDRAN; MURUGAN, 2012).

Considerando as possíveis aplicações da soldagem de revestimento, foi de interesse desta pesquisa a criação de superfícies resistentes à corrosão. A deposição de pelo menos uma camada de aço inoxidável sobre superfícies de aços carbono tem como objetivo obter um revestimento com propriedade anticorrosiva. De modo que a utilização de peças (maciça) de aço inoxidável não seja necessária. A principal vantagem deste processo está relacionada com o fator econômico. O aço carbono possui baixo valor agregado, logo, camadas resistentes à corrosão podem ser produzidas a partir de materiais de menor custo (BESLIU *et al.*, 2017; FILHO; GONZALEZ, 2017; SENTHILKUMAR *et al.*, 2017).

Figura 4- Processo de soldagem de revestimento.

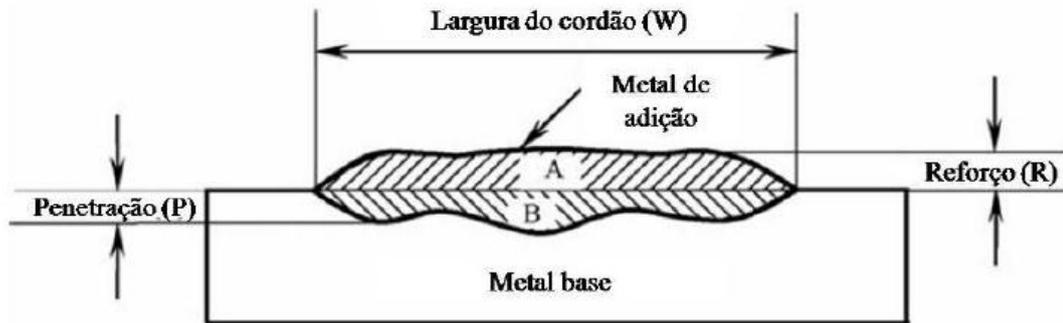


Fonte: Gomes (2010).

A soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis é utilizada em diferentes indústrias, como por exemplo, em indústrias petrolíferas, químicas, alimentícias, agrícolas, nucleares, navais, ferroviária, de construção civil, entre outras (SOWRIRAJAN, 2017; BESLIU *et al.*, 2017). Dentre as diversas aplicações, vale ressaltar a aplicação de revestimentos no interior de vasos de pressão, digestores utilizados na fabricação de papel, reatores de ureia, tubos e vasos de contenção de reatores nucleares (BESLIU *et al.*, 2017). Além disso, tubos revestidos são amplamente utilizados para transporte de fluidos corrosivos e em *risers* associados com sistema de produção de óleo e gás. Esses tubos são normalmente revestidos internamente com uma camada de 2 a 3 mm de espessura (TIYASRI; POOPAT, 2013).

Embora este processo apresente muitos fatores positivos, um dos principais desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado do procedimento de soldagem para que o cordão seja depositado com a geometria desejada, conforme Figura 5. Diferente de outros processos, na soldagem de revestimento é desejado grandes larguras do cordão, altos reforços, baixas penetrações e baixos percentuais de diluição. A obtenção do perfil geométrico com essas características permite economizar tempo e materiais, uma vez que, uma maior área é recoberta com um menor número de passes.

Figura 5- Características geométricas do cordão de revestimento.



Fonte: Gomes (2010).

O controle da diluição se caracteriza como um dos requisitos mais importantes da soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. A diluição é definida, conforme Equação 3, como a relação entre a área de penetração e a área total da seção transversal do cordão de solda.

$$Diluição = \frac{\text{Área de penetração}}{\text{Área de reforço} + \text{Área de penetração}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

No caso da união de materiais com composições químicas diferentes, o aumento da penetração e, conseqüentemente, da diluição, faz com que a região de contato entre os materiais também aumente, resultando em uma maior difusão entre os seus elementos. A mistura dos elementos presentes no aço carbono com os elementos do aço inoxidável pode resultar na formação de novos compostos, que desta forma comprometem a resistência à corrosão do material (GOMES, 2010; JAYACHANDRAN; MURUGAN, 2012; SILVA; D'OLIVEIRA, 2015; BESLIU *et al.*, 2017; YOGANANDH *et al.*, 2017).

2.2.3 Soldagem com arame tubular

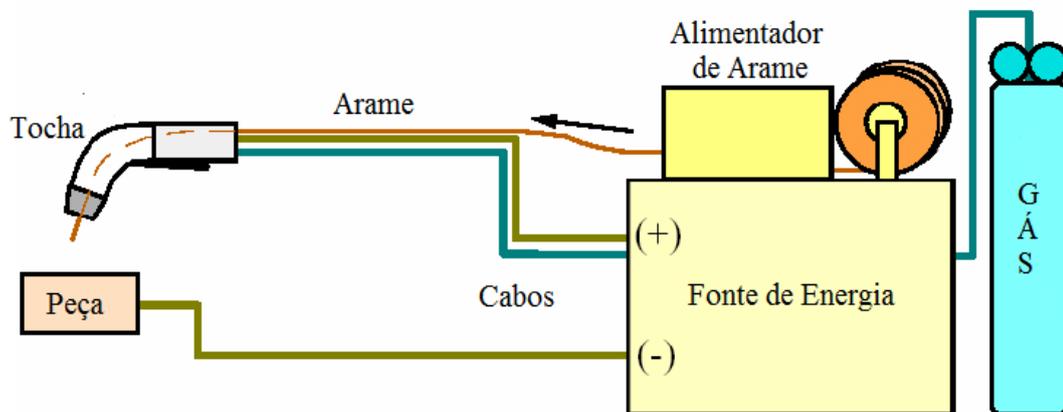
O processo de soldagem a arco com arame tubular (*Flux Cored Arc Welding – FCAW*) produz a coalescência de metais por meio de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo tubular, contínuo e consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão é realizada por um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo. No interior do invólucro metálico (metal de adição) contém minerais, elementos de liga, e materiais que fornecem gases que irão proteger o metal de solda da ação da atmosfera (principalmente O_2 e N_2), desoxidantes e elementos formadores de escória. O fluxo de soldagem pode ser suplementado por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa. O gás de proteção adicional mais utilizado é o CO_2 puro, ou misturas desse gás com argônio (ASM, 1993; MARQUES *et al.*, 2011). Segundo Starling e

colaboradores (2004) a utilização de mistura de gases, como 75%Ar-25%CO₂, permite alcançar maiores taxas de deposição, quantidade reduzida de respingos, menor geração de fumos, melhor acabamento e perfil do cordão e utilização de maiores velocidades de soldagem.

A soldagem com arames tubulares é utilizada para fabricação e manutenção de peças destinadas a indústria química, petrolífera, automotiva e de geração de energia. A aplicação de revestimentos utilizando arames tubulares está sendo bastante difundida devido à alta produtividade e capacidade de automação da técnica. O processo FCAW é muito parecido com MIG/MAG, em relação aos princípios de funcionamento e equipamentos, conforme Figura 6. Contudo, a soldagem com arame tubular apresenta melhor desempenho em termos de produtividade e integridade do metal de solda (PALANI; MURUGAN, 2007; MARQUES *et al.*, 2011).

O processo FCAW possui várias vantagens em relação a outros processos de soldagem, como: alta taxa de deposição de materiais, soldagem em todas as posições, menor perda de eletrodo, alta qualidade da solda e excelente controle da poça de fusão. Embora apresente potenciais vantagens produtivas e econômicas, a soldagem com arame tubular para o revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis se caracteriza como uma atividade criteriosa. Elevados níveis de temperatura e energia são alcançados em curto espaço de tempo, o que pode tornar o processo instável e dependente de alguns cuidados. O processo FCAW apresenta limitações como: somente soldagem de metais ferrosos e ligas de níquel, maior custo dos equipamentos e eletrodos, exige operações de remoção da escória e maior geração de fumos (ASM, 1993; GOMES, 2010; RAJKUMAR; MURUGAN, 2014).

Figura 6- Representação esquemática do equipamento para soldagem FCAW.



Fonte: Adaptado de Marques *et al.* (2011).

Os parâmetros do processo de soldagem, tais como intensidade de corrente, tensão e velocidade de soldagem, modificam as características da solda. Estes parâmetros determinam a energia envolvida no processo e seu valor pode ser estimado conforme a Equação 4 (MARQUES *et al.*, 2011; BESLIU *et al.*, 2017).

$$E = \frac{\epsilon \times T \times I}{V_s} \quad (4)$$

Onde: E é a energia de soldagem (J/mm);

ϵ é eficiência térmica do processo;

T é a tensão do arco (V);

I é a corrente de soldagem (A);

V_s é a velocidade de soldagem (mm/s).

Quanto maior a densidade de corrente aplicada durante a soldagem, maior é a energia de soldagem, e conseqüentemente, menor é o tempo para fundir o material (maior taxa de fusão e deposição de material), maior a penetração, largura do cordão de solda e largura da zona termicamente afetada (ZTA) (ASM, 1993; PALANI; MURUGAN, 2007; PRABHU; ALWARSAMY, 2017). A aplicação de uma grande densidade de corrente faz com que a ZTA cresça independentemente do tempo de exposição à fonte de calor, para menores densidades de energia o crescimento dessa região é dependente do tempo de interação (ASM, 1993). Vale ressaltar que a velocidade de alimentação do arame (V_a) está diretamente relacionada com o efeito da corrente (GOMES, 2010; SENTHILKUMAR *et al.*, 2017).

A tensão de soldagem afeta o comprimento do arco, a transferência de metal, o formato do cordão e a quantidade de calor fornecido. Em geral, o aumento da tensão aumenta a largura do cordão, a penetração e a formação de respingos. A utilização de tensões baixas resulta em um arco mais instável, favorecendo o aparecimento de porosidades e outros problemas associados com a absorção de gases da atmosfera (MARQUES *et al.*, 2011; SENTHILKUMAR; KANNAN, 2015).

A velocidade de soldagem também tem influência sobre a energia de soldagem e a quantidade de calor fornecida à peça. Quanto menor a velocidade de soldagem maior a energia do processo, assim podendo causar problemas metalúrgicos. A utilização de uma velocidade de soldagem elevada torna o processo mais produtivo e resulta em menores penetração, reforço e largura do cordão. Porém, pode introduzir descontinuidades no cordão de solda, como falta de

fusão e de penetração (PALANI; MURUGAN, 2007; MARQUES *et al.*, 2011; SENTHILKUMAR *et al.*, 2017).

Outro parâmetro importante é a distância bico de contato peça. Quando aumenta-se a distância bico de contato peça, a energia e a velocidade de fusão diminuem. Em razão disso, o metal de adição não tem energia para penetrar na peça e acaba se acumulando sobre o metal base, aumentando o reforço. Quando a distância bico de contato peça é muito grande pode-se ter uma deficiência na ação do gás de proteção. (MARQUES *et al.*, 2011; SENTHILKUMAR; KANNAN, 2015).

A vazão do gás de proteção, assim como a escolha do gás, influencia diretamente na qualidade do cordão de solda. Vazão muito baixa pode levar à formação de porosidades e outros problemas associados com a falta de proteção, como perda de elementos de liga. Vazões elevadas podem tornar o cordão de solda irregular (com depressões) e aumentar o custo da operação (MARQUES *et al.*, 2011).

A inclinação da tocha, ou o ângulo entre o eixo do arame e a linha da junta, interfere no controle da escória e no perfil do cordão de solda. Na utilização da técnica “puxando”, ou seja, o arame apontando para o cordão já formado, a força do arco faz com que a escória não passe à frente da poça de fusão, reduzindo assim o risco da escória ficar presa. Neste caso tem-se maior penetração, menos respingos, cordão mais estreito e mais convexo e um arco mais estável. Quando se utiliza a técnica “empurrando”, tem-se características tais como: menor penetração, mais respingos, cordão mais plano e mais largo, porém, menor visibilidade para o operador. Esta técnica é empregada quando grandes valores de penetração não são requeridos. Quando for utilizado ângulo neutro será obtido um cordão de solda com características intermediárias aos dois casos citados anteriormente (MARQUES *et al.*, 2011).

2.3 Corrosão

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, associada ou não a esforços mecânicos (GEMELLI, 2001). A corrosão metálica é classificada de acordo com a maneira na qual ela se manifesta, podendo ser dividida em diferentes formas: corrosão generalizada, galvânica, em fenda, por pite, intergranular, lixiviação seletiva, erosão e corrosão sob tensão (ASM, 1992). A corrosão generalizada não é comumente encontrada nos aços inoxidáveis, devido à camada passiva de óxido formada na superfície do material. Entretanto, esse filme passivo pode sofrer ataques localizados na presença de ânions específicos e potenciais adequados ou na presença

de defeitos nessa película passiva. Nesse sentido, no presente trabalho apenas a corrosão localizada por pite e intergranular foram discutidas.

2.3.1 Corrosão por pite

A corrosão por pite é uma dissolução localizada e acelerada de metais, na qual cavidades ou buracos são produzidos no material. Ocorre somente em superfícies metálicas que estão no estado passivo, como é o caso dos aços inoxidáveis e ligas de alumínio. A corrosão por pite resulta da quebra da camada passiva, motivada por características metalúrgicas tais como inclusões, contorno de grão ou constituintes intermetálicos. Este tipo de corrosão é de difícil acompanhamento, uma vez que, pode ocorrer no interior de equipamentos e instalações, com pouca perda de massa e de espessura. Este processo, embora localizado, pode criar pontos concentradores de tensão, que reduzem a resistência mecânica do material. A quebra da camada passiva ocorre em geral pela ação dos chamados íons haleto (Cl^- , Br^- , I^- , F^-) (ASM, 2003; LACERDA, 2015).

O mecanismo de corrosão por pite pode ser dividido em duas etapas: iniciação e propagação. A adsorção competitiva entre ânions agressivos, como o cloreto, e a espécie responsável pela passivação, como o oxigênio, resultam na nucleação de pites. Em outras palavras, os pites se desenvolvem em regiões onde o oxigênio adsorvido na superfície do metal é substituído por íons cloreto. A dissolução rápida do metal dentro do pite produz um excesso de cargas positivas nessa área, resultando na migração dos íons cloreto a fim de manter a neutralidade de cargas, conforme Figura 7. Assim, passa a existir uma elevada concentração de cloreto do metal no interior do pite e, como resultado de sua hidrólise, é gerada uma elevada concentração de íons hidrogênio e, logo, redução no pH localmente, tornando o processo autocatalítico, como mostra a Equação 5 (ASM, 2003; LEÃO, 2008).

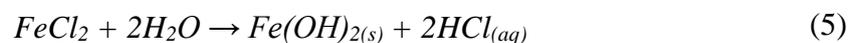
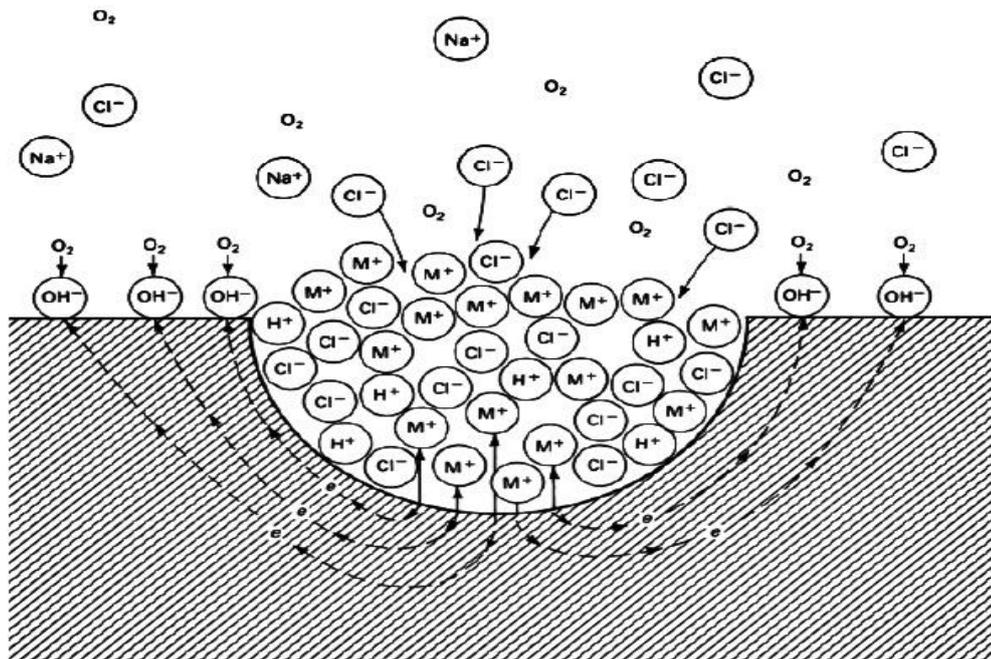


Figura 7- Mecanismo de formação de pite em um metal (M) exposto a uma solução de NaCl.



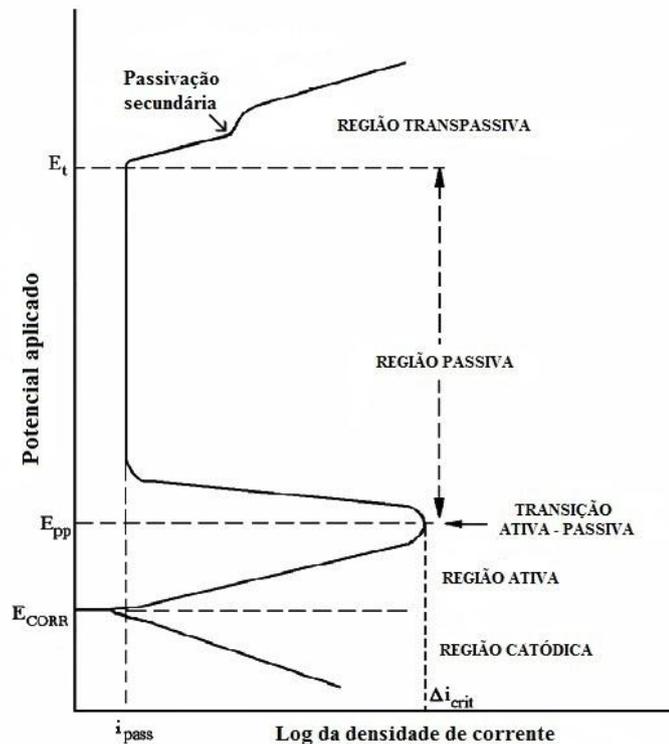
Fonte: ASM, 2003.

A corrosão por pite pode ser avaliada por meio de ensaios eletroquímicos. Esses ensaios são realizados com o auxílio de um potenciostato, o qual permite impor e/ou medir potenciais e corrente no sistema metal/eletrolito de interesse. Assim, curvas de polarização são obtidas e utilizadas para determinar a corrente e o potencial de corrosão de metais em determinado meio corrosivo, conforme Figura 8. O metal quando entra em contato com o eletrólito adquire um certo potencial, conhecido como potencial de circuito aberto ou potencial de corrosão (E_{corr}). O E_{corr} é o ponto de intersecção da curva de polarização associado com as reações catódicas e anódicas, isto é, o potencial onde a densidade de corrente anódica da dissolução do metal é igual a densidade de corrente catódica da redução do hidrogênio e/ou oxigênio. A polarização é iniciada aplicando potencial a uma taxa constante a partir do potencial de corrosão ou em potenciais onde predominam as reações catódicas (abaixo do E_{corr}). Na região anódica ativa a densidade de corrente aumenta rapidamente até a formação de um filme passivo na superfície do material. O potencial em que ocorre a diminuição da corrente é chamado de potencial de passivação (E_{pp}). Assim, a máxima taxa de corrosão obtida antes da passivação é denominada densidade de corrente crítica (Δi_{crit}). Quanto menor a Δi_{crit} e quanto mais próximo E_{pp} de E_{corr} maior a tendência de passivação. Na região passiva, a densidade de corrente (i_{pass}) é pequena e sofre pouca variação. Em potenciais mais elevados a película passiva não é mais estável e o metal sofre dissolução eletroquímica, podendo ser observado um aumento brusco no valor da densidade de corrente (SEDRIKS, 1996; SERNA-GIRALDO, 2006). Quanto maior o potencial

de transpassivação (E_t) ou potencial de pite (E_{pite}) mais resistente é o material a este tipo de corrosão (SEDRIKS, 1996; SIVA; MURUGAN, 2013).

Figura 8- Representação de uma curva de polarização anódica típica para aços inoxidáveis.

E_{CORR} – potencial de corrosão; E_{pp} – potencial de passivação; E_t – potencial de transpassivação; i_{pass} – densidade de corrente de passivação.



Fonte: Adaptado de SEDRIKS (1996).

2.3.2 Corrosão intergranular

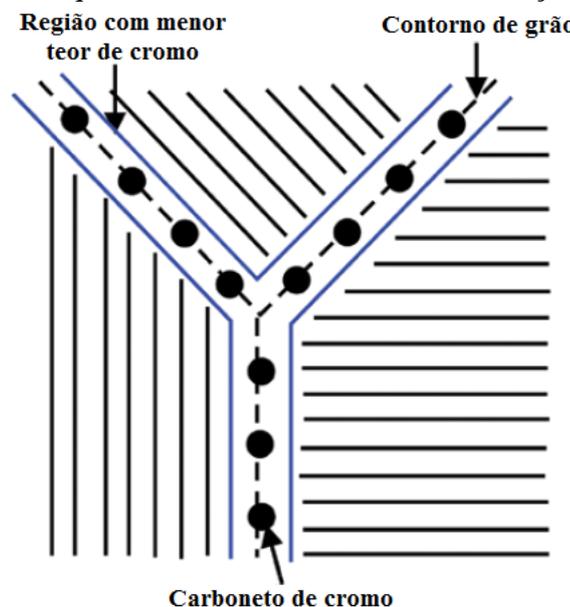
A corrosão intergranular é um tipo de corrosão localizada, onde o ataque é iniciado nas proximidades dos contornos de grãos, devido à segregação de impurezas e elementos de liga nessas regiões. A corrosão intergranular constitui o modo de ataque preferencial de certas ligas de alumínio e aços inoxidáveis após tratamento térmico de envelhecimento ou soldagem. Embora a quantidade de metal oxidado seja pequena, este tipo de corrosão pode modificar as características mecânicas do material (ASM, 1992; GEMELLI, 2001; LIPPOLD, 2015).

Os aços inoxidáveis austeníticos, quando aquecidos entre 480 e 815°C são propensos a sofrer corrosão intergranular. Nessa faixa de temperatura o carbono e o cromo reagem e formam precipitados de carboneto de cromo (Cr_{23}C_6). Essa precipitação ocorre preferencialmente nos contornos de grão, fazendo com que os carbonetos de cromo se concentrem nessas regiões, conforme Figura 9. Nesse fenômeno, chamado de sensibilização, o material fica com pouca quantidade de cromo nas adjacências dos contornos de grão e, conseqüentemente, baixa

resistência à corrosão. Os materiais sensibilizados sofrem corrosão intergranular, uma vez que, a corrosão nesses casos acontece preferencialmente nas regiões de contorno de grão. Quanto maior a concentração de carbono, maior é a faixa de temperatura de sensibilização e menor é o tempo de início de precipitação. Sendo assim, para minimizar tal precipitação é necessário reduzir a quantidade de carbono nos materiais. Os aços inoxidáveis austeníticos 304L, 316L e 317L possuem concentração de no máximo 0,03 %p. de carbono (SEDRIKS, 1996; ASM, 2005; BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

A forma mais usual de detectar a susceptibilidade à corrosão intergranular dos aços inoxidáveis austeníticos é com o uso dos ensaios de imersão especificados pela norma ASTM A 262 (prática A). Esse ensaio consiste em um ataque eletrolítico em solução de 10%p. de ácido oxálico ($H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$) com densidade de corrente de $1 A/cm^2$ por 90 s sobre a superfície da amostra lixada e polida. As microestruturas são analisadas e classificadas de acordo com a presença de “*steps*”, “*dual*” e “*ditches*”. De acordo com a prática A, somente as amostras que estiverem com os contornos de grão totalmente envolvidos por precipitados (*ditches*) são rejeitadas sendo consideradas susceptíveis à corrosão intergranular. As amostras que estiverem sensibilizadas, porém isentas de contornos de grão totalmente envoltos por carbonetos são aprovadas.

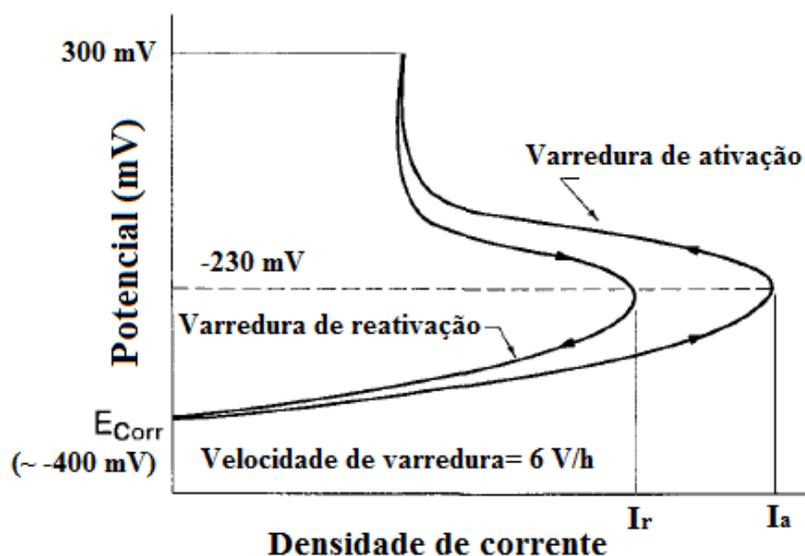
Figura 9 - Representação esquemática do fenômeno de sensibilização para aços inoxidáveis.



Fonte: Adaptado de LIPPOLD (2015).

Técnicas eletroquímicas são alternativas aos ensaios de imersão, devido ao menor tempo de execução e a possibilidade de serem aplicadas como ensaio não destrutivo. A técnica eletroquímica de reativação potenciodinâmica *Double Loop* (DL-EPR) é utilizada para avaliar a susceptibilidade à corrosão intergranular de aços inoxidáveis e ligas de níquel (BABOIAN, 2005; IACOVIELLO *et al.*, 2017). O ensaio consiste em polarizar anodicamente a amostra, a partir do potencial de corrosão, até a região de passivação. Assim que o potencial de passivação é atingido, a direção de varredura é invertida e o potencial é reduzido, conforme Figura 10. Tem-se como resultado, dois picos de densidade de corrente anódica, um de ativação, I_a , e outro de reativação, I_r . O grau de sensitização é dado pela razão entre os dois máximos de densidade de corrente, I_r/I_a , e valores maiores que 0,001 indicam o início do fenômeno de sensitização (BABOIAN, 2005). O aumento da densidade de corrente de reativação se deve ao rompimento da película passiva nas regiões empobrecidas em cromo. O ensaio se sustenta na suposição de que só os contornos de grãos sensitizados são ativos e que o restante do grão ou os contornos não sensitizados permanecem passivos durante a reativação. Assim, quanto maior for I_r maior será o grau de sensitização do material analisado (SERNA-GIRALDO, 2006). O método DL-EPR possui boa reprodutibilidade e não necessita que o tamanho de grão seja medido. Além disso, não é necessário que as amostras sejam polidas, o que reduz o tempo de preparação das mesmas (BABOIAN, 2005).

Figura 10- Diagrama esquemático do ensaio DL-EPR.



Fonte: Adaptado de BABOIAN (2005).

2.4 Projeto e Análise de Experimentos

O Projeto e Análise de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*) consiste de um experimento planejado no qual é realizado uma série de testes. Durante os testes, as variáveis de entrada do processo são modificadas de forma sistemática e simultânea com o objetivo de observar e identificar a maneira como as variáveis de saída são afetadas. Os efeitos destas mudanças são medidos, modelados e mapeados, resultando em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2005).

O emprego do DOE consiste em três etapas: planejamento experimental, execução dos experimentos e análise estatística dos dados coletados. Para a realização do planejamento experimental o pesquisador precisa dominar a metodologia estatística e ter conhecimento do que se deseja estudar, bem como ter uma estimativa qualitativa de como os dados serão analisados. O planejamento experimental é a etapa mais importante, nesta fase deve-se selecionar os fatores e seus níveis, assim como, as variáveis de resposta, conforme o objetivo do experimento (FAROOQ *et al.*, 2016).

A técnica DOE pode ser aplicada em vários setores da ciência como: metalurgia, agronomia, química, economia, aeronáutica, processos de fabricação, entres outros. As principais vantagens em se utilizar as técnicas estatísticas de análise de experimentos são (MONTGOMERY, 2005):

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação, diminuindo o tamanho e o custo do experimento;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação de quais variáveis são mais influentes no processo;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas.

As técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta (GOMES, 2010). Os experimentos fatoriais completos e fracionados são os mais econômicos para estudar os efeitos produzidos por dois ou mais fatores, uma vez que, possibilitam verificar o efeito dos fatores e suas interações sobre as variáveis respostas com a realização de poucos experimentos (MONTGOMERY, 2005). O arranjo Taguchi permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos. Esta técnica é utilizada em processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Porém, pode apresentar modelos

matemáticos não confiáveis. Por outro lado, a Metodologia de Superfície de Resposta é utilizada para a otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão. Esta permite a verificação de variações intermediárias do processo, entretanto, pode apresentar erros na extrapolação dos pontos axiais, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis (NILO JÚNIOR, 2003).

Nesta pesquisa, utilizou-se a Metodologia de Superfície de Resposta para modelar e otimizar o processo de soldagem com arame tubular em operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis.

2.5 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é um conjunto de ferramentas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas em que a resposta é influenciada por muitas variáveis. Assim, o objetivo da técnica é a otimização da resposta de interesse (MONTGOMERY, 2005).

Na maioria das vezes as relações entre a resposta (y) e as variáveis independentes (x) são desconhecidas, assim, o primeiro passo da MSR é encontrar uma aproximação que descreva o verdadeiro relacionamento entre y e o conjunto de variáveis. Geralmente, funções polinomiais são utilizadas para identificar a região de ótimo. Quando a resposta é bem modelada por uma função linear, a relação aproximada pode ser representada por um polinômio de primeira ordem, conforme Equação 6 (GOMES, 2010; BRITO, 2015).

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon \quad (6)$$

Onde β representa os coeficientes do polinômio, k é o número de variáveis independentes e ε representa o erro experimental.

Se o sistema apresentar curvatura, então um polinômio de maior grau deve ser utilizado, como o modelo de segunda ordem, Equação 7:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

A maioria dos problemas MSR utilizam um ou ambos dos modelos descritos acima. Embora seja improvável que o modelo polinomial represente bem todo o espaço experimental, para uma região específica tem se mostrado adequado. Para a estimação dos coeficientes o algoritmo tipicamente usado é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least*

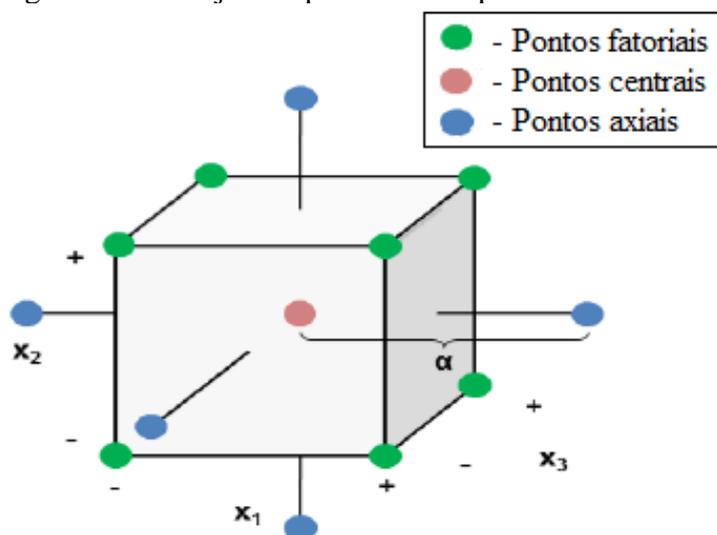
Squares – OLS). Em seguida, a significância do modelo é verificada pela Análise de Variância (ANOVA). Esta ferramenta estatística também permite avaliar quais termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos. O ajuste do modelo é dado pelo coeficiente de determinação (R^2). Este termo mede a proporção da variação total da resposta que é explicada pelo modelo construído. Desse modo, quanto maior o R^2 , isto é, quanto mais próximo de 100%, menor será o erro e melhor o modelo. Associado ao coeficiente de determinação, encontra-se o R^2 ajustado ($R^2 (adj.)$), que considera o fato de que R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população (MONTGOMERY, 2005; GOMES, 2010).

O arranjo experimental mais utilizado para a coleta de dados na Metodologia de Superfícies de Resposta é o arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*). O CCD é uma matriz formada por pontos fatoriais completos ou fracionados, pontos centrais e um grupo de níveis extras denominados pontos axiais, conforme Figura 11. O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos.

Em função da localização dos pontos axiais, o CCD pode ser circunscrito, inscrito ou de face centrada. O arranjo composto circunscrito (CCC) corresponde ao arranjo composto central original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância α dos pontos centrais. O valor de α depende do número de fatores analisados, conforme Equação 8. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator e explora o maior espaço fatorial possível.

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (8)$$

Figura 11- Arranjo composto central para três fatores.



Fonte: Adaptado de BRITO (2015).

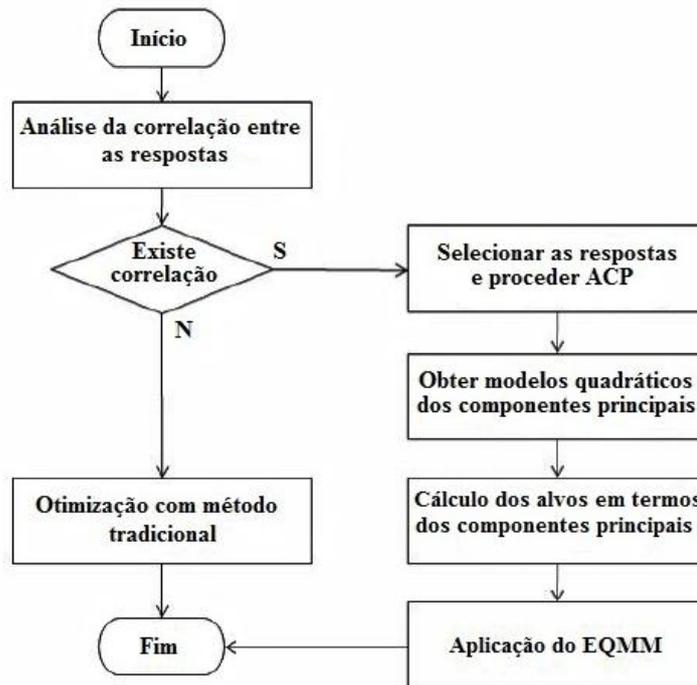
O arranjo inscrito (CCI) é adequado para situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Este arranjo utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. O CCI também requer cinco níveis. O Arranjo de Face Centrada (CCF) caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial e requer três níveis para cada fator (GOMES, 2010; BRITO, 2015).

2.6 Erro Quadrático Médio Multivariado

O Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) foi desenvolvido por Paiva (2008) para otimização de processos com múltiplas variáveis de saída, como o processo de soldagem. Diferente dos métodos tradicionais o EQMM leva em consideração a variância e correlação existente entre as respostas. A negligência da estrutura de correlação pode conduzir a pontos de ótimo inapropriados, pois os níveis de trabalho que melhoram uma resposta podem piorar outra (COSTA *et al.*, 2016; CAMPOS *et al.*, 2017).

O EQMM combina diferentes métodos, como o Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e Análise de Componentes Principais (ACP). A ACP é uma técnica estatística multivariada que dedica à explicação da estrutura de variância-covariância existente em um conjunto de dados, utilizando-se combinações lineares das variáveis originais. Os principais objetivos da técnica são a redução de dimensionalidade e a interpretação de dados. Embora p componentes sejam necessários para se reproduzir a variabilidade total de um sistema de interesse, geralmente, a maior parte desta variabilidade pode ser representada por um pequeno número de componentes principais. Ou seja, k componentes principais podem substituir sem perda considerável de informação as variáveis originais, reduzindo o conjunto original de dados (PAIVA, 2008; GOMES, 2010). A variância acumulada explicada deve ser superior a 80% (PAIVA *et al.*, 2010). Em outras palavras, o método EQMM consiste em converter as respostas correlacionadas, por meio da ACP, em novas variáveis não correlacionadas (escores) (AMORIM, 2017). A Figura 12 apresenta os procedimentos empregados para otimização.

Figura 12- Fluxograma do Procedimento para obtenção do EQMM.



Fonte: Adpatado de PAIVA (2008).

Após a realização das etapas definidas pelo fluxograma, a otimização pelo método EQMM é obtida a partir de formulações matemáticas, conforme Equações 9 e 10.

$$\text{Minimizar EQMM} = \left[\prod_{i=1}^n (PC_i - T_{PCi})^2 + \lambda_{PCi} \right]^{1/n} \quad (9)$$

$$\text{Sujeito a: } x^T x \leq \alpha^2 \quad (10)$$

Onde, n é o número de componentes principais utilizados, PC_i é o arranjo experimental em termos de componentes principais, T_{PCi} é o alvo em termo dos componentes principais, λ_{PCi} é o autovalor do i -ésimo componente principal e $x^T x \leq \alpha^2$ é a restrição do espaço experimental para regiões esféricas (no caso de se utilizar um CCD).

O Erro Quadrático Médio Multivariado tem se mostrado muito eficiente, porém pode levar a resultados não satisfatórios quando empregado para avaliar respostas com diferentes níveis de importância. Gomes (2010) propôs uma estratégia de ponderação para o Erro Quadrático Médio Multivariado, onde a atribuição dos pesos às respostas é realizada antes da Análise de Componentes Principais. O primeiro passo para a aplicação do método é a padronização das respostas, conforme Equação 11.

$$Z(y) = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \quad (11)$$

Onde, $Z(y)$ é o valor padronizado da resposta, y é o valor experimental obtido, μ_y é a média experimental da resposta e σ_y é o desvio-padrão experimental da resposta.

O segundo passo é multiplicar as respostas padronizadas pelas respectivas ponderações. A soma dos pesos atribuídos deve ser igual a um. O terceiro passo é a Análise de Componentes Principais, de forma que os componentes sejam extraídos levando em consideração a matriz de variância-covariância (diferente do EQMM sem ponderação, na qual os escores são extraídos da matriz de correlação). Os próximos passos consistem no desenvolvimento de modelos quadráticos para os componentes principais e cálculo dos alvos em termos dos componentes. O último passo é aplicar a formulação EQMM ponderado, Equações 12 e 13.

$$\text{Minimizar } EQMM_p = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{\rho_T} [(PC_i^* - T_{PCi}^*)^2 + \lambda_{PCi}^*] \quad (12)$$

$$\text{Sujeito a: } x^T x \leq \alpha^2 \quad (13)$$

Onde, $EQMM_p$ é o Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado, ρ_i é a porcentagem de explicação dos componentes principais, $\rho_T = \sum_{i=1}^n \rho_i$, PC_i^* é o modelo de superfície de resposta desenvolvido para os escores dos componentes principais das respostas ponderadas, T_{PCi}^* é o alvo em termos dos componentes principais das respostas ponderadas, λ_{PCi}^* é o autovalor dos componentes principais das respostas ponderadas.

Nesta etapa a função objetivo passa a ser expressa por meio de um somatório ao invés do produtório descrito pela Equação 9 (GOMES, 2010; CAMPOS *et al.*, 2017). Segundo Gomes e colaboradores (2013) o produtório poderia modificar os pesos dados às respostas e, assim, criar uma constante. Diante disso, os componentes principais utilizados são ponderados considerando as porcentagens de explicação de cada componente.

Para a solução da formulação EQMM e EQMM_p o Algoritmo Genético (GA) pode ser utilizado. Este algoritmo é comumente utilizado em conjunto com Metodologia de Superfície de Resposta para a otimização de processos de fabricação. O GA é um procedimento computacional baseado nos princípios de seleção natural, no qual, assume uma população de soluções e não apenas uma. Por fim, o algoritmo seleciona a solução que melhor satisfaz a função objetivo (CAMPOS *et al.*, 2017).

2.7 Pesquisas relacionadas à soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis

As pesquisas foram realizadas nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, do portal de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) com o objetivo de analisar a forma com que o tema soldagem de revestimento com aços inoxidáveis vem sendo tratado na literatura. Dessa forma, a busca pelos trabalhos foi feita utilizando as expressões “*stainless steel cladding*”, “*stainless steel hardfacing*” e “*stainless steel surfacing*” (“*revestimentos de aços inoxidáveis*”), definidas como palavras-chave ou palavras contidas nos títulos e resumos dos artigos. Além disso, palavras como, *welding*, *cladding*, *overlays*, *coating*, *hardfacing*, *surfacing*, *stainless steel*, *carbon steel*, *optimization*, foram pesquisadas separadamente, a fim de encontrar artigos relacionados ao tema desta pesquisa. Para a seleção dos trabalhos, foram adotados os seguintes critérios:

- Data de publicação igual ou superior a 2013;
- Utilização do aço carbono ou aço de baixa liga (aço estrutural) como metal base;
- Utilização do aço inoxidável como metal de adição.

Assim, foram identificados trinta e seis artigos abordando a soldagem de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. A análise dessas pesquisas foi realizada por meio de palavras-chave, definidas com base no método de soldagem e de otimização empregado, assim como, nos materiais e respostas analisadas, conforme Tabela 1.

Tabela 1- Palavras-chave utilizadas para classificação dos trabalhos.

Abreviação	Palavras-chave
P1	FCAW
P2	ABNT 316L
P3	ABNT 1020
P4	Otimização
P5	EQMM
P6	Geometria do cordão de solda (penetração, reforço e largura)
P7	Diluição
P8	Microestrutura
P9	Dureza
P10	Ensaio de corrosão por pite
P11	Ensaio de Sensitização

Fonte: Autor.

Os trabalhos foram classificados, conforme Tabela 2. Pode ser observado que o processo de soldagem com arame tubular foi utilizado em onze publicações (cerca de 30%), indicando que outros processos de soldagem podem ser utilizados para as operações de revestimento de aços carbono com aços inoxidáveis. Observa-se que boa parte dos trabalhos utilizaram alguma técnica de otimização (cerca de 47%). Apenas uma publicação utilizou o Erro Quadrático Médio Multivariado para a otimização do processo de soldagem de revestimento.

Quanto às respostas analisadas, a microestrutura e dureza caracterizam como as principais respostas, estando presente em vinte e três e quatorze publicações, respectivamente. Nota-se que cerca de 19% das publicações realizaram ensaios para avaliar a resistência à corrosão por pite e que 8% avaliaram a corrosão intergranular. Observa-se também que os autores que trabalharam com arame tubular não realizaram testes para avaliar a resistência à corrosão intergranular (sensitização). Todos os trabalhos nos quais utilizaram o processo FCAW avaliaram os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre as características geométricas do cordão e/ou diluição. Dentre as publicações nas quais foram utilizadas técnicas de otimização, em apenas uma publicação realizou-se ensaio de corrosão. Em relação aos trabalhos, não foi observada a realização de ensaios de corrosão por pite e de sensitização, simultaneamente.

A análise das publicações mostrou o interesse dos pesquisadores em compreender como os parâmetros de soldagem influenciam as propriedades dos revestimentos. No entanto, a otimização da resistência a corrosão por pite e corrosão intergranular não foi muito discutida nos trabalhos. Tais considerações comprovam a importância da presente pesquisa.

Tabela 2– Classificação dos trabalhos quanto as palavras-chave.

Referência	P1	P2	P3	P4	P5	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Gomes <i>et al.</i> (2013)	*	*	*	*	*	*	*				
Senthilkumar e Kannan (2013)	*			*		*	*				
Sreeraj <i>et al.</i> (2013)				*		*	*				
Yoganandh <i>et al.</i> (2013)				*		*	*				
Chakrabarti <i>et al.</i> (2013)								*	*	*	
Xue <i>et al.</i> (2013)		*						*		*	
Tiyasri e Poopat (2013)		*						*	*		*
Eghlimi <i>et al.</i> (2014)								*		*	
Balan <i>et al.</i> (2014)	*			*		*					
Eghlimi <i>et al.</i> (2014)				*			*	*			
Prabhu e Alwarsamy (2014)				*		*					
Huang <i>et al.</i> (2014)								*			
Varavallo <i>et al.</i> (2014)								*	*		
Senthilkumar e Kannan (2015)	*			*		*		*			
Senthilkumar <i>et al.</i> (2015)	*			*		*					
Senthilkumar <i>et al.</i> (2016)	*			*		*	*				
Dhib <i>et al.</i> (2016)		*						*	*		
Bao <i>et al.</i> (2016)								*			*
Besliu <i>et al.</i> (2017)	*						*	*			
Prabhu e Alwarsamy (2017)				*				*			
Sowrirajan <i>et al.</i> (2017)	*	*		*		*					
Filho e Gonzalez (2017)			*	*		*	*				
Jorge <i>et al.</i> (2017)							*	*	*		
Nazemi <i>et al.</i> (2017)									*		
Wang <i>et al.</i> (2017)								*	*	*	
Chen <i>et al.</i> (2017)								*	*		
Dhib <i>et al.</i> (2017)		*						*	*		
Liu <i>et al.</i> (2017)								*	*		
Nixon <i>et al.</i> (2018)				*		*		*			
Sowrirajan <i>et al.</i> (2018)	*	*		*			*				
Wang <i>et al.</i> (2018)								*	*	*	
Argade <i>et al.</i> (2018)		*						*	*	*	
Switzner <i>et al.</i> (2018)								*	*		
Cao <i>et al.</i> (2018)								*	*		*
Balan <i>et al.</i> (2018)	*			*		*	*	*		*	
Sowrirajan <i>et al.</i> (2018)	*	*		*		*					
Ocorrência	11	9	2	17	1	14	11	23	14	7	3
Palavras-chave	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11

*P1- FCAW; P2- ABNT 316L; P3- AISI 1020; P4- Otimização; P5 EQMM; P6- Geometria do cordão de solda; P7- Diluição; P8- Microestrutura; P9- Dureza; P10- Ensaio de corrosão por pite; P11- Ensaio de Sensitização.

Fonte: Autor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O metal base utilizado foi o aço carbono ABNT 1020, cortado em chapas de dimensões 120 x 60 x 6,35 mm. Para o metal de adição, foi empregado o arame tubular de aço inoxidável austenítico ABNT 316L (E316LT1-1/4), com 1,2 mm de diâmetro. A Tabela 3 apresenta a composição química dos aços comerciais utilizados. As amostras foram gentilmente cedidas pelo Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes, da UNIFEI, e recebidas na condição revestida.

Tabela 3- Composição química (% mássica) do metal base e metal de adição.

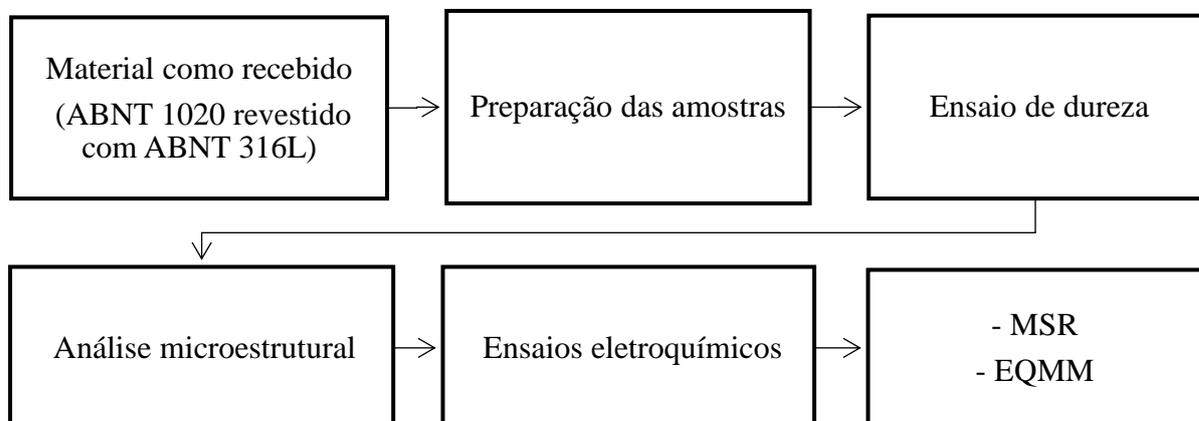
Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
E316LT1-1/4	0,03	1,58	-	-	1,00	12,4	18,5	2,46
ABNT 1020	0,18/0,23	0,30/0,60	0,04	0,05	-	-	-	-

Fonte: (GOMES, 2010).

3.2 Métodos

Os procedimentos experimentais foram realizados conforme Figura 13, onde mostra em ordem cronológica todas as etapas do processo, desde o recebimento das amostras até a obtenção e análise das respostas de interesse. A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) foi utilizada para a coleta dos dados, modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros. Por fim, foi empregado o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) para obter a combinação ótima dos parâmetros que permitam a melhoria do processo de soldagem de revestimento. Todos os ensaios foram realizados na UNIFEI Itabira.

Figura 13- Fluxograma detalhando os procedimentos realizados no trabalho. MSR– Metodologia de Superfície de Resposta; EQMM– Erro Quadrático Médio Multivariado.



Fonte: Autor.

3.2.1 Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho

A definição dos parâmetros e a execução da soldagem de revestimento foram realizadas por Gomes (2010). Os parâmetros analisados foram velocidade de alimentação do arame (V_a), tensão (T), velocidade de soldagem (V_s) e distância bico de contato peça (N), conforme Tabela 4. Como gás de proteção, foi utilizado o C₂₅ (mistura de 75% Ar + 25% CO₂) a uma vazão de 16 L.min⁻¹. O ângulo da tocha foi fixado em 15° na posição "empurrando".

Tabela 4- Parâmetros variáveis e níveis de trabalho do processo de soldagem.

Parâmetros	Unidade	Notação	Níveis de Trabalho				
			-2	-1	0	+1	+2
Velocidade de alimentação do arame	m/mm	V _a	5,5	7,0	8,5	10,0	11,5
Tensão	V	T	24,5	27,0	29,5	32,0	34,5
Velocidade de soldagem	cm/min	V _s	20	30	40	50	60
Distância bico de contato peça	Mm	N	10	15	20	25	30

Fonte: (GOMES, 2010).

3.2.2 Matriz experimental

A matriz experimental foi definida com base no arranjo composto central (CCD), contendo quatro parâmetros (k) em dois níveis ($2^k = 2^4 = 16$), oito pontos axiais ($2k = 8$) e sete pontos centrais, totalizando 31 experimentos. O valor adotado para α foi 2,0.

3.2.3 Execução dos experimentos

Os equipamentos utilizados para soldagem foram uma fonte ESAB AristoPower 460, um módulo AristoFeed 30-4W MA6 para a alimentação do arame e um banco de testes com dispositivo para controle da velocidade de soldagem e ajuste da tocha em relação ao metal base. A execução dos experimentos foi realizada por meio da deposição de um cordão de aço inoxidável sobre os corpos de prova de aço carbono, levando em consideração os parâmetros definidos na etapa de planejamento. A execução dos experimentos foi realizada no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

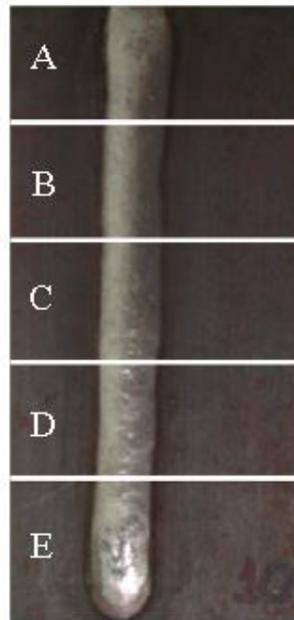
3.2.4 Preparação das amostras

Os corpos de prova foram previamente seccionados cinco partes (A, B, C, D e E), conforme Figura 14. Apenas a seção B foi utilizada no presente trabalho, e a mesma foi dividida em duas partes. O corte desta seção foi realizado utilizando uma cortadeira automática, marca Pantec, modelo PANCUT 40.

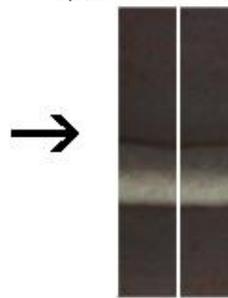
O processo de embutimento foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu em embutir uma parte da seção B com resina fenólica (Baquelite), utilizando uma embutidora Pantec, modelo Panpress 30, Figura 15(a). Na segunda etapa, Figura 15(b), as amostras foram embutidas em resina epóxi (moldadas em tubos de policloreto de vinila- PVC) e soldadas à fios de cobre para a realização dos ensaios eletroquímicos. As amostras embutidas em baquelite foram utilizadas na análise microestrutural e no ensaio de dureza.

Figura 14- Corte dos corpos de prova.

1) Corte dos corpos de prova

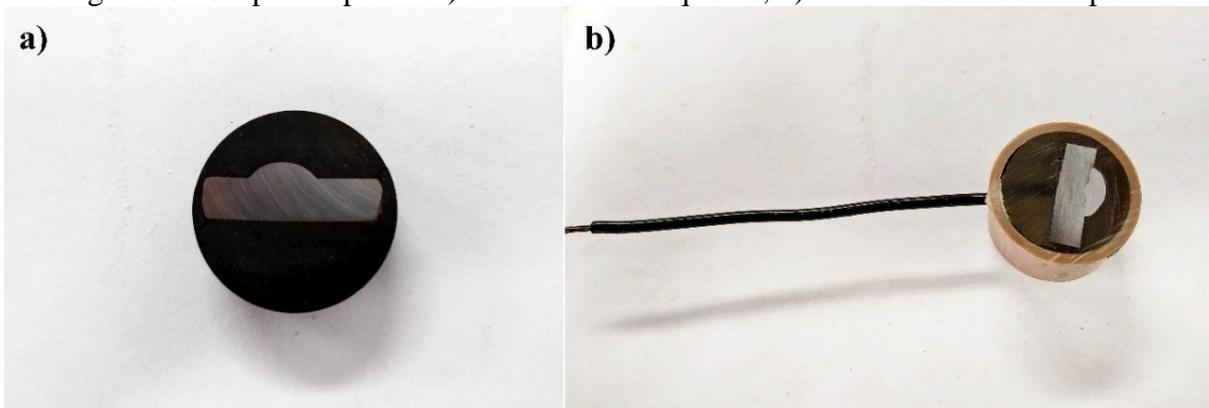


2) Corte da seção B



Fonte: Autor.

Figura 15- Corpos de prova: a) embutido em baquelite; b) embutido em resina epóxi.

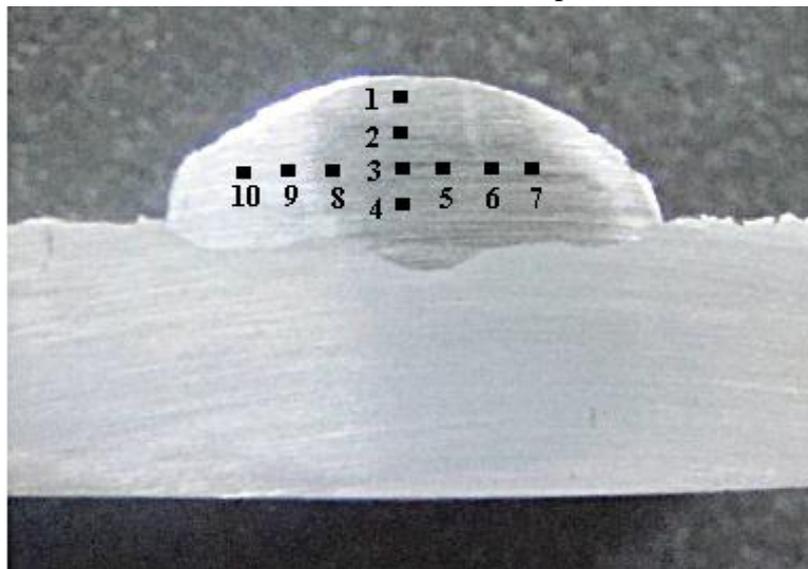


Fonte: Autor.

3.2.5 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza Vickers (HV) foi realizado utilizando um microdurômetro TIME, modelo TH710, aplicando uma carga de 300 gf. As amostras foram lixadas até a lixa de granulometria 1200. As indentações foram realizadas em intervalos de 0,5 mm entre si, totalizando dez medições em cada revestimento, conforme Figura 16. Os números no cordão de solda mostram a região onde os ensaios foram realizados.

Figura 16- Cordão de solda com números de 1 a 10 representando o ensaio de dureza.



Fonte: Autor.

3.2.6 Análise microestrutural

Para a análise microestrutural as amostras foram lixadas, com lixas d'água de granulometrias de 320, 400, 600 e 1200, e polidas em suspensão de alumina de granulometria de 1 μ m. A análise microestrutural foi realizada conforme Prática A, norma ASTM A262-13. O ataque eletrolítico foi realizado em solução de ácido oxálico 10%p. H₂C₂O₄ (10 g em 90 mL de água destilada) com densidade de corrente de 1 A.cm⁻² durante aproximadamente 90 s. As amostras também foram submetidas a um ataque químico com a solução Kalling n.2 (5g CuCl₂ + 100 mL HCl + 100 mL álcool etílico). As micrografias foram obtidas utilizando um microscópio óptico (marca Opton) e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (marca Tescan e modelo Vega 3).

3.2.7 Ensaios eletroquímicos

Os ensaios foram realizados utilizando um potenciostato EmStat, marca PalmSens e uma célula eletroquímica contendo três eletrodos: eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS), contra-eletrodo de platina e o eletrodo de trabalho (corpo de prova). Todas as amostras foram previamente lixadas até a lixa de granulometria 600 e em seguida, imersa em seus respectivos eletrólitos (em temperatura ambiente). Apenas os revestimentos (cordão de solda) foram expostos aos ensaios eletroquímicos, o aço carbono foi coberto por uma camada de tinta. Para cada condição realizou-se os ensaios no mínimo três vezes, de modo a garantir a confiabilidade dos resultados.

3.2.7.1 Polarização anódica potenciodinâmica

A polarização anódica foi realizada a uma taxa de 0,3 mV/s, a partir do potencial de -600 mV até atingir 400 mV ou 10 mA/cm². O eletrólito utilizado foi a solução aquosa de 3,5% NaCl (em massa por volume), onde as amostras foram previamente imersas por 50 min para estabilização do potencial de corrosão (*Open Circuit Potential*- OCP).

3.2.7.2 Reativação eletroquímica potenciodinâmica de ciclo duplo (DL-EPR)

O ensaio DL-EPR foi realizado conforme norma ASTM G108 – 94. Assim, foi utilizado como eletrólito a solução de 0,5 M H₂SO₄ + 0,01 M KSCN e tempo de imersão de 5 min. A varredura foi realizada a uma taxa de 1,67 mV/s, a partir do potencial -600 mV até 200 mV. Em seguida, o potencial foi diminuído até o potencial inicial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Microestrutural

O diagrama Schaeffler foi utilizado para estimar a microestrutura resultante do processo de soldagem de revestimento, conforme Figura 17. O ponto que separa a fase ferrítica da fase martensítica foi chamado de referência (*D26%*). Nota-se que o aumento da diluição, para valores superiores a 26%, faz com que a microestrutura resultante seja composta por austenita e martensita. Para menores percentuais de diluição era esperada a presença de até 10% de ferrita. Vale destacar que o diagrama de Schaeffler foi utilizado apenas como orientação, uma vez que, a microestrutura formada pode variar conforme a taxa de resfriamento da solda.

A Tabela 5 apresenta a composição química e os valores de Ni_{eq} e Cr_{eq} do arame tubular de aço inoxidável ABNT 316L, do aço carbono ABNT 1020 e do metal de solda, para três níveis de diluição. A composição química dos revestimentos foi calculada por meio da Equação 14 para cada elemento químico individualmente (MARQUES; MODENESI, 2014).

$$X_{MS} = X_{MB}D + X_{MA}(1 - D) \quad (14)$$

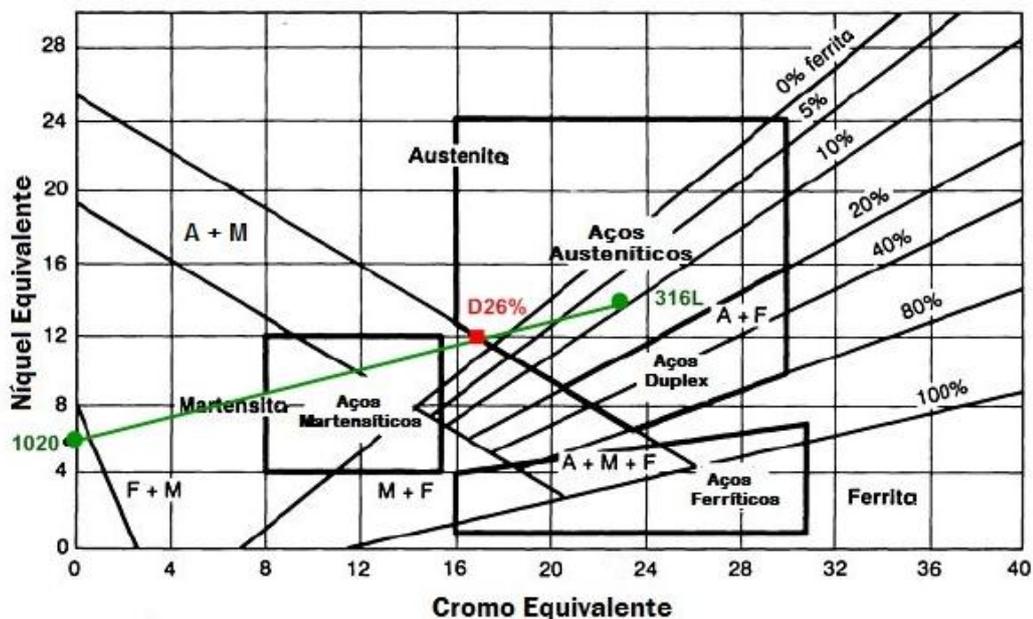
Onde: X_{MS} é a teor percentual do elemento X no metal de solda;

X_{MB} é a teor percentual do elemento X no metal de base;

X_{MA} é a teor percentual do elemento X no metal de adição;

D é o valor da diluição do processo.

Figura 17- Diagrama Schaeffler mostrando os pontos correspondentes ao aço carbono 1020, arame tubular de aço inoxidável ABNT 316L e ao metal de solda com 26 % de diluição.



Fonte: Autor.

Tabela 5- Composição química média e equivalentes de cromo e níquel para os aços 1020 e arame tubular 316L e para o revestimento com diferentes níveis de diluição.

Material	D%	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	Ni _{eq}	Cr _{eq}
E316LT1-1/4	-	0,03	1,58	18,5	12,4	2,46	1,00	14,1	22,5
ABNT 1020	-	0,20	0,45	-	-	-	-	6,3	0
Amostra 21	18,58	0,06	1,37	15,1	10,1	2,00	0,81	12,6	18,3
D26%	26,00	0,07	1,29	13,7	9,18	1,82	0,74	12,0	16,6
Amostra 5	36,22	0,09	1,17	11,8	7,91	1,57	0,64	11,2	14,3

*D% - Percentual de diluição; D26% - Ponto de referência.

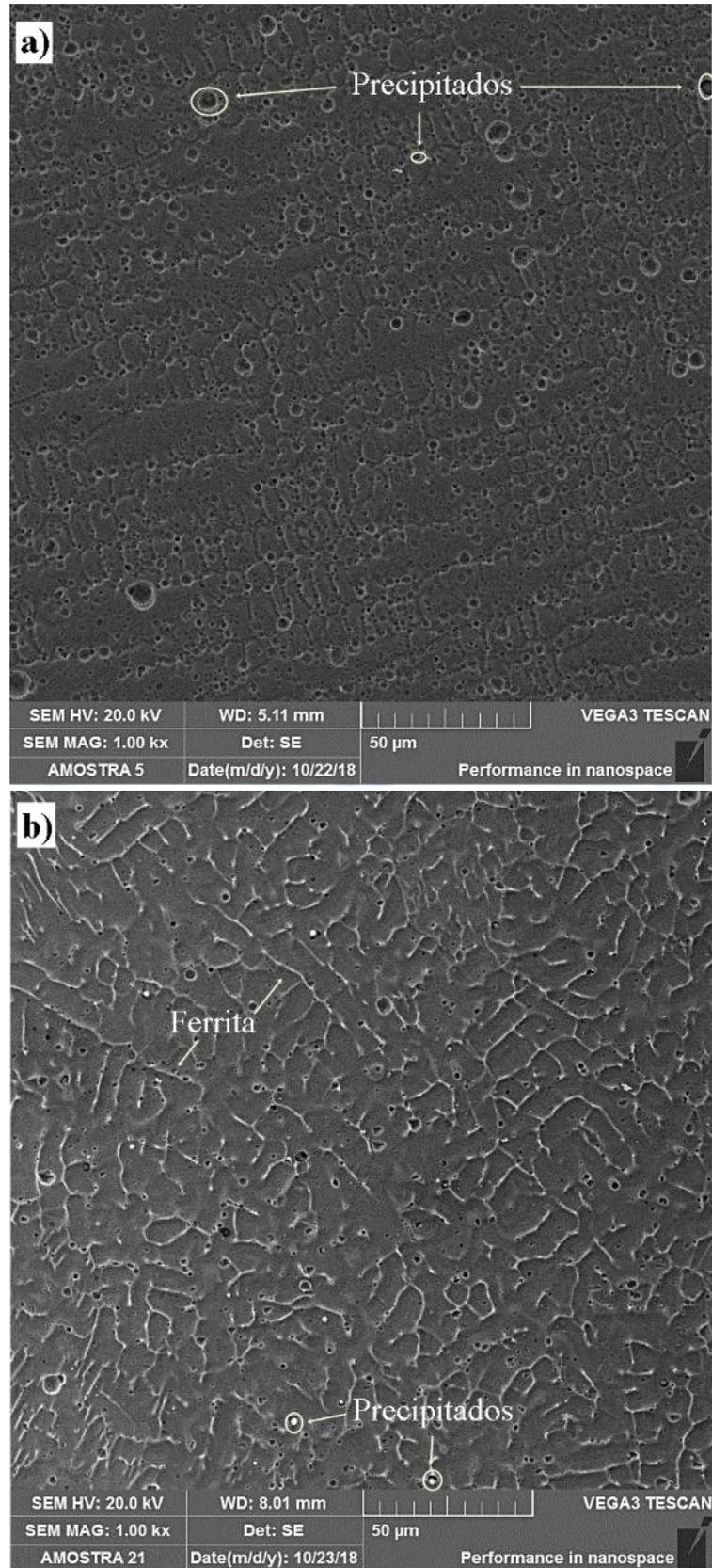
Fonte: Autor.

Considerando o grande número de testes realizados, trinta e um, optou-se por trabalhar com as amostras 5 e 21. A amostra 5 apresentou alto nível de diluição, cerca de duas vezes maior do que a da amostra 21, o que facilitou a análise e a comparação entre as microestruturas dos revestimentos, conforme Figura 18. Observa-se a presença de buracos deixados pelo desprendimento de precipitados em ambos corpos de prova. No entanto, com a redução dos níveis de diluição, de 36,22% (Fig.18 (a)) para 18,58% (Fig.18 (b)), nota-se que a quantidade de buracos diminuiu de forma significativa. Como pode ser observado na Tabela 5, o aumento da diluição faz com que o teor de carbono no revestimento aumente. A solubilidade deste elemento na austenita diminui rapidamente com a redução da temperatura, levando à precipitação de carbonetos do tipo $M_{23}C_6$. Assim, quanto maior a diluição maior a quantidade de precipitados. Vale destacar que a diluição foi calculada por Gomes (2010) (Anexo I).

Observa-se ainda que a amostra 21 apresentou dendritas de ferrita delta (δ) em sua microestrutura. Tal comportamento era esperado conforme diagrama de Schaeffler, Figura 17. O arame tubular de aço inoxidável ABNT 316L possui modo de solidificação ferriticoaustenítica ($Cr_{Eq}/Ni_{Eq} = 1,6$). Durante o resfriamento, a ferrita delta primária solidifica na zona de fusão e então ocorre a transformação em austenita. Porém, como este processo é controlado por difusão, o resfriamento rápido não oferece tempo suficiente para concluir a transformação de fase, resultando em ferrita δ retida.

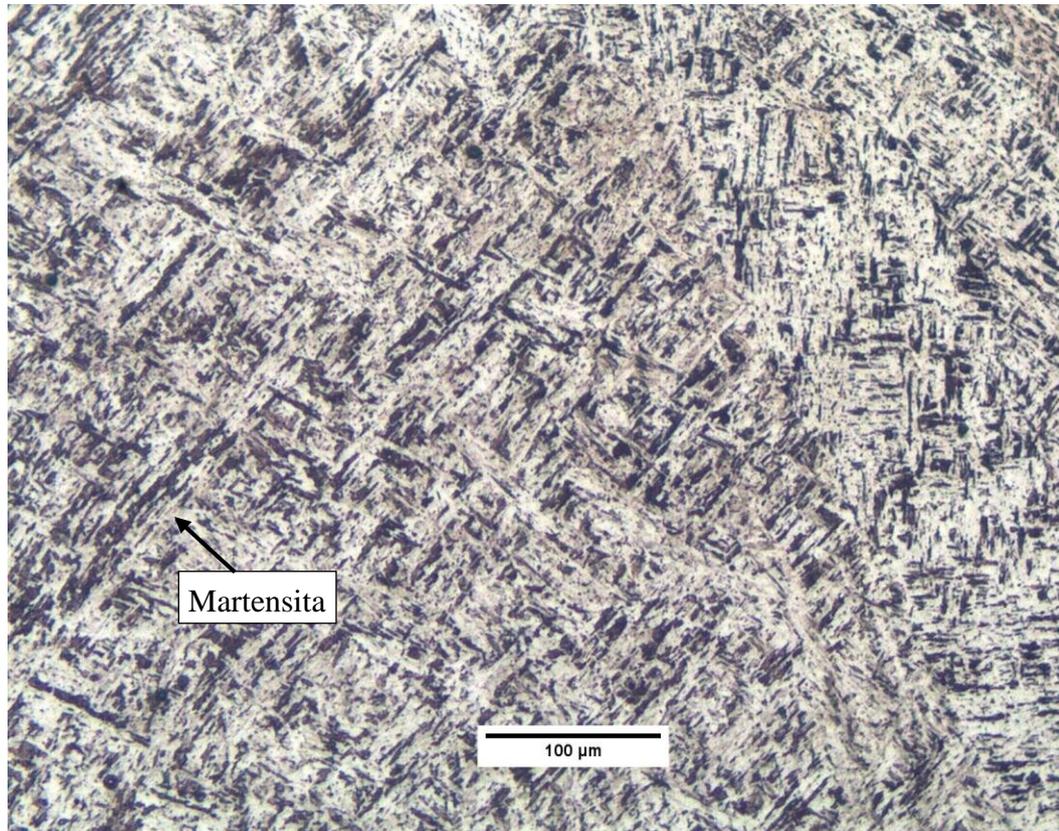
Com relação à amostra 5, o ataque eletrolítico não foi eficiente para revelar a microestrutura martensítica. Por essa razão, optou-se por utilizar o reagente Kalling n.2, conforme Figura 19. Nota-se a presença de martensita (região escura) dispersa na matriz austenítica. Tal comportamento era esperado, uma vez que, o valor de diluição desta amostra foi muito superior aos 26% previstos anteriormente. A grande quantidade de carbono presente no revestimento em conjunto com a alta taxa de extração de calor promoveram a distorção da estrutura austenítica, dando origem à martensita. Comparando as amostras 5 e 21, observou-se que a dureza do revestimento passou de 153,9 HV (amostra 21) para 316,2 HV (amostra 5). De modo geral, a formação de carbonetos e de martensita elevou a dureza para valores superiores a 300 HV.

Figura 18- Micrografias dos revestimentos obtidas por MEV com o uso de ataque eletrolítico com ácido oxálico: a) amostra 5; b) amostra 21.



Fonte: Autor.

Figura 19- Micrografia do revestimento obtida por microscopia ótica com a solução Kalling n.2 para a amostra 5.



Fonte: Autor.

4.2 Ensaio eletroquímico

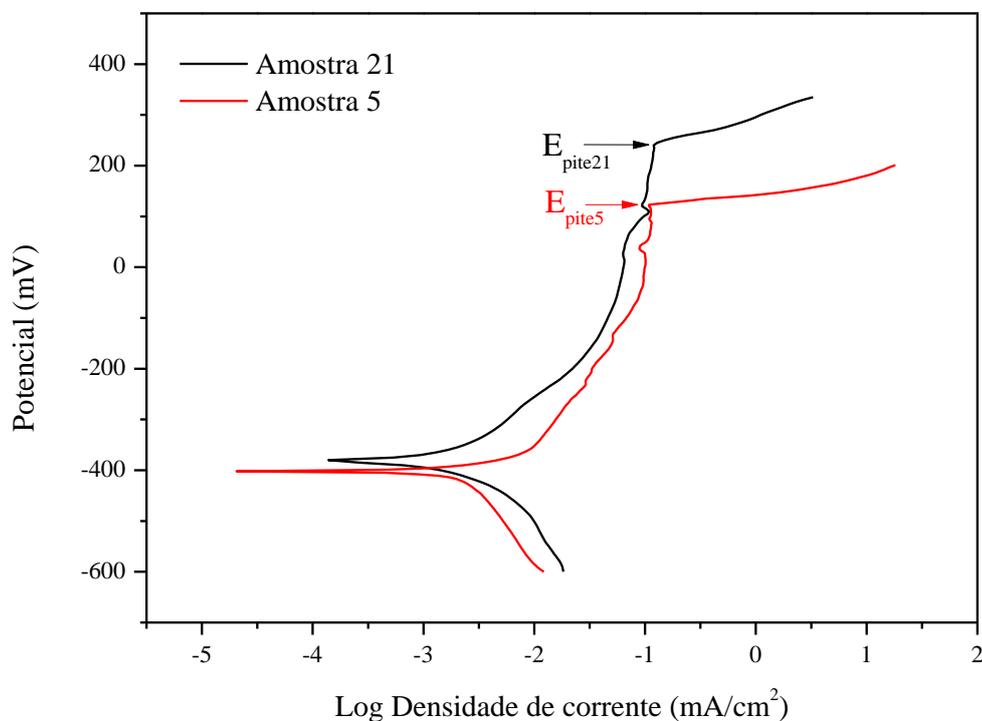
As curvas obtidas pelos ensaios eletroquímicos, polarização anódica e DL-EPR, possibilitaram a avaliação dos efeitos da diluição e da microestrutura sobre a resistência à corrosão dos revestimentos, conforme as Figuras 20 e 21. Para efeito de comparação foram escolhidas duas amostras com diferentes níveis de diluição, amostras 5 e 21, seguindo o mesmo critério da análise microestrutural. Vale destacar que as curvas obtidas para as demais amostras apresentaram comportamento semelhante ao das amostras analisadas (Apêndice D).

Observa-se por meio das curvas de polarização anódica (Figura 20) que a amostra 5 apresentou menor potencial de pite, E_{pite} , e maior densidade de corrente de passivação do que a amostra 21. A presença de carbonetos, principalmente do tipo $Cr_{23}C_6$, reduz de forma acentuada o teor de cromo da matriz austenítica, provocando a quebra da camada passiva em potenciais mais baixos. Além disso, a martensita causa instabilidade do filme, tornando-se ponto de iniciação de pites.

O potencial de pite para o aço inoxidável ABNT 316L (sem diluição) em solução de 3,5%p. NaCl pode variar entre 300 e 450 mV (PALANI; MURUGAN, 2008; ZHU *et al.*, 2017). Observa-se que E_{pite21} foi de aproximadamente $275 \text{ mV} \pm 7,64$. Os precipitados e a ferrita delta presentes no revestimento provocaram segregação de cromo, reduzindo a resistência à corrosão por pite.

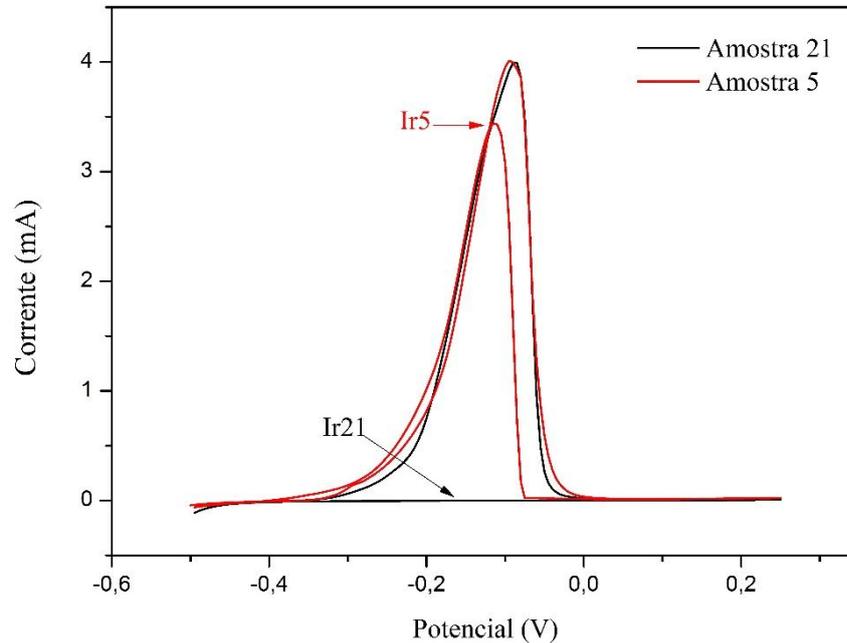
A partir das curvas obtidas pelo ensaio DL-EPR, Figura 21, observa-se um aumento da corrente de reativação para a amostra 5 ($Ir5$). Tal comportamento era esperado, uma vez que, o alto percentual de diluição resultou na formação de uma grande quantidade de precipitados, conforme indicado na Figura 18 (a). O aumento da corrente foi provocado pelo rompimento da camada passiva nas regiões empobrecidas em cromo durante a varredura de reativação. Observa-se ainda que a corrente de reativação para a amostra 21 ($Ir21$) aproximou-se de zero. Porém, houve sensitização do revestimento ($GS = 0,002 \pm 0,001$). O mesmo foi observado na Figura 18 (b), onde verificou-se a presença de alguns precipitados. Por fim, nota-se que quanto maior Ir maior o grau de sensitização.

Figura 20- Curvas de polarização anódica do revestimento em solução de 3,5%p. NaCl para as amostras 5 e 21. O potencial de pite, E_{pite} , está indicado para cada amostra.



Fonte: Autor.

Figura 21- Curvas obtidas pelo ensaio DL-EPR em solução de 0,5 M H₂SO₄ + 0,01 M KSCN para os revestimentos das amostras 5 e 21. Ir – corrente de reativação.



Fonte: Autor.

4.3 Modelagem matemática das respostas

Após a medição de todas as respostas de interesse, dureza Vickers (Apêndice A), potencial de pite (Apêndice B) e grau de sensitização (Apêndice C), estas foram reunidas para compor a matriz experimental, conforme Tabela 6. O potencial de pite do teste 27 foi caracterizado como *outlier* e removido do estudo. A presença do mesmo poderia influenciar de maneira negativa a modelagem matemática de E_{pite} . Uma vez que, o valor do potencial de pite médio para a amostra 27 foi muito inferior ao obtido para as amostras revestidas nas mesmas condições. O modelo de superfície de resposta de segunda ordem foi utilizado para representar a relação aproximada entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo de soldagem, conforme Equação 15.

$$y = \beta + \beta_1 Va + \beta_2 T + \beta_3 Vs + \beta_4 N + \beta_{11} Va^2 + \beta_{22} T^2 + \beta_{33} Vs^2 + \beta_{44} N^2 + \beta_{12} VaT + \beta_{13} VaVs + \beta_{14} VaN + \beta_{23} TVs + \beta_{24} TN + \beta_{34} VsN \quad (15)$$

Onde: y – Resposta de interesse;

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4$ e $i < j$);

Va – Velocidade de alimentação do arame;

T – Tensão;

Vs – Velocidade de soldagem;

N – Distância bico de contato peça.

Tabela 6– Matriz experimental.

Teste	Parâmetros				Respostas		
	Va	T	Vs	N	HV	GS	E _{pite} (mV)
1	-1	-1	-1	-1	160,9	0,138	193
2	1	-1	-1	-1	172,8	0,094	165
3	-1	1	-1	-1	242,7	0,383	160
4	1	1	-1	-1	319,4	0,698	180
5	-1	-1	1	-1	316,2	0,876	145
6	1	-1	1	-1	329,6	0,491	136
7	-1	1	1	-1	339,6	0,870	155
8	1	1	1	-1	336,8	0,891	126
9	-1	-1	-1	1	174,7	0,005	255
10	1	-1	-1	1	153,6	0,002	266
11	-1	1	-1	1	151,6	0,052	204
12	1	1	-1	1	165,1	0,005	242
13	-1	-1	1	1	178,5	0,095	177
14	1	-1	1	1	175,7	0,004	259
15	-1	1	1	1	254,1	0,518	155
16	1	1	1	1	223,4	0,169	165
17	-2	0	0	0	264,3	0,318	218
18	2	0	0	0	205,3	0,118	190
19	0	-2	0	0	164,5	0,081	221
20	0	2	0	0	307,3	0,876	144
21	0	0	-2	0	153,9	0,002	275
22	0	0	2	0	306,6	0,689	128
23	0	0	0	-2	346,9	0,893	138
24	0	0	0	2	171,9	0,001	260
25	0	0	0	0	242,9	0,369	223
26	0	0	0	0	278,2	0,375	226
27	0	0	0	0	243,5	0,287	*
28	0	0	0	0	268,3	0,236	238
29	0	0	0	0	186,6	0,185	249
30	0	0	0	0	184,1	0,173	219
31	0	0	0	0	176,7	0,180	228

Fonte: Autor.

Os coeficientes do modelo foram estimados utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS), por meio do *software* estatístico MINITAB®. A Tabela 7 apresenta os coeficientes para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para a dureza (HV), grau de sensitização (GS) e potencial de pite (E_{pite}).

Tabela 7- Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos.

Coeficiente	Respostas		
	HV	GS	E _{pite}
<i>Constante</i>	225,76	0,2579	230,50
<i>V_a</i>	-2,4960	-0,0409	1,625
<i>T</i>	27,346	0,1446	-15,125
<i>V_s</i>	38,271	0,1629	-26,708
<i>N</i>	-45,471	-0,2239	29,458
<i>V_a²</i>	0,7330	-0,0169	-8,344
<i>T²</i>	1,0080	0,0482	-13,719
<i>V_s²</i>	-0,4050	0,0149	-8,969
<i>N²</i>	6,8830	0,0403	-9,594
<i>V_aT</i>	3,4560	0,0289	-1,063
<i>V_aV_s</i>	-6,4940	-0,0641	0,813
<i>V_aN</i>	-8,7690	-0,0248	11,687
<i>TV_s</i>	-3,9310	0,0052	-1,437
<i>TN</i>	-9,2060	-0,0378	-10,813
<i>V_sN</i>	-14,981	-0,0683	-4,688

*Coeficientes em negrito indicam os termos significativos.

Fonte: Autor.

4.4 Adequação e ajuste dos modelos

A adequação dos modelos foi verificada por meio da Análise de Variância (ANOVA), realizada pelo *software* MINITAB®. Os resultados desta análise mostraram que todos os modelos desenvolvidos eram adequados, pois apresentaram *P-values* inferiores a 5% de significância, conforme Tabela 8. Observa-se que nenhum dos modelos apresentaram falta de ajuste (*Lack-of-fit* < 0,05). Os resultados da ANOVA indicaram que os modelos desenvolvidos para o grau de sensitização e potencial de pite apresentaram bons ajustes, uma vez que, os valores de $R^2(adj.)$ foram superiores a 80%. Para a dureza, o ajuste obtido foi de 68,56%, o que é considerado um ajuste não muito bom, porém aceitável. No entanto, estes dados puderam ser melhorados por meio do procedimento de redução dos modelos, conforme Tabela 9. O critério adotado para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do valor de $R^2(adj.)$ e a redução da variância *S* dos modelos.

Tabela 8- Análise de Variância. Repr. – Regressão, Res. – Residual.

Resposta	Grau de liberdade		Soma dos quadrados		Quadrados médios		F	P	Lack-of-fit	R ² (adj.)
	Regr.	Res.	Regr.	Res.	Regr.	Res.				
HV	14	16	111558	22473	7968,4	1405	5,67	0,001	0,744	68,56%
GS	14	16	2,6937	0,0459	0,1924	0,0076	13,11	0,000	0,141	85,00%
E_{pite}	14	15	56458,6	613,5	4032,8	122,7	9,78	0,000	0,054	80,90%

*Valores tabulados de *F*: $F_{95\%}(14, 16) = 2,37$; $F_{95\%}(14, 15) = 2,42$.

Fonte: Autor.

Tabela 9- Comparação entre os ajustes dos modelos completos (MC) e reduzidos (MR).

Resposta	R ² (adj.) (%)		S	
	MC	MR	MC	MR
HV	68,56	75,95	37,478	32,778
GS	85,00	86,61	0,1211	0,114
E _{pite}	80,90	83,93	20,31	18,633

Fonte: Autor.

Os modelos reduzidos se caracterizaram como expressões de maior confiabilidade, já que todos os modelos apresentaram melhores ajustes. A dureza apresentou $R^2(adj.)$ igual a 75,95%, ajuste considerado como satisfatório. Os modelos finais apresentaram novos valores de coeficientes, conforme as Equações 16 – 18.

$$GS = 0,256 - 0,041 Va + 0,144 T + 0,163 Vs - 0,224 N + 0,048 T^2 + 0,040 N^2 + 0,029 VaT - 0,064 VaVs - 0,037 TN - 0,068 VsN \quad (16)$$

$$HV = 226,882 - 2,496 Va + 27,346 T + 38,271 Vs - 45,471 N + 6,765 N^2 - 8,769 VaN - 9,206 TN - 14,981 VsN \quad (17)$$

$$E_{pite} = 230,5 + 1,625 Va - 15,125 T - 26,708 Vs + 29,458 N - 8,344 Va^2 - 13,719 T^2 - 8,969 Vs^2 - 9,594 N^2 + 11,688 VaN - 10,812 TN - 4,688 VsN \quad (18)$$

4.5 Análise dos efeitos principais dos parâmetros

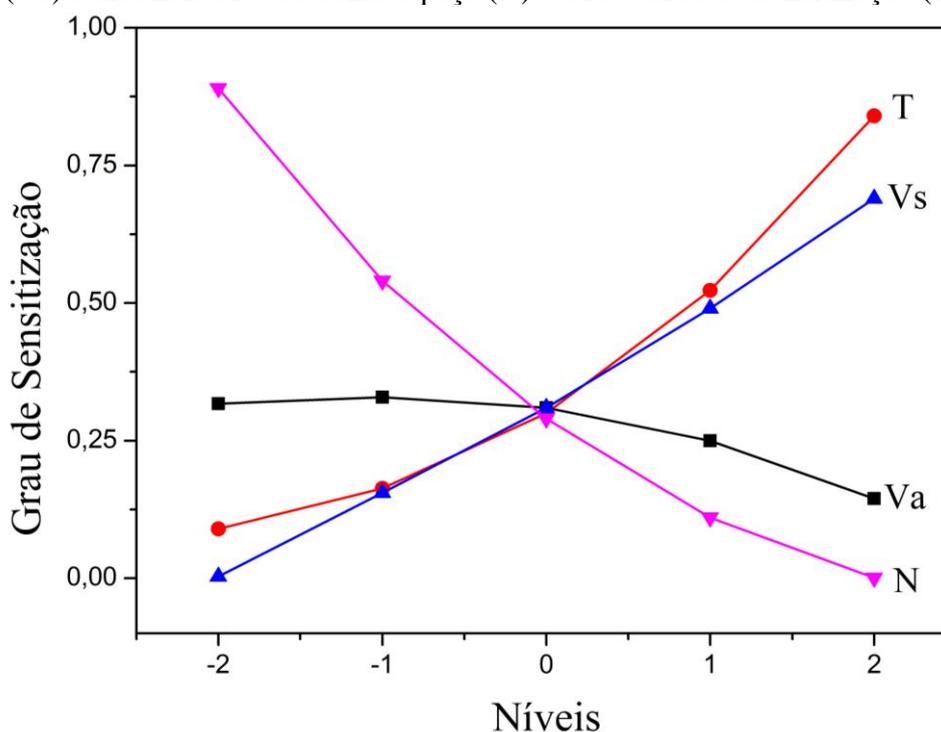
A partir dos modelos desenvolvidos foi possível analisar os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a dureza, grau de sensitização e potencial de pite dos revestimentos de aço inoxidável ABNT 316L. Os efeitos principais foram discutidos nos Itens 4.5.1- 4.5.3.

4.5.1 Efeitos principais sobre o Grau de sensitização

Os efeitos principais para o grau de sensitização em função da tensão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação e distância bico de contato peça estão representados na Figura 22. Observa-se que o aumento da tensão (T) e velocidade de soldagem (Vs) fez com que o grau de sensitização aumentasse. O aumento da tensão provoca aumento da energia de soldagem e conseqüentemente resultou em maior diluição. Além disso, quanto maior a entrada de calor maior é a difusão de elementos de liga e a formação de carbonetos de cromo. Quanto à velocidade de soldagem, menores velocidades fizeram com que maiores quantidades de material fossem depositadas por unidade de tempo, resultando em maiores dimensões do cordão de solda e menor percentual de diluição.

A velocidade de alimentação (V_a) se mostrou como um parâmetro pouco significativo para esta resposta. As alterações nos níveis de V_a não resultaram em mudanças significativas em termos do grau de sensitização. Para a distância bico de contato peça (N), nota-se que o grau de sensitização do revestimento diminuiu conforme a distância foi aumentada. Maiores distâncias causam aumento do comprimento e o efeito Joule do arco elétrico, gerando uma queda de calor na poça de fusão. Assim, o metal fundido não tem energia suficiente para penetrar no metal base e acaba se acumulando sobre a superfície do mesmo, resultando em menores percentuais de diluição. A redução da energia de soldagem faz com que a velocidade de resfriamento aumente, assim, há menos tempo para a precipitação de carbonetos (processo difusional).

Figura 22- Efeitos da tensão (T), velocidade de soldagem (V_s), velocidade de alimentação (V_a) e distância bico de contato peça (N) sobre o Grau de Sensitização (GS).



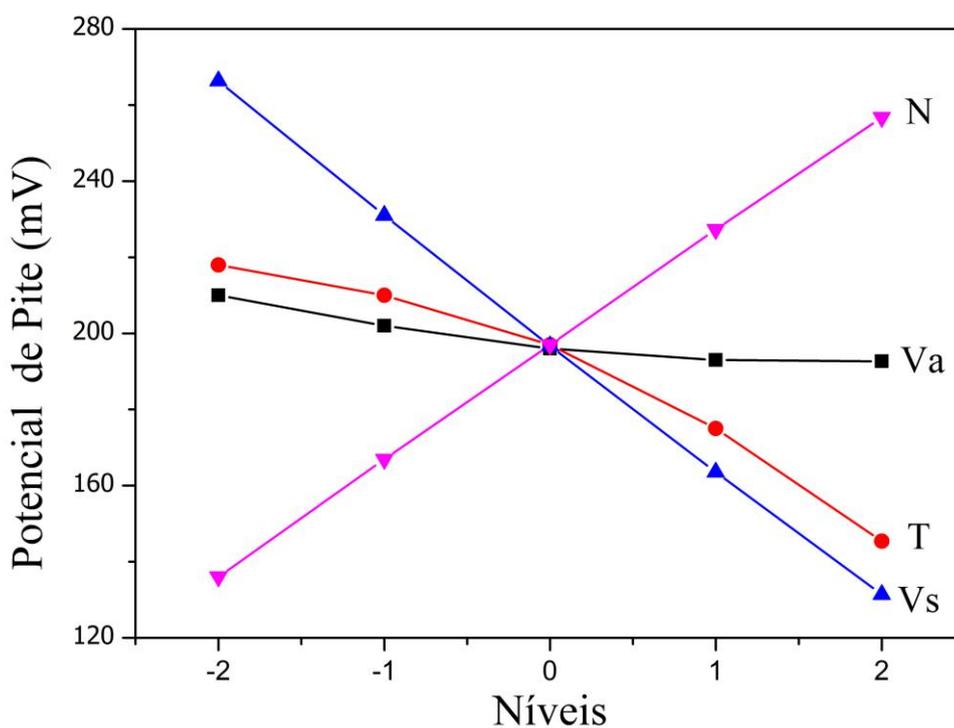
Fonte: Autor.

4.5.2 Efeitos principais sobre o Potencial de Pite

Os efeitos dos parâmetros de soldagem com arame tubular sobre o potencial de pite são mostrados na Figura 23. Observa-se que a diminuição da velocidade de soldagem e da tensão resultou na formação de revestimentos mais resistente à corrosão. Por outro lado, menores distâncias causaram redução do potencial. A velocidade de alimentação não apresentou efeito significativo sobre esta resposta. A explicação para os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre o potencial de pite é a mesma que foi abordada para o grau de sensitização. A utilização de altas tensões e menores distâncias bico de contato peça resulta em um aumento da energia de

soldagem. Assim, a entrada de calor para a poça de fusão e a diluição também aumentam. Estes fatores potencializam a formação de precipitados, pois favorecem a difusão de elementos entre o aço carbono e o aço inoxidável. Para a velocidade de soldagem, nota-se que o fator determinante foi o nível de diluição. Menores percentuais de diluição foram obtidos empregando-se baixas velocidades de soldagem.

Figura 23- Efeitos da tensão (T), velocidade de soldagem (Vs), velocidade de alimentação (Va) e distância bico de contato peça (N) sobre o Potencial de Pite (E_{pite}).



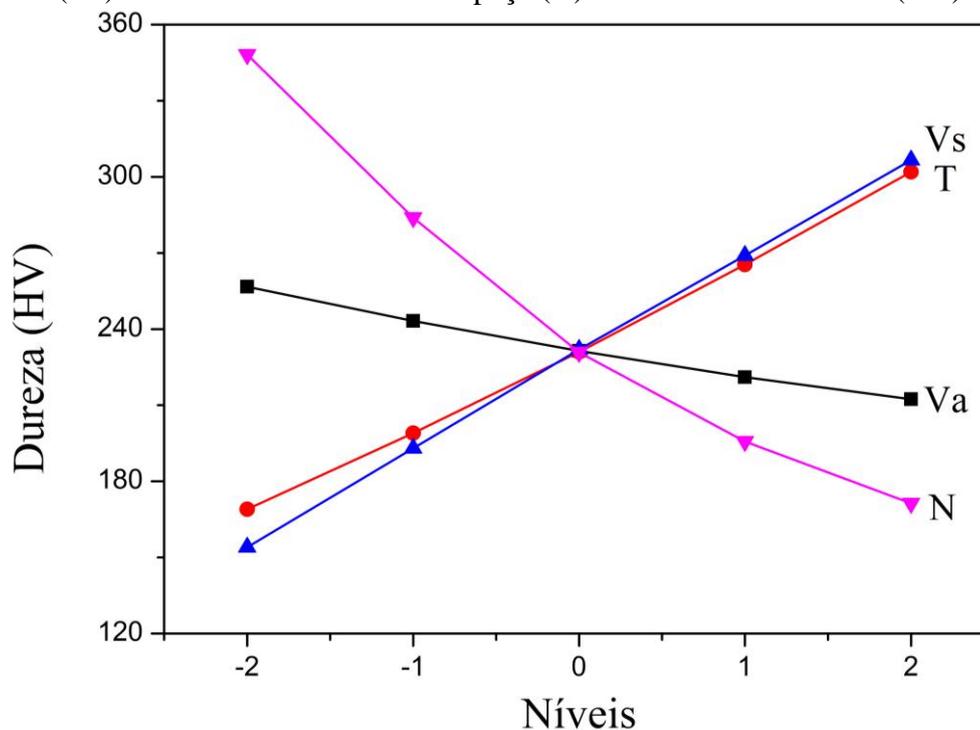
Fonte: Autor.

4.5.3 Efeitos principais sobre a Dureza

Os efeitos da tensão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação e distância bico de contato peça sobre a dureza dos revestimentos são mostrados na Figura 24. Os maiores valores de dureza foram alcançados quando utilizadas altas tensões e velocidades de soldagem e menores distâncias bico de contato peça. Observa-se que a velocidade de alimentação apresentou pouca influência sobre os valores de dureza Vickers. Nota-se que os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a dureza foram semelhantes aos apresentados para o grau de sensitização. Tanto a sensitização quanto a dureza aumentaram com o aumento do nível diluição. Maiores durezas foram alcançadas devido ao acréscimo de precipitados e principalmente pela transformação martensítica. A martensita possui elevada resistência mecânica e dureza, pois os átomos de carbonos intersticiais dificultam a movimentação de discordâncias, e conseqüentemente, a deformação do material. As tensões internas produzidas

durante a transformação de fase também contribuem para o aumento dessas propriedades (ASM, 1991).

Figura 24- Efeitos da tensão (T), velocidade de soldagem (Vs), velocidade de alimentação (Va) e distância bico de contato peça (N) sobre a dureza Vickers (HV).



Fonte: Autor.

4.6 Análise dos efeitos das interações entre os parâmetros

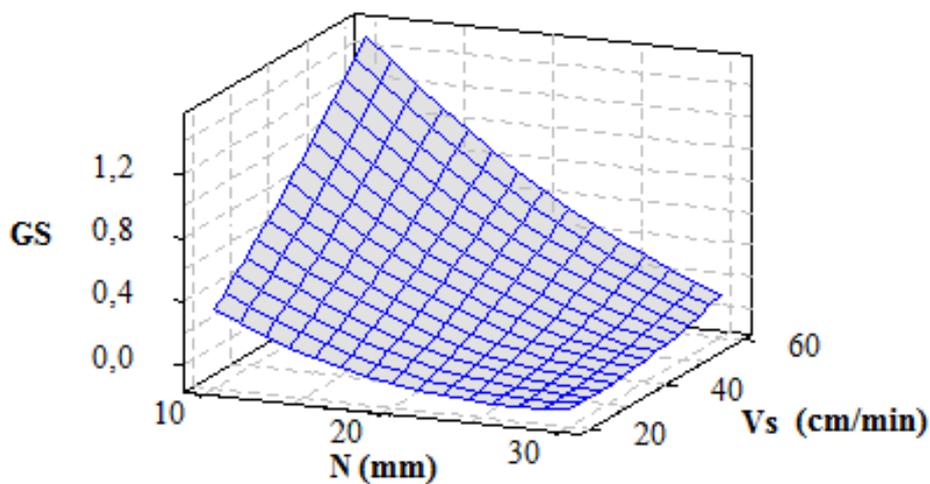
A Análise de Variância mostrou que o efeito conjunto dos parâmetros pode influenciar de forma significativa os resultados do processo de soldagem. Vale destacar que a análise dos efeitos das interações entre os parâmetros foi realizada apenas para os termos significativos (indicados em negrito na Tabela 7). O *software* MINITAB® foi empregado para a construção das superfícies de resposta.

4.6.1 Efeitos das interações sobre o Grau de Sensitização

A Figura 25 apresenta o efeito conjunto da distância e da velocidade de soldagem sobre o grau de sensitização. O aumento da distância bico de contato peça juntamente com a redução da velocidade de soldagem faz com que a sensitização diminua consideravelmente. Observa-se ainda que a velocidade de soldagem teve maior efeito sobre o grau de sensitização quando foi utilizada a distância bico de contato peça de 10 mm. Quando a deposição do cordão de solda foi realizada a uma distância de 30 mm a variação de velocidade apresentou pouca influência sobre GS.

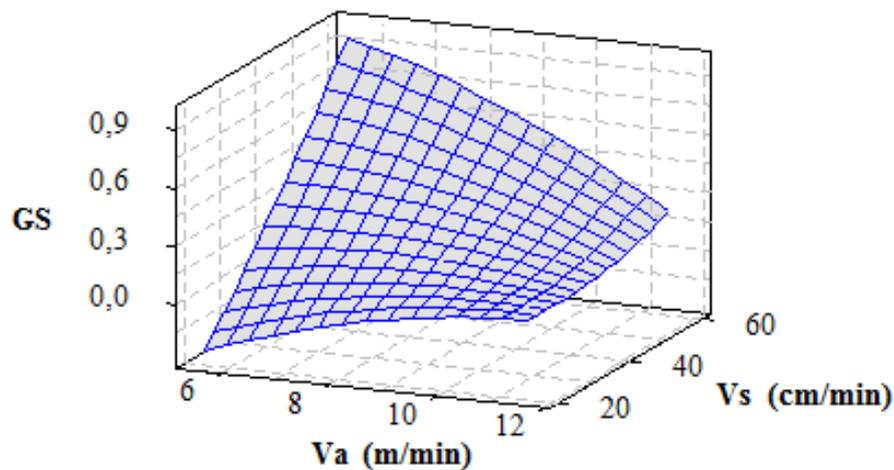
A velocidade de alimentação foi identificada anteriormente como um parâmetro pouco influente sobre esta resposta. Entretanto, a interação deste parâmetro com a velocidade de soldagem pode conduzir à aumentos significativos de *GS*, conforme Figura 26. Observa-se que o grau de sensitização aumenta consideravelmente quando são empregadas altas velocidades de soldagem e baixas velocidades de alimentação.

Figura 25- Efeito da interação entre velocidade de soldagem e distância bico de contato peça sobre o Grau de Sensitização ($V_a = 8,5$ m/min; $T = 29,5$ V).



Fonte: Autor.

Figura 26- Efeito da interação entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação sobre o Grau de Sensitização ($N = 20$ mm; $T = 29,5$ V).



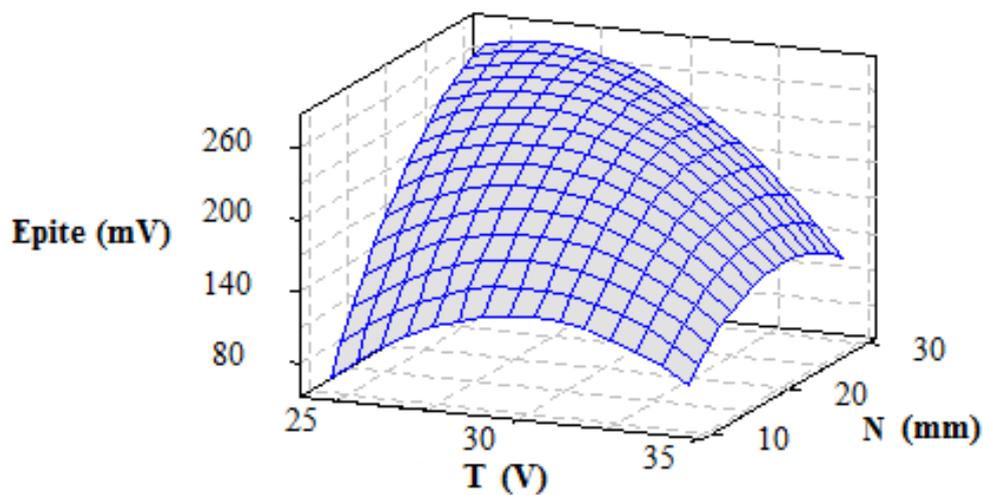
Fonte: Autor.

4.6.2 Efeitos das interações sobre o Potencial de Pite

As Figuras 27 e 28 mostram os efeitos das interações entre os parâmetros de soldagem sobre o potencial de pite. Observa-se que maiores potenciais são alcançados empregando-se baixas tensões e maiores distâncias bico de contato peça, Figura 27. Nota-se que a distância teve maior efeito sobre o potencial de pite quando foi utilizada baixas tensões. Quando a soldagem de revestimento foi realizada com tensão de 35V, a distância bico de contato peça pouco influenciou sobre a formação de pites.

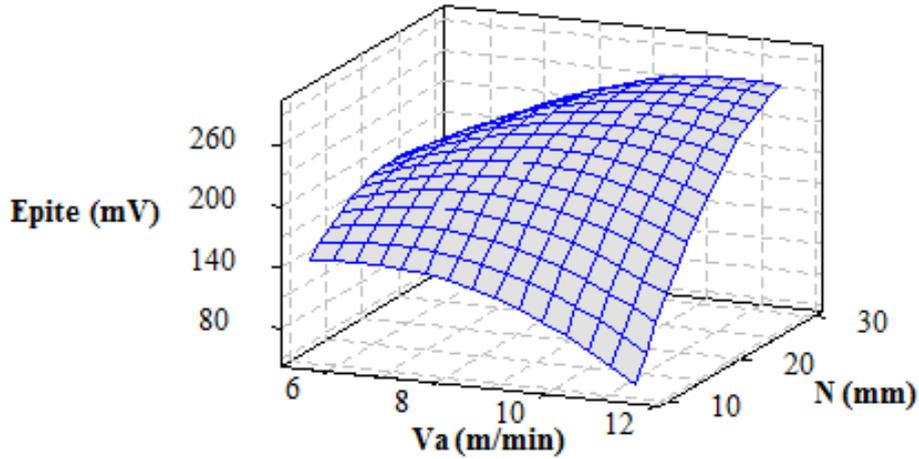
Embora a velocidade de alimentação não tenha apresentado efeito significativo sobre E_{pite} , a interação deste parâmetro com a distância bico de contato peça se mostrou significativa, Figura 28. Nota-se que o revestimento apresentou maior resistência à corrosão por pite quando foi utilizada maiores velocidades de alimentação e maiores distâncias. Isto aconteceu, pois, a quantidade de metal fundido aumentou em função de V_a e com o aumento de N o mesmo não teve energia suficiente para penetrar no metal base. Assim, essa combinação dos parâmetros de soldagem resultou em menores percentuais de diluição e potenciais de pite mais elevados.

Figura 27- Efeito da interação entre distância bico de contato peça e tensão sobre o Potencial de Pite ($V_a = 8,5$ m/min; $V_s = 40$ cm/min).



Fonte: Autor.

Figura 28- Efeito da interação entre velocidade de alimentação e distância bico de contato peça sobre o Potencial de Pite ($V_s = 40$ cm/min; $T = 29,5$ V).



Fonte: Autor.

4.7 Otimização EQMM

Nesta etapa foi realizada a otimização do processo de soldagem com arame tubular para as operações de revestimento de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L. O Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) foi aplicado com objetivo de alcançar um cordão de solda com máxima resistência à corrosão. O procedimento para obtenção do EQMM foi realizado por meio do software MINITAB®, exceto a formulação do método. Este último foi resolvido pelo *Microsoft Excel*®,

4.7.1 Análise da correlação entre as respostas

O primeiro passo foi verificar se as respostas, dureza, potencial de pite e grau de sensitização, eram correlacionadas, conforme Tabela 10. Observa-se a existência de uma estrutura de correlação significativa ($p\text{-value} < 0,05$) entre as respostas, o que indica que o método EQMM é adequado para a otimização deste problema.

Tabela 10- Estrutura de correlação entre as respostas.

	HV	GS
GS	0,934	
<i>P-value</i>	0,000	
Epite	-0,720	-0,775
<i>P-value</i>	0,000	0,000

Fonte: Autor.

4.7.2 Análise de Componentes Principais

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos pela análise de componentes principais (ACP). Observa-se que o primeiro componente principal isoladamente (PC1), explica 87,5% da variabilidade das respostas. Para o desenvolvimento do modelo de superfície de resposta foi utilizado os escores da ACP. O modelo desenvolvido para *PC1*, Equação 19, apresentou R^2 (*adj.*) de 90,26%.

$$\mathbf{PC1} = -0,504 - 0,118 Va + 0,686 T + 0,951 Vs - 1,160 N + 0,258 T^2 + 0,127 Vs^2 + 0,245 N^2 - 0,186 VaVs - 0,259 VaN - 0,203 VsN \quad (19)$$

Tabela 11- Análise de Componentes Principais.

Autovalor	2,6237	0,3158	0,0605
Proporção	0,875	0,105	0,020
Acumulado	0,875	0,980	1,000
Respostas	PC1	PC2	PC3
HV	0,587	0,475	-0,656
GS	0,598	0,292	0,746
E_{pite}	-0,546	0,830	0,113

Fonte: Autor.

4.7.3 Alvo em termos do componente principal

A Tabela 12 apresenta os dados utilizados para o cálculo do alvo em termo do componente principal (T_{PC1}). Os alvos de *GS* e *E_{pite}* foram fixados por meio da minimização e maximização individual de cada resposta. O alvo para dureza foi estabelecido comparando os dados apresentados na matriz experimental, onde foi observado que os revestimentos com aproximadamente 150 HV apresentaram maior potencial de pite e menor grau de sensitização. O valor de T_{PC1} e a padronização das respostas ($Z(y_j | \zeta_{yj})$) foram calculadas por meio das Equações 20 e 21, respectivamente (GOMES, 2010).

$$T_{PC} = \sum_{j=1}^k c_j \times Z(y_j | \zeta_{yj}) \quad (20)$$

Onde: T_{PC} – Alvo em termos do componente principal;

k – Número de respostas consideradas;

c_j – Coeficientes dos autovetores do componente principal;

$Z(y_j | \zeta_{yj})$ – Valores padronizados das respostas em relação aos alvos.

$$Z(y_j|\zeta_{yj}) = \frac{\zeta_{yj} - \mu_{yj}}{\sigma_{yj}} \quad (21)$$

Onde: ζ_{yj} – Alvos definidos para as respostas;

μ_{yj} – Média experimental das respostas;

σ_{yj} – Desvio-padrão experimental das respostas.

Tabela 12- Dados utilizados para o cálculo de T_{PC1} .

	HV	GS	E_{pite}
Média	232,119	0,325	198,00
Desvio	66,841	0,312	46,478
Alvo	150,00	0,000	280,00
Objetivo	Alvo	mín.	máx.
$Z(y_j \zeta_{yj})$	-1,2286	-1,0417	1,76428
Autovetor PC1	0,587	0,598	-0,546
T_{PC1}		-2,307	

Fonte: Autor.

4.7.4 Formulação EQMM

Primeiramente, foi construída uma planilha no *Microsoft Excel*®, com todos os modelos desenvolvidos, conforme Figura 29. Em seguida, a formulação EQMM (Equação 22) foi resolvida por meio do Algoritmo Genético (*Solver Evolutionary*). A função objetivo foi desenvolvida conforme Equação 9.

$$\text{Minimizar EQMM} = [(PC_1 + 2,307)^2 + 2,6237]^{1/1} \quad (22)$$

$$\text{Sujeito a: } x^T x \leq 4,0$$

$$GS \geq 0,0$$

Figura 29- Planilha desenvolvida para a otimização do processo de soldagem de revestimento.

Modelos Reduzidos

Coeficiente	Respostas		
	HV	GS	Ep _{ite}
Constante	226,882	0,2561	230,50
V _a	-2,4960	-0,0409	1,6250
T	27,346	0,1446	-15,125
V _s	38,271	0,1629	-26,708
N	-45,471	-0,2239	29,458
V _a ²	0,0000	0,0000	-8,3440
T ²	0,0000	0,0484	-13,719
V _s ²	0,0000	0,0000	-8,9690
N ²	6,7650	0,0405	-9,5940
V _a T	0,0000	0,0289	0,0000
V _a V _s	0,0000	-0,0641	0,0000
V _a N	-8,7690	0,0000	11,688
TV _s	0,0000	0,0000	0,0000
TN	-9,2060	-0,0378	-10,812
V _s N	-14,981	-0,0683	-4,6880

PC1
-0,5040
-0,1178
0,6861
0,9509
-1,1603
0,0000
0,2577
0,1271
0,2451
0,0000
-0,1863
-0,2597
0,0000
0,0000
-0,2029

Variáveis

Parâmetros	V _a	T	V _s	N
Coded	1,395	-0,169	-1,014	0,870
uncoded	10,59	29,08	29,86	24,35

Autovalores e explicação

PC1
2,624
0,875%
0,875%

Resultados

	HV	GS	Ep	PC1
Modelo	149,4	0,003	270,7	-2,3074
Alvo	150,0	0,000	280,0	-2,3074
R ² (adj.)	75,95%	84,27%	83,86%	90,26%

Função Objetivo

EQMM	2,624
------	--------------

Restrições

X'X:	3,759	<=	4,000
Limites:	-2,000	<=>	2,000
GS	0,003	=>	0,000

Fonte: Autor.

A Tabela 13 apresenta os resultados otimizados para o processo de revestimento com arame tubular de aço inoxidável ABNT 316L. Observa-se que respostas ótimas de GS e Ep_{ite} ficaram relativamente distantes em relação aos alvos definidos. Nota-se ainda que a otimização conduziu a resultados inferiores aos obtidos experimentalmente. Maior potencial de pite e menor grau de sensitização puderam ser observados na matriz experimental. Em razão disso, optou-se por empregar o método EQMM ponderado.

Tabela 13- Parâmetros ótimos da soldagem de revestimento.

Parâmetros				Respostas		
Va (m/min)	T (V)	Vs (cm/min)	N (mm)	HV	GS	E _{pite} (mV)
10,59	29,08	29,86	24,35	149,4	0,003	270,7

Fonte: Autor.

4.8 EQMM Ponderado

O EQMM Ponderado foi utilizado com o objetivo de melhorar os resultados, principalmente o grau de sensitização. A otimização desta resposta foi prejudicada em função da otimização de dureza. Vale lembrar que os pesos não podem ser atribuídos diretamente na função objetivo por causa desta ser escrita em função dos componentes principais. As etapas para o desenvolvimento do método foram descritas nos Itens seguintes.

4.8.1 Padronização e Ponderação das respostas

O primeiro passo foi unificar as respostas, por meio da padronização das mesmas, Tabela 14. Para este procedimento foi utilizada a Equação 11. Em seguida, multiplicou-se as respostas padronizadas pelos pesos, conforme Tabela 15. As respostas referentes a resistência à corrosão foram julgadas como sendo duas vezes mais importantes que as respostas de dureza. Portanto, para o grau de sensitização e potencial de pite foram atribuídos o peso de 0,4 e para a dureza atribuiu-se o peso de 0,2.

Tabela 14– Respostas Padronizadas.

Teste	Parâmetros				Respostas		
	Va	T	Vs	N	HV	GS	E _{pite} (mV)
1	-1	-1	-1	-1	-1,065	-0,599	-0,107
2	1	-1	-1	-1	-0,887	-0,740	-0,709
3	-1	1	-1	-1	0,158	0,186	-0,817
4	1	1	-1	-1	1,306	1,195	-0,387
5	-1	-1	1	-1	1,258	1,766	-1,140
6	1	-1	1	-1	1,458	0,532	-1,334
7	-1	1	1	-1	1,608	1,747	-0,925
8	1	1	1	-1	1,566	1,814	-1,549
9	-1	-1	-1	1	-0,859	-1,025	1,226
10	1	-1	-1	1	-1,175	-1,035	1,463
11	-1	1	-1	1	-1,205	-0,875	0,129
12	1	1	-1	1	-1,003	-1,026	0,947
13	-1	-1	1	1	-0,802	-0,737	-0,452
14	1	-1	1	1	-0,844	-1,029	1,312
15	-1	1	1	1	0,329	0,618	-0,925
16	1	1	1	1	-0,130	-0,500	-0,709
17	-2	0	0	0	0,481	-0,022	0,430
18	2	0	0	0	-0,401	-0,663	-0,172
19	0	-2	0	0	-1,012	-0,782	0,495
20	0	2	0	0	1,125	1,766	-1,162
21	0	0	-2	0	-1,170	-1,035	1,657
22	0	0	2	0	1,114	1,167	-1,506
23	0	0	0	-2	1,717	1,820	-1,291
24	0	0	0	2	-0,901	-1,038	1,334
25	0	0	0	0	0,161	0,141	0,538
26	0	0	0	0	0,689	0,160	0,602
27	0	0	0	0	0,170	-0,122	*
28	0	0	0	0	0,541	-0,285	0,861
29	0	0	0	0	-0,681	-0,449	1,097
30	0	0	0	0	-0,718	-0,487	0,452
31	0	0	0	0	-0,829	-0,465	0,645

Fonte: Autor.

Tabela 15– Ponderação das respostas.

Teste	Parâmetros				Respostas		
	Va	T	Vs	N	HV*0,2	GS*0,4	E _{pite} *0,4
1	-1	-1	-1	-1	-0,213	-0,240	-0,043
2	1	-1	-1	-1	-0,177	-0,296	-0,284
3	-1	1	-1	-1	0,032	0,074	-0,327
4	1	1	-1	-1	0,261	0,478	-0,155
5	-1	-1	1	-1	0,252	0,706	-0,456
6	1	-1	1	-1	0,292	0,213	-0,534
7	-1	1	1	-1	0,322	0,699	-0,370
8	1	1	1	-1	0,313	0,726	-0,620
9	-1	-1	-1	1	-0,172	-0,410	0,491
10	1	-1	-1	1	-0,235	-0,414	0,585
11	-1	1	-1	1	-0,241	-0,350	0,052
12	1	1	-1	1	-0,201	-0,410	0,379
13	-1	-1	1	1	-0,160	-0,295	-0,181
14	1	-1	1	1	-0,169	-0,412	0,525
15	-1	1	1	1	0,066	0,247	-0,370
16	1	1	1	1	-0,026	-0,200	-0,284
17	-2	0	0	0	0,096	-0,009	0,172
18	2	0	0	0	-0,080	-0,265	-0,069
19	0	-2	0	0	-0,202	-0,313	0,198
20	0	2	0	0	0,225	0,706	-0,465
21	0	0	-2	0	-0,234	-0,414	0,663
22	0	0	2	0	0,223	0,467	-0,602
23	0	0	0	-2	0,343	0,728	-0,516
24	0	0	0	2	-0,180	-0,415	0,534
25	0	0	0	0	0,032	0,056	0,215
26	0	0	0	0	0,138	0,064	0,241
27	0	0	0	0	0,034	-0,049	*
28	0	0	0	0	0,108	-0,114	0,344
29	0	0	0	0	-0,136	-0,179	0,439
30	0	0	0	0	-0,144	-0,195	0,181
31	0	0	0	0	-0,166	-0,186	0,258

Fonte: Autor.

4.8.2 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais foi realizada considerando a matriz de variância-covariância entre as respostas ponderadas, Tabela 16. Observa-se que o primeiro componente principal $PC1$ representou 87,8% da variabilidade das respostas. O modelo desenvolvido para $PC1$, Equação 23, apresentou R^2 (*adj.*) de 91,90%.

$$\begin{aligned} \mathbf{PC1} = & -0,215 - 0,0510 Va + 0,239 T + 0,331 Vs - 0,404 N + 0,117 T^2 + 0,060 Vs^2 + 0,093 N^2 \\ & - 0,072 VaVs - 0,095 VaN - 0,046 VsN \end{aligned} \quad (23)$$

Tabela 16- Análise de Componentes Principais para as respostas ponderadas.

Autovalor	0,323	0,041	0,004
Proporção	0,878	0,111	0,012
Acumulado	0,878	0,988	1,000
Respostas	PC1	PC2	PC3
HV*0,2	0,324	0,313	-0,893
GS*0,4	0,687	0,571	0,450
E_{pite}*0,4	-0,650	0,759	0,030

Fonte: Autor.

4.8.3 Alvo em termos do componente principal

Os dados utilizados para o cálculo do alvo em termos do componente principal são apresentados pela Tabela 17. O procedimento para obtenção de T_{PC1} foi o mesmo descrito no Item 4.7.3.

Tabela 17- Dados utilizados para o cálculo de T_{PC1} para as respostas ponderadas.

	HV	GS	E_{pite}
Média	232,119	0,325	198,00
Desvio	66,841	0,312	46,478
Alvo	150,00	0,000	280,00
Objetivo	Alvo	mín.	máx.
$Z(y_j \zeta_{yj})$	-1,2286	-1,0417	1,76428
Autovetor PC1	0,324	0,687	-0,650
T_{PC1}		-2,2605	

Fonte: Autor.

4.8.4 Formulação EQMM Ponderado

A formulação matemática para o EQMM Ponderado (Equação 24) foi escrita de acordo com as Equações 12 e 13 e resolvida pelo Algoritmo Genético. Para a otimização do processo de soldagem foi construída uma planilha no *Microsoft Excel*®, Figura 30.

$$\text{Minimizar EQMM} = \frac{0,878}{0,878} [(PC_1^* + 2,2605)^2 + 0,323] \quad (24)$$

$$\text{Sujeito a: } x^T x \leq 4,0$$

$$GS \geq 0,0$$

Figura 30– Planilha desenvolvida para a otimização ponderada da soldagem de revestimento.

Modelos Reduzidos

Coeficiente	Respostas		
	HV	GS	Ep
Constante	226,88	0,2561	230,50
Va	-2,4960	-0,0409	1,6250
T	27,346	0,1446	-15,125
Vs	38,271	0,1629	-26,708
N	-45,471	-0,2239	29,458
Va ²	0,0000	0,0000	-8,3440
T ²	0,0000	0,0484	-13,719
Vs ²	0,0000	0,0000	-8,9690
N ²	6,7650	0,0405	-9,5940
VaT	0,0000	0,0289	0,0000
VaVs	0,0000	-0,0641	0,0000
VaN	-8,7690	0,0000	11,688
TVs	0,0000	0,0000	0,0000
TN	-9,2060	-0,0378	-10,812
VsN	-14,981	-0,0683	-4,6880

PC1
-0,2148
-0,051
0,2398
0,3314
-0,4043
0,0000
0,1174
0,0602
0,0931
0,0000
-0,0724
-0,0953
0,0000
0,0000
-0,0456

Resultados

	HV	GS	Ep	PC1
Modelo	147,8	4,28E-05	272,9	-0,8873
Alvo	150,0	0,0000	280,0	-2,2605
R ² (adj.)	75,95%	84,27%	83,86%	91,90%

Autovalores e explicação

PC1
0,323
0,878%
0,878%

Variáveis

Parâmetros	Va	T	Vs	N
Coded	1,389	-0,005	-0,884	1,135
uncoded	10,58	29,49	31,16	25,68

Função Objetivo

EQMM	2,207
------	--------------

Restrições

X'X:	3,999	<=	4,000
Limites:	-2,000	<=>	2,000
GS	4,3E-05	=>	0

Fonte: Autor.

A Tabela 18 apresenta os parâmetros ótimos de soldagem considerando os pesos atribuídos às respostas. Observa-se uma melhoria em termos de resistência à corrosão. O resultado otimizado para *GS* ficou muito próximo do alvo. Por outro lado, a ponderação não proporcionou uma grande variação de E_{pite} e *HV*. A nova condição de ótimo foi considerada satisfatória, pois o grau de sensitização reduziu de forma significativa. Além disso, o potencial de pite otimizado aproximou-se do maior valor encontrado experimentalmente (275 mV).

Tabela 18- Parâmetros ótimos da soldagem de revestimento para as respostas ponderadas.

Parâmetros				Respostas		
Va (m/min)	T (V)	Vs (cm/min)	N (mm)	HV	GS	E_{pite} (mV)
10,58	29,49	31,16	25,68	147,8	0,000	272,9

Fonte: Autor.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados anteriores foram estabelecidas as seguintes considerações:

- A análise no diagrama de Schaeffler indicou a possibilidade de transformação martensítica para as amostras com diluição acima dos 26%.
- As micrografias dos revestimentos de aço inoxidável ABNT 316L revelaram a presença de martensita e ferrita delta dispersas na matriz austenítica. O teor de cada fase varia de acordo com o percentual de diluição.
- A análise microestrutural mostrou que a quantidade de precipitados aumenta em função da mistura dos elementos químicos presentes no aço carbono e no aço inoxidável. A precipitação de carbonetos foi observada em todos os revestimentos. Portanto, deve-se trabalhar com nível de diluição inferior a 18%.
- Os maiores valores de dureza foram alcançados devido ao acréscimo de carbonetos e principalmente pela transformação martensítica.
- As curvas da polarização anódica mostraram que todos os revestimentos foram passivados em solução de 3,5%p. NaCl. No entanto, a resistência à corrosão por pite foi reduzida devido à presença de precipitados, de martensita e de ferrita delta.
- A partir do ensaio DL-EPR, observou-se que os revestimentos são suscetíveis à corrosão intergranular ($GS \geq 0,001$) e que o grau de sensitização aumentou em função do nível de diluição.
- Os modelos desenvolvidos para potencial de pite e grau de sensitização apresentaram ajustes superiores a 80%. Para a dureza o R^2 (*adj.*) foi de 75,95%, ajuste considerado como satisfatório.
- A análise dos efeitos principais mostrou que apenas a velocidade de alimentação não possui influência significativa sobre a resistência à corrosão e a dureza do revestimento. No entanto, a interação deste parâmetro com a velocidade de soldagem e distância bico de contato peça gerou efeitos significativos sobre o grau de sensitização e potencial de pite, respectivamente.
- Considerando os efeitos dos parâmetros de soldagem sobre as respostas de interesse, observou-se que maiores durezas são obtidas diminuindo a distância bico de contato peça e aumentando a velocidade de soldagem e a tensão. Maior resistência à corrosão por pite e intergranular pode ser alcançada empregando-se baixas velocidades de soldagem e tensão e maiores distâncias bico de contato peça.

- O EQMM se caracteriza como uma ferramenta eficiente para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas. No entanto, o EQMM Ponderado conduziu a melhores resultados otimizados.
- Após a aplicação do EQMM Ponderado, verificou-se que a otimização do processo de soldagem com arame tubular para aplicações de revestimentos de aço inoxidável ABNT 316L sobre chapas de aço carbono ABNT 1020 é alcançada com o emprego dos seguintes parâmetros: $Va = 10,58$ m/min; $T = 29,49$ V; $Vs = 31,16$ cm/min; $N = 25,68$ mm. As respostas otimizadas são: potencial de pite de 272,9 mV, grau de sensitização igual a zero e dureza de 147,8 HV.

Assim, baseado nos resultados obtidos, conclui-se que a precipitação de carbonetos de cromo reduz de forma acentuada a resistência à corrosão dos revestimentos. A dureza é aumentada devido à transformação martensítica. A soldagem de revestimento é uma excelente alternativa para produção de superfícies resistentes à corrosão, no entanto, os parâmetros de soldagem devem ser controlados. A metodologia de superfície de resposta permitiu avaliar como as variáveis do processo influenciaram as respostas. O método EQMM demonstrou ser uma importante ferramenta de otimização de processos, podendo ser aplicado por engenheiros para o desenvolvimento de materiais.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar outras técnicas para avaliar a resistência à corrosão do revestimento: ensaio de corrosão sob tensão e polarização potenciodinâmica cíclica.
- Identificar a composição química dos precipitados e fases secundárias por meio da difração de raios-X.
- Avaliar o custo de produção dos revestimentos e comparar com os preços dos componentes de aços inoxidável.
- Realizar experimentos de confirmação com o objetivo de comparar os resultados reais com os resultados calculados para a condição otimizada.
- Otimizar o processo de soldagem com arame tubular para o revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L, levando em consideração as características geométricas, produtividade do processo, resistência à corrosão e qualidade superficial do cordão de revestimento, simultaneamente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). *Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels: A262-13*. Philadelphia, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). *Standard Test Method for Electrochemical Reactivation (EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels I: G108-94*. Philadelphia, 2015.

AMORIM, L.F. *Proposição de alvos multivariados em problemas de otimização multi-objetivo aplicado ao processo solda a ponto de aços galvanizados*. 2017. 113 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2017.

ARGADE, G.R.; SHUKLA, S.; LIUA, K.; MISHRA, R.S. Friction stir lap welding of stainless steel and plain carbon steel to enhance corrosion properties. *Journal of Materials Processing Tech.*, v. 259, p. 259–269, 2018.

ASM International handbook committee. *ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, steel and high performance alloys*. USA, 2005.

ASM International handbook committee. *ASM Handbook: Welding, Brazing and Soldering*. v.6, USA, 1993.

ASM International handbook committee. *ASM Handbook: Corrosion*. v. 13, USA, 1992.

ASM International handbook committee. *ASM Handbook: Corrosion: Fundamentals, testing and protection*. v. 13A, USA, 2003.

ASM, *ASM Metals Handbook, Vol. 4—Heat Treating*, 10th ed., ASM International, Materials Park, OH, 1991.

BABOIAN, R. *Corrosion Tests and Standards: application and interpretation*. 2 ed. Philadelphia, PA: ASTM manual series 20, 2005, 882 p.

BALAN, A.V.; KANNAN, T.; SHIVASANKARAN, N. Effect of FCAW process parameters on bead geometry in super duplex stainless steel claddings. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 9, n. 24, p. 27331-27346, 2014.

BALAN, A.V.; SHIVASANKARAN, N.; MAGIBALAN, S. Optimization of cladding parameters for resisting corrosion on low carbon steels using simulated annealing algorithm. *Materials Research Express*, v. 5 (046527), 2018.

BAO, Y.; REN, Q.; ZHANG, Z.; YANG, K.; JIANG, Y. Study of intergranular corrosion resistance of overlay by Electroslag cladding with austenitic stainless steel. *Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution*, v. 37, n. 6, p. 65-68, 2016.

BESLIU, M. M.; VOICULESCU, I.; SOLOMON, G., Effects of dilution on weld overlays realized with flux-cored arc welding (FCAW) process using 309LV filler metal on the S235JR steel. *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series B*, v. 79, n. 1, p. 172-182, 2017.

BHADESHIA HKDH, HONEYCOMBE RWK. *Steels: Microstructure and Properties*. 3 ed. Oxford: Elsevier Ltd; 2006, 360 p.

BRITO, T. G. *Método da interseção normal à fronteira para otimização bi-objetivo do fresamento de topo do aço ABNT 1045*. 2015. 121 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2015.

CAMPOS; P.H.S.; BELINATO, G.; PAULA, T.I.; OLIVEIRA-ABANS, M.; FERREIRA, J.R.; PAIVA, A.P.; BALESTRASSI, P.P. Multivariate mean square error for the multiobjective optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper ceramic inserts tool: a comparative study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 39, p. 4021–4036, 2017.

CAO, X.Y.; ZHU, P.; LIU, T.G.; LU, Y.H.; SHOJI, T. Thermal aging effects on mechanical and electrochemical properties of stainless steel weld overlay cladding. *Surface & Coatings Technology*, v. 344, p. 111–120, 2018.

CHAKRABARTI, B.; DAS, H.; DAS, S.; PAL, T. K. Effect of Process Parameters on Clad Quality of Duplex Stainless Steel Using GMAW Process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 66, n. 3, p. 221–230, 2013.

CHEN, C.X.; LIU, M.Y.; LIU, B.X.; YIN, F.X.; DONG, Y.C.; ZHANG, X.; ZHANG, F.Y.; ZHANG, Y.G. Tensile shear sample design and interfacial shear strength of stainless steel clad plate. *Fusion Engineering and Design*, v. 125, p. 431–441, 2017.

COSTA, D.M.D; BRITO, T.G.; PAIVA, A.P.; LEME, R.C.; BALESTRASSI, P.P. A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 1658- 1672, 2016.

DADFAR, M.; FATHI, M.H.; KARIMZADEH, F.; DADFAR, M.R.; SAATCHI, A., Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel. *Materials Letters*, v. 61, p. 2343–2346, 2007.

DHIB, Z.; GUERMAZI, N.; GASPÉRINI, M.; HADDAR, N. Cladding of low-carbon steel to austenitic stainless steel by hot-roll bonding: Microstructure and mechanical properties before and after welding. *Materials Science & Engineering A*, v. 656, p. 130–141, 2016.

DHIB, Z.; GUERMAZI, N.; KTARI, A.; GASPERINIC, M.; HADDAR, N. Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates. *Materials Science & Engineering A*, v. 696, p. 374–386, 2017.

EGHLIMI, A.; SHAMANIAN, M.; RAEISSI, K. Dilution and ferrite number prediction in pulsed current cladding of super-duplex stainless steel using RSM. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 22, n. 12, p. 3657–3664, 2013.

EGHLIMI, A.; SHAMANIAN, M.; RAEISSI, K. Effect of current type on microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arc welding process. *Surface & Coatings Technology*, v. 244, p. 45–51, 2014.

FAROOQ, M. A.; NÓVOA, H.; ARAÚJO, A.; TAVARES, S. M. O. An innovative approach for planning and execution of pre-experimental runs for Design of Experiments. *European Research on Management and Business Economics*, v. 22, p. 155–161, 2016.

FILHO, A. J. B.; GONZALEZ, A. R. Estudo dos parâmetros de polaridade negativa na soldagem MIG/MAG polaridade variável para revestimento. *Soldagem & Inspeção*, v. 22, n. 1, p. 46-58, 2017.

GARCIA, C.; MARTIN, F.; TIEDRA, P.; BLANCO, Y.; LOPEZ, M., Pitting corrosion of welded joints of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell. *Corrosion Science*, v. 50, p. 1184–1194, 2008.

GEMELLI, E. *Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização*. Editora Livros Técnicos Científicos. 2001.

GOMES, G. F.; UEDA, M.; BELOTO, A. F.; NAKAZATO, R. Z.; REUTHER, H., Corrosion resistance enhancement of SAE 1020 steel after Chromium implantation by nitrogen ion recoil. *Materials Research*, v.8 n.4, 2005.

GOMES, J. H. F. *Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico*. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010.

GOMES, J.H.F; PAIVA, A.P; COSTA, S.C.; BALESTRASSI, P.P.; PAIVA, E.J. Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings. *European Journal of Operational Research*, v.226, p. 522–535, 2013.

GUILHERME, L. H.; ROVERE, C. A. D.; KURI, S. E.; DE OLIVEIRA, M. F., Resistência à corrosão de junta dissimilar soldada pelo processo TIG composta pelos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 444. *Soldagem & Inspeção*, v. 19, n. 01, p.042-050, 2014.

HUANG, Q.; YANG, X.; MA, L.; ZHOU, C.; LIU, G.; LI, H. Interface-correlated characteristics of stainless steel/carbon steel plate fabricated by AAWIV and Hot Rolling. *Journal of Iron and Steel Research*, v. 21, n. 10, p. 931-937, 2014.

IACOVIELLO, F.; DI COCCO, V.; D'AGOSTINO, L. Analysis of the intergranular corrosion susceptibility in stainless steel by means of potentiostatic reactivation tests. *Procedia Structural Integrity*, v. 3, p. 269 – 275, 2017.

JAYACHANDRAN, J. A. R.; MURUGAN, N., Development of eco-friendly surface modification process for 316L austenitic stainless steel weld cladding. *Surface Engineering*, 28:1, p. 5-10, 2012.

JORGE C.F.J.; MEIRA, O.G.; MADALENA, F.C.A.; DE SOUZA, L.F.G.; ARAUJO, L.S.; MENDES, M.C. Evaluation of the AISI 904L alloy weld overlays obtained by GMAW and Electro-Slag welding processes. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 26, n. 5, p. 2204–2212, 2017.

KIM, Y.H.; LEE, D.J.; BYUN, J.C.; JUNG, K.H.; KIM, J.I.; LEE, H.J.; SHIN, Y.T.; KIM, S.H.; LEE, H.W., The effect of sigma phases formation depending on Cr/Ni equivalent ratio in AISI 316L weldments. *Materials and Design*, v. 32, p. 330–336, 2011.

LACERDA, J. C. *Comportamento em fadiga e corrosão de um aço UNS S31803 com diferentes frações de ferrita-austenita*. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT (UFOP, CETEC, UEMG), 2015.

LEÃO, E. R. C. *Estudo do comportamento de aços inoxidáveis austeníticos e austeno-ferríticos em sistemas de resfriamento industrial com elevado ciclo de concentração*. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

LIPPOLD, J. C. *Welding metallurgy and weldability*. New Jersey, USA: JohnWiley & Sons: 2015, 421 p.

LIPPOLD, J. C., KOTECKI, D. J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. New Jersey, USA: JohnWiley & Sons: 2005, 376 p.

LIQING, H.; GUOBIAO, L.; ZIDONG, W.; HONG, Z.; FENG, L.; LONG, Y., Study on Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel Welded Joint. *Rare Metal Materials and Engineering*, v. 39, n. 3, p. 393-396, 2010.

LIU, L.; JIA, Y.; XUAN, F. Gradient effect in the waved interfacial layer of 304L/533B bimetallic plates induced by explosive welding. *Materials Science & Engineering A*, v. 704, p. 493–502, 2017.

LOTHONGKUM, G.; VIYANIT, E.; BHANDHUBANYONG, P. Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 110, p. 233-238, 2001.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q., *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, 3 ed. Belo horizonte: UFMG, 2011. 362 p.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J. Algumas Equações Úteis em Soldagem. *Soldagem e Inspeção*, v. 19, n. 01, p.091-102, 2014.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 6 ed. New York: John Wiley, 2005. 643 p.

MOURA, V.; RIBEIRO, I.; MORIGGI, P.; CAPÃO, A.; SALLES, C.; BITATI, S.; PROCÓPIO, L. The influence of surface microbial diversity and succession on microbiologically influenced corrosion of steel in a simulated marine environment. *Archives of Microbiology*, v. 200, p. 1447–1456, 2018.

NAZEMI, N.; URBANIC, J.; ALAM, M. Hardness and residual stress modeling of powder injection laser cladding of P420 coating on AISI 1018 substrate. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 93, p. 3485–3503, 2017.

NILO JÚNIOR, L. P. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2003.

NIXON, R. G. S.; MOHANTY, B.S.; BHASKAR, G. B. Effect of process parameters on physical measurements of AISI316 stainless steel coating on EN24 in friction surfacing. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 33, n. 7, p. 778-785, 2018.

NUNES, E. B.; MOTTA, M. F.; DE ABREU, H. F. G.; FARIAS, J. P.; DE MIRANDA, H. C.; JUNIOR, F. N. A., Estudo dos Efeitos da Restrição na Microestrutura, Microdureza e Tenacidade em Juntas Soldadas em Aço Inoxidável Duplex. *Soldagem & Inspeção*, v.16, n. 2, p.156-164, 2011.

PAIVA, E. J. *Otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas baseada em índices de capacidade*. 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2008.

PAIVA, E. J.; RODRIGUES, L.O.; COSTA, S.C., PAIVA, A.P.; BALESTRASSI, P.P. Otimização do Processo de Soldagem FCAW Usando o Erro Quadrático Médio Multivariado. *Soldagem & Inspeção*, v. 15, n. 1, p. 31- 40, 2010.

PALANI, P.K; MURUGAN, N., Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 190, p. 291–299, 2007.

PASSOS, D. O; OTUBO, J. A influência da ferrita delta em aços inoxidáveis austeníticos forjados. *Revista Escola de Minas*, v.63, n.1, p. 57-63, 2010.

PRABHU, R.; ALWARSAMY, T. Effect of process parameters on ferrite number in cladding of 317L stainless steel by pulsed MIG welding. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 31, n. 3, p.1341-1347, 2017.

PRABHU, R.; ALWARSAMY, T. Study and investigations on process parameters for bead geometry during cladding by pulsed MIG welding process. *International Review of Mechanical Engineering*, v. 8, n. 4, p. 722-729, 2014.

RAJKUMAR, G. B.; MURUGAN, N., Development of regression models and optimization of FCAW process parameter of 2205 duplex stainless steel. *Indian Journal of Engineering and Materials Science*, v. 21, p. 149- 154, 2014.

RIOS, E. C.; ZIMER, A. M.; MENDES, P. C.D.; FREITAS, M. B.J.; CASTRO, E. V.R.; MASCARO, L. H.; PEREIRA, E. C., Corrosion of AISI 1020 steel in crude oil studied by the electrochemical noise measurements, *Fuel*, v. 150, p. 325–333, 2015.

SEDRIKS, A.J. *Corrosion of stainless steel*, 2 ed. USA: John Wiley Sons Inc, 1996.

SENTHILKUMAR, B.; KANNAN, T. Sensitivity analysis of flux cored arc welding process variables in super duplex stainless steel claddings. *Procedia Engineering*, v. 64, p. 1030 – 1039, 2013.

SENTHILKUMAR, B.; KANNAN, T., Effect of flux cored arc welding process parameters on bead geometry in super duplex stainless steel claddings. *Measurement*, v. 62, p. 127–136, 2015.

SENTHILKUMAR, B.; KANNAN, T.; ARUN, K.K. Development of response - dilution maps for super duplex stainless steel claddings deposited by FCAW. *International Journal of Productivity and Quality Management*, v. 19, n. 2, p. 242-257, 2016.

SENTHILKUMAR, B; KANNAN, T.; MADESH, R., Optimization of flux-cored arc welding process parameters by using genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 93, p. 35–41, 2017.

SERNA-GIRALDO, C. A. *Resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável ferrítico UNS S43000: avaliação por método de reativação eletroquímica, efeito de tratamento isotérmico e mecanismo de sensitização*. 197f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SILVA, C.C.; MIRANDA, H.C.; SANT’ANA, H. B.; FARIAS, J.P., Austenitic and ferritic stainless steel dissimilar weld metal evaluation for the applications as-coating in the petroleum processing equipment. *Materials and Design*, v. 47, p. 1–8, 2013.

SILVA, L. J.; D’OLIVEIRA, A. S. C. M., Liga NiCrSiBC: Microestrutura e Dureza de Revestimentos Processados a Arco e a Laser. *Soldagem & Inspeção*, v. 20, n.1, p. 39-47, 2015.

SIVA, K.; MURUGAN, N. A Study on the Influence of PTAW Process Parameters on Pitting Corrosion Resistance of Nickel Based Overlays. *Procedia Engineering*, v. 64, p.1147 – 1156, 2013.

SOWRIRAJAN, M.; MATHEWS, P. K.; VIJAYAN, S. Investigation and optimization of process variables on clad angle in 316l stainless steel cladding using genetic algorithm. *High Temperature Material Processes*, v. 21, n. 2, p.109–125, 2017.

SOWRIRAJAN, M.; MATHEWS, P.K.; VIJAYAN, S. Simultaneous multi-objective optimization of stainless steel clad layer on pressure vessels using genetic algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v.32, n.6, p. 2559-2568, 2018.

SOWRIRAJAN, M.; MATHEWS, P.K.; VIJAYAN, S.; AMALADASAN, Y. Effect of weld dilution on post-weld thermal conductivity of austenitic stainless steel clad layers. *Materials Research Express*, v. 5 (096512), 2018.

SREERAJ, P.; KANNAN, T.; MAJI, S. Estimation of optimum dilution in the GMAW process using integrated ANN-GA. *Journal of Engineering*, v. 2013, 17 p., 2013.

STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q., Estudo da Transferência de Metal de um Arame Tubular Rutílico. *Soldagem & Inspeção*, v. 9, n. 4, p. 185-191, 2004.

SWITZNER, N.; YU, Z.; EFF, M.; LIENERT, T.; FONSECA, A. Microstructure and mechanical property variations within inertia friction-welded joints of stainless steel to steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 95, p.4327–4340, 2018.

TIYASRI, N.; POOPAT, B. Welding procedure development for welding of high strength carbon steel clad with austenitic stainless steel 316L by using overmatching filler metal. *Key Engineering Materials*, v. 545, p. 182-187, 2013.

TOTTEN, G. E. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. Second Edition. Oregon: CRC Press, 2006. 848 p.

VARAVALLO, R.; MOREIRA, V. M.; PAES, V.; BRITO, P.; OLIVAS, J.; PINTO, H. C. Welding induced residual stresses in explosion clad AL-6XN superaustenitic stainless steel

and ASME SA516-70 steel composite plates. *Advanced Materials Research*, v. 996, p. 451-456, 2014.

WANG, K.; CHANG, B.; CHEN, J.; FU, H.; LIN, Y.; LEI, Y. Effect of molybdenum on the microstructures and properties of stainless steel coatings by laser cladding. *Applied Sciences*, v. 7, n. 10, p. 1-15, 2017.

WANG, Z.; XU, J.; SHOJI, T.; TAKEDA, Y.; YUYA, H.; OYAMA, M. Microstructure and pitting behavior of the dissimilar metal weld of 309L cladding and low alloy steel A533B. *Journal of Nuclear Materials*, v.508, p. 1-11, 2018.

XUE, F.; XU, L. Y.; JING, H. Y.; HAN, Y. D. Corrosion behavior of mechanical clad pipe welded joints in CO₂-saturated seawater under high temperature and high pressure. *Materials and Corrosion*, v. 64, n. 6, p. 544- 549, 2013.

YOGANANDH, J.; KANNAN, T.; KUMARESH BABU, S.P.; NATARAJAN, S. Optimization of GMAW process parameters in austenitic stainless steel cladding using genetic algorithm based computational models. *Experimental Techniques*, v. 37, p. 48–58, 2013.

ZHANG, S.; SHI, R.; TAN, Y., Corrosion behavior of the oxide films modified with zincizing treatment on AISI 1020 steel, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 711, p. 155-161, 2017.

APÊNDICE A – Medição de dureza.

Exp.	Dureza Vickers (HV)- Medições										Média	Desvio-Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	162,6	165,4	162,0	165,4	160,4	148,5	163,1	158,2	160,4	163,1	160,9	4,897
2	160,9	185,3	166,5	185,3	171,8	173,1	164,2	166,0	176,1	178,7	172,8	8,568
3	210,6	268,7	290,0	306,6	225,2	222,5	188,7	238,5	226,1	249,7	242,7	36,51
4	327,8	324,6	335,9	347,7	318,4	296,7	313,9	316,9	309,5	302,3	319,4	15,33
5	308,0	312,4	327,8	335,9	321,5	310,9	324,6	308,0	310,9	302,3	316,2	10,64
6	321,5	335,9	329,4	337,5	331,0	329,4	349,5	319,9	312,4	329,4	329,6	10,31
7	340,9	332,6	344,3	334,2	334,2	349,5	335,9	331,0	347,7	346,0	339,6	6,858
8	353,0	332,6	334,2	344,3	331,0	335,9	305,1	316,9	360,2	354,8	336,8	17,16
9	174,3	175,5	176,1	192,9	179,3	180,0	163,7	176,1	163,7	165,4	174,7	8,905
10	155,1	158,2	156,6	158,2	153,5	154,5	151,0	154,5	146,1	148,5	153,6	4,003
11	151,0	152,5	148,1	164,2	149,5	149,0	149,5	152,0	148,5	151,5	151,6	4,852
12	162,6	167,7	172,4	180,0	155,1	168,9	162,6	158,2	164,2	159,3	165,1	7,387
13	170,0	177,4	170,6	204,2	163,7	172,4	168,9	184,6	182,6	190,8	178,5	12,25
14	171,2	175,5	167,1	213,9	176,1	178,0	169,4	172,4	160,4	173,1	175,7	14,34
15	245,5	274,7	288,7	269,9	258,4	246,6	268,7	273,5	192,2	222,5	254,1	28,75
16	205,0	230,8	269,9	257,3	232,7	194,4	186,6	227,1	209,0	220,8	223,4	26,28
17	256,2	258,4	266,4	269,9	271,1	247,6	267,6	273,5	262,9	269,9	264,4	8,098
18	185,9	217,3	214,7	234,6	188,0	185,3	180,6	210,6	224,3	212,2	205,4	18,89
19	156,1	169,4	164,2	167,1	168,3	160,4	167,7	168,3	164,2	159,3	164,5	4,527
20	296,7	288,7	283,5	303,7	315,4	334,2	331,0	313,9	302,3	303,7	307,3	16,57
21	156,6	163,1	163,7	160,9	147,1	148,1	146,6	150,0	148,1	154,5	153,9	6,826
22	300,9	324,6	302,3	310,9	295,4	313,9	306,6	310,9	294,0	306,6	306,6	9,125
23	353,0	363,7	365,8	365,0	332,6	327,8	356,6	344,3	326,2	334,2	346,9	15,86
24	178,0	179,3	165,4	179,3	165,4	168,3	167,7	174,3	176,1	165,4	171,9	6,032
25	234,6	245,5	188,0	251,9	261,8	278,4	279,7	236,5	220,8	231,7	242,9	27,48
26	288,7	292,7	219,0	247,7	302,3	306,6	244,5	294,0	292,7	266,4	278,2	27,81
27	257,3	242,5	208,1	239,5	238,5	271,1	268,7	218,2	271,1	219,9	243,5	23,19
28	290,0	312,4	272,3	233,6	309,5	305,1	287,4	251,9	233,6	187,3	262,5	40,94
29	160,4	224,3	193,7	172,4	189,4	181,3	178,0	183,3	192,9	190,1	186,6	16,77
30	178,0	177,4	188,7	183,3	186,6	183,3	177,4	188,0	199,6	178,7	184,1	6,994
31	160,9	164,8	168,9	206,5	188,0	174,9	175,5	175,5	174,9	177,4	176,7	12,81

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – Medição do potencial de pite.

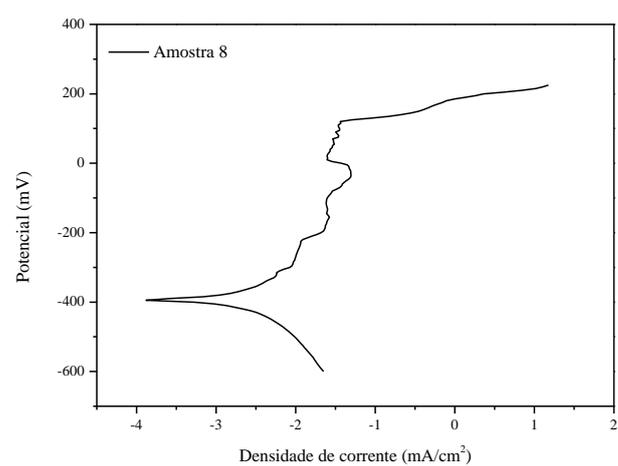
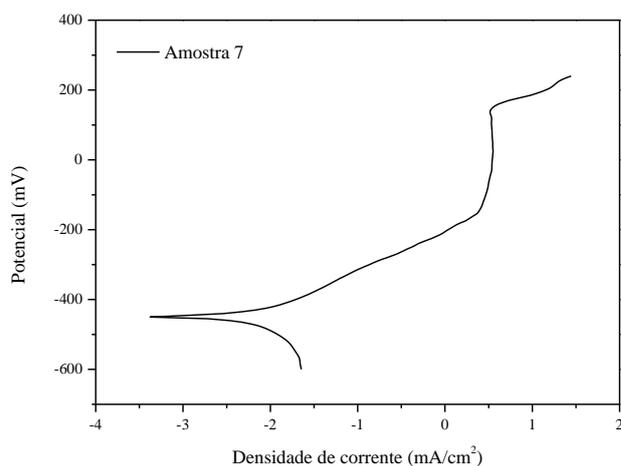
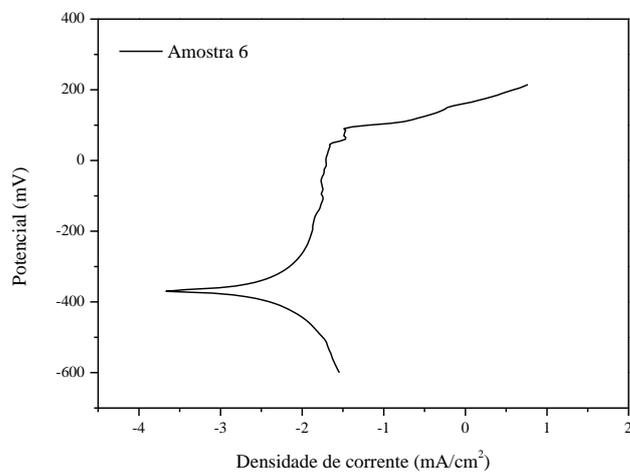
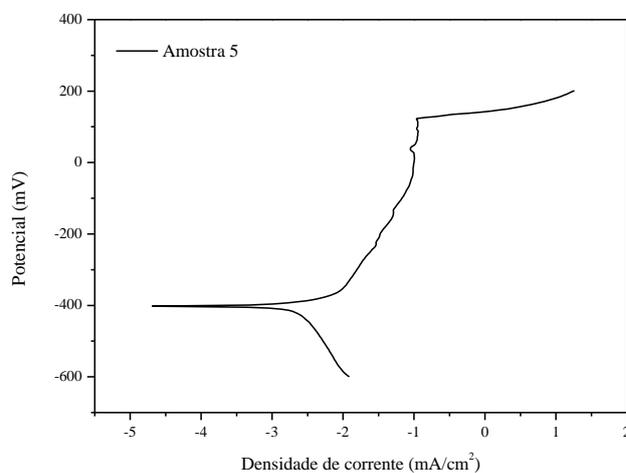
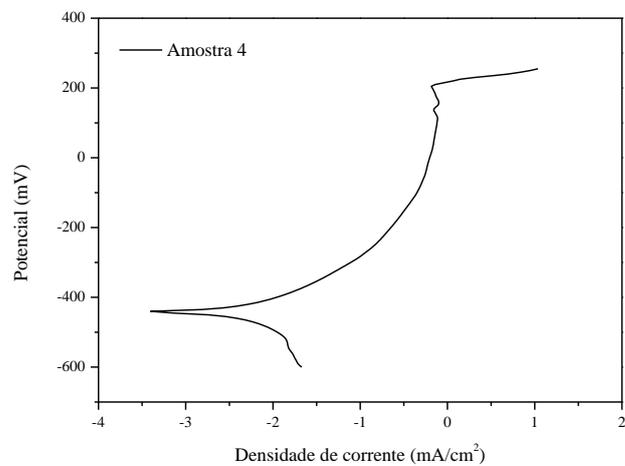
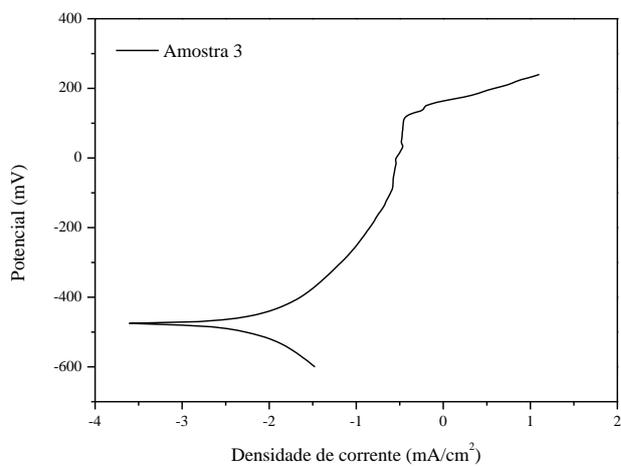
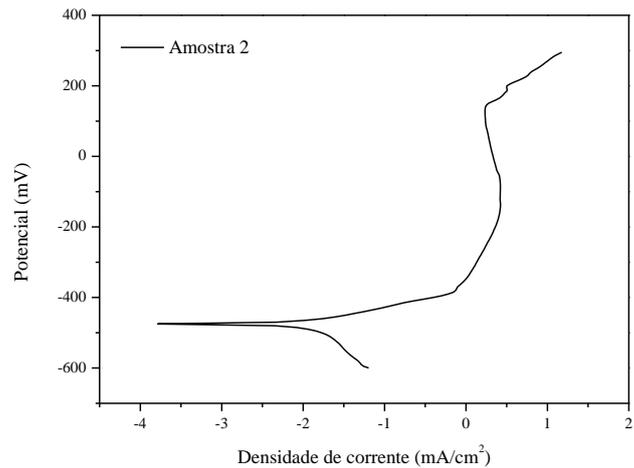
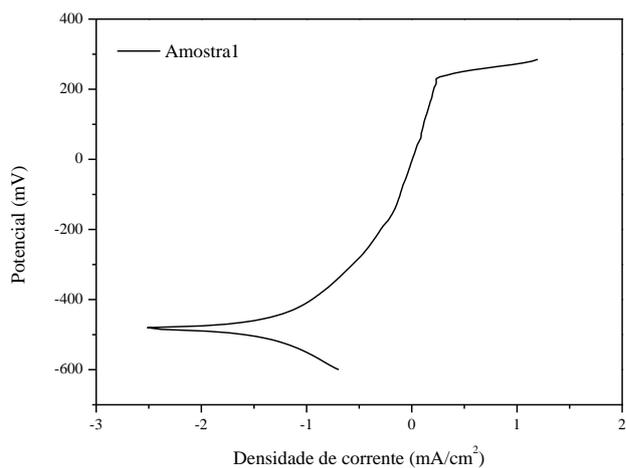
Exp.	Parâmetros				Potencial de Pite (E_{pite})			Média	Desvio-Padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	208	193	178	193	15,0
2	10,0	27,0	30,0	15,0	161	173	160	165	7,23
3	7,0	32,0	30,0	15,0	164	166	151	160	8,14
4	10,0	32,0	30,0	15,0	176	167	196	180	14,8
5	7,0	27,0	50,0	15,0	146	143	145	145	1,53
6	10,0	27,0	50,0	15,0	123	139	145	136	11,4
7	7,0	32,0	50,0	15,0	155	163	147	155	8,00
8	10,0	32,0	50,0	15,0	135	108	135	126	15,6
9	7,0	27,0	30,0	25,0	253	238	275	255	18,6
10	10,0	27,0	30,0	25,0	260	264	273	266	6,66
11	7,0	32,0	30,0	25,0	204	211	206	204	2,52
12	10,0	32,0	30,0	25,0	259	218	249	242	21,4
13	7,0	27,0	50,0	25,0	164	193	167	177	14,0
14	10,0	27,0	50,0	25,0	245	277	255	259	16,4
15	7,0	32,0	50,0	25,0	158	147	154	155	7,37
16	10,0	32,0	50,0	25,0	167	162	165	165	2,52
17	5,5	29,5	40,0	20,0	224	216	214	218	5,29
18	11,5	29,5	40,0	20,0	181	218	189	190	9,53
19	8,5	24,5	40,0	20,0	219	219	224	221	2,89
20	8,5	34,5	40,0	20,0	141	136	155	144	9,85
21	8,5	29,5	20,0	20,0	273	268	283	275	7,64
22	8,5	29,5	60,0	20,0	138	130	115	128	11,7
23	8,5	29,5	40,0	10,0	132	146	135	138	7,37
24	8,5	29,5	40,0	30,0	267	251	247	260	8,18
25	8,5	29,5	40,0	20,0	245	213	211	223	19,1
26	8,5	29,5	40,0	20,0	222	226	229	226	3,51
27	8,5	29,5	40,0	20,0	142	145	131	139	7,37
28	8,5	29,5	40,0	20,0	256	247	212	238	23,2
29	8,5	29,5	40,0	20,0	257	256	233	249	13,6
30	8,5	29,5	40,0	20,0	217	225	215	219	5,29
31	8,5	29,5	40,0	20,0	237	211	236	228	14,7

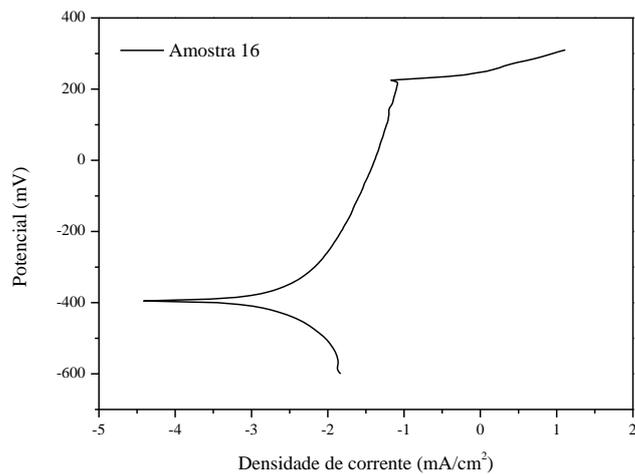
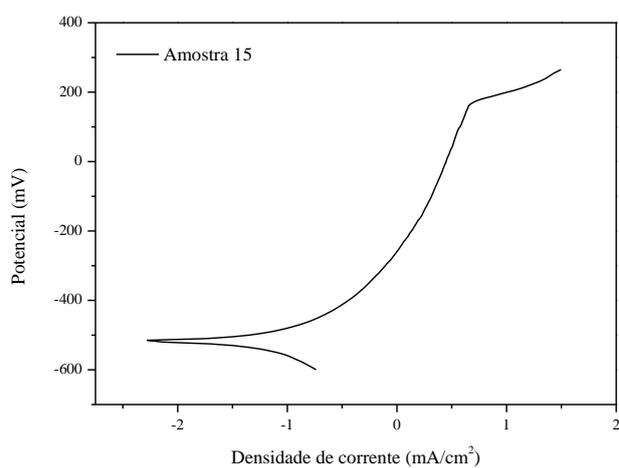
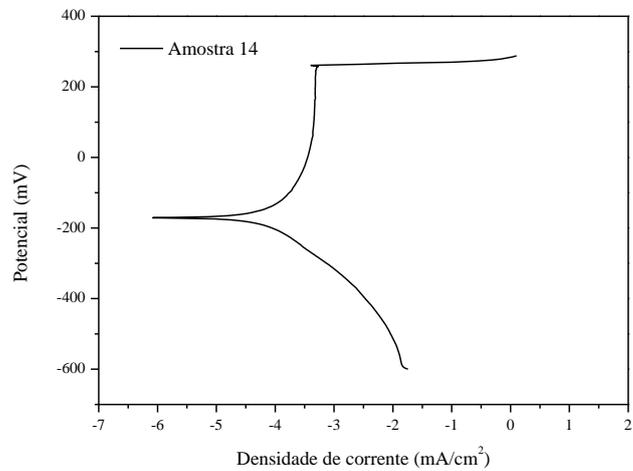
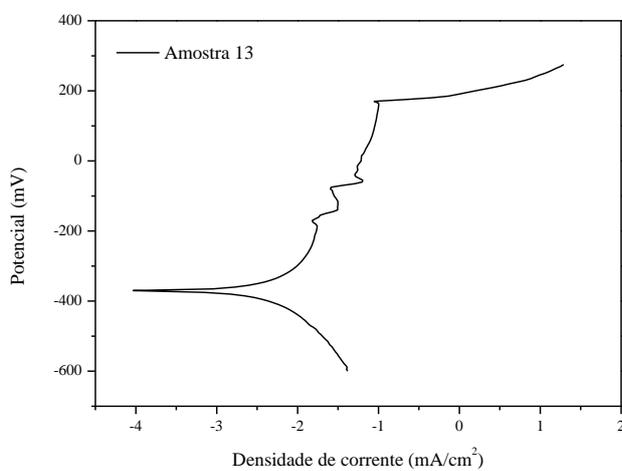
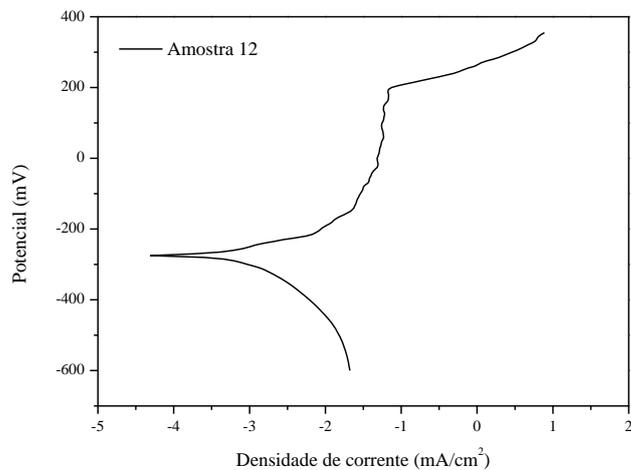
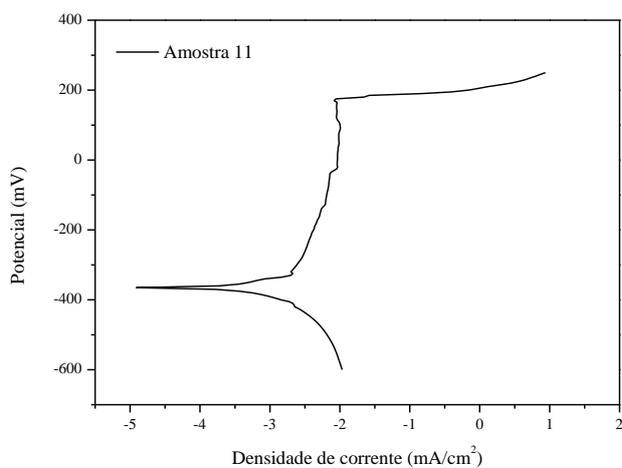
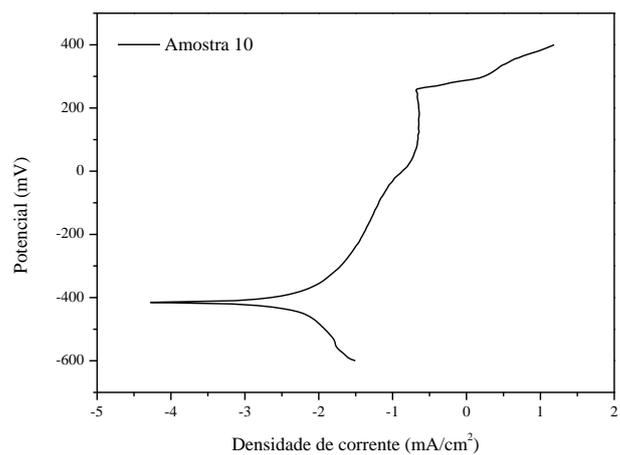
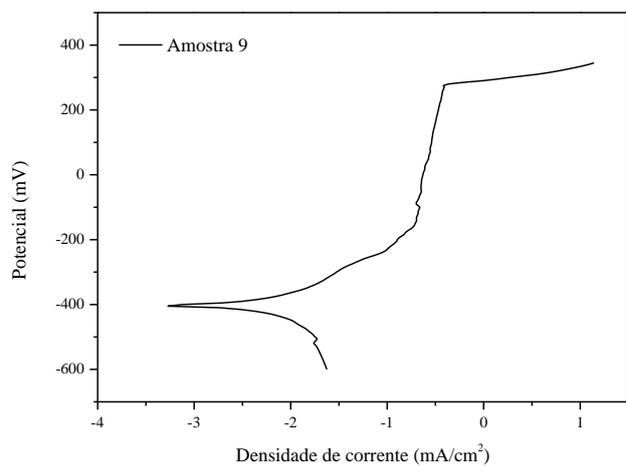
Fonte: Autor.

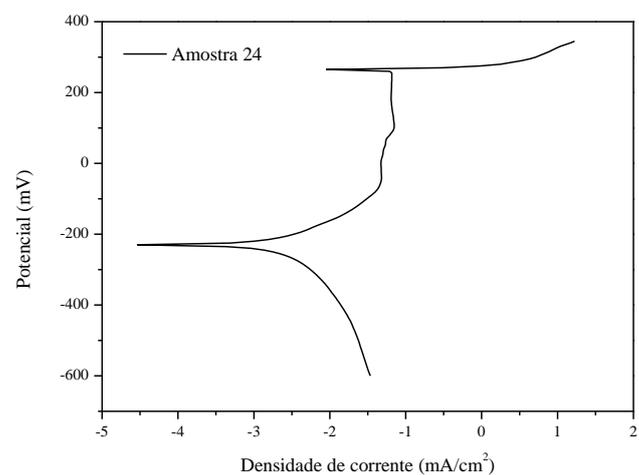
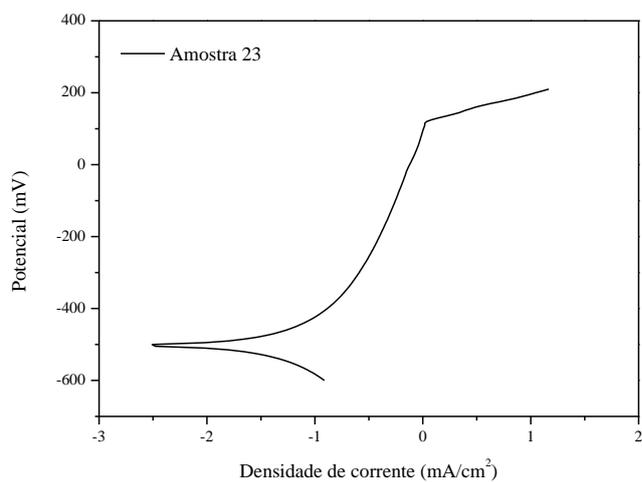
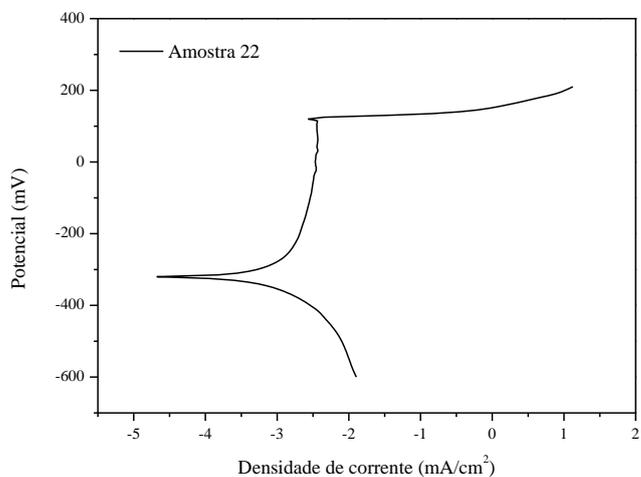
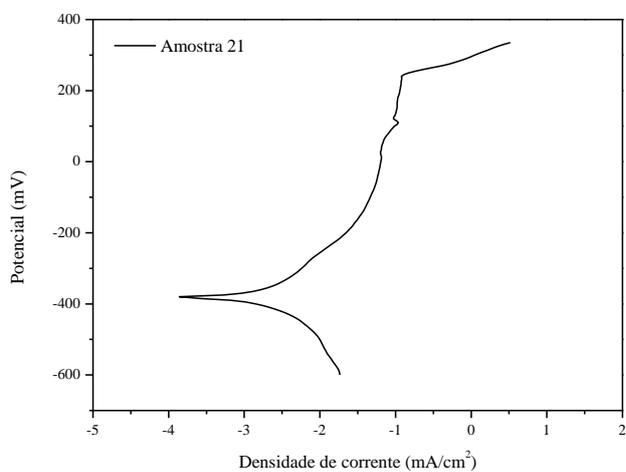
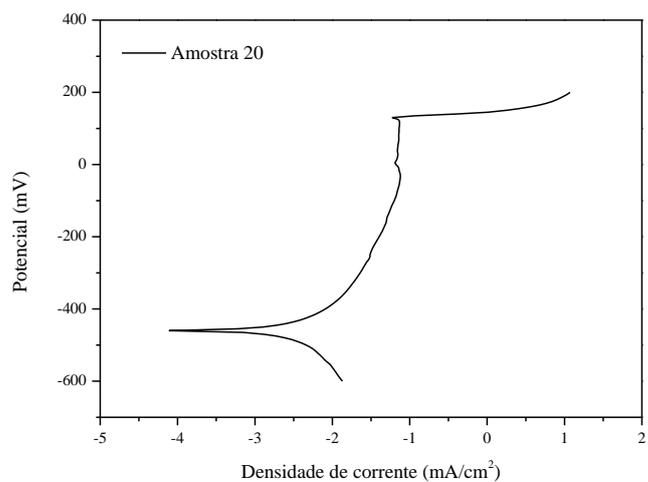
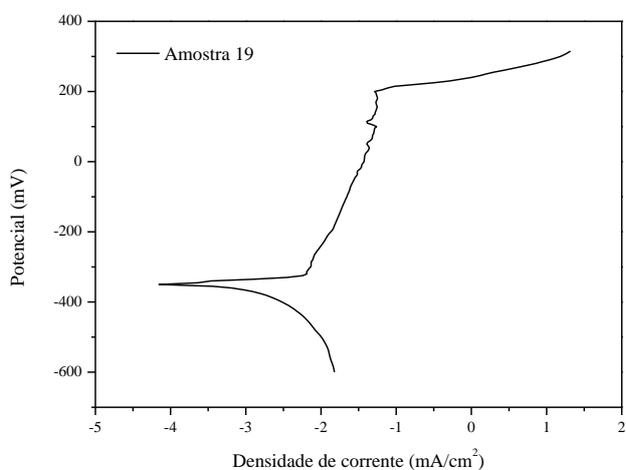
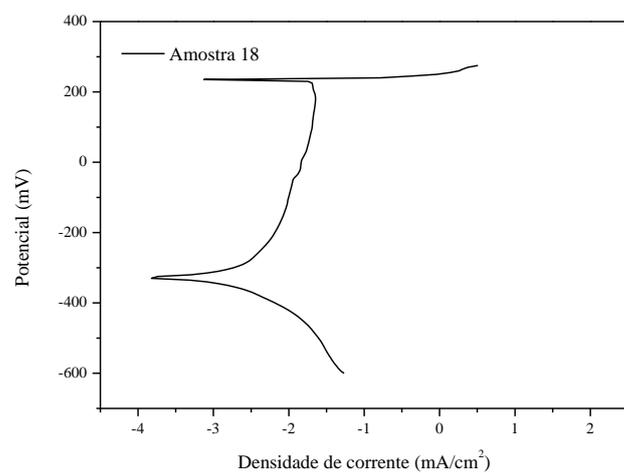
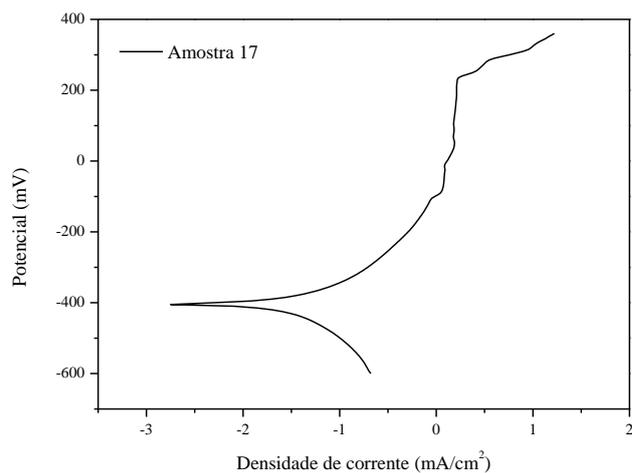
APÊNDICE C – Medição do grau de sensitização.

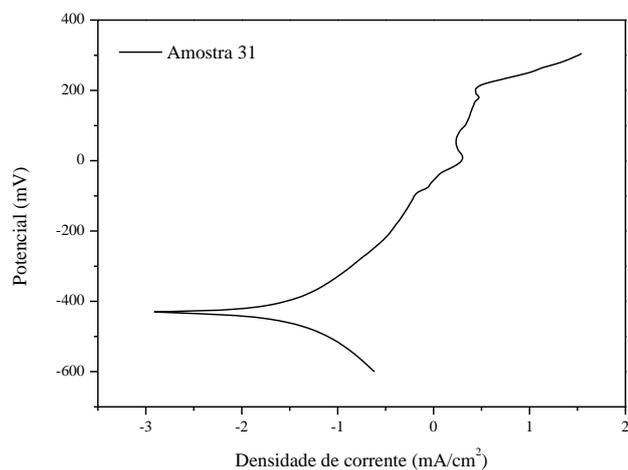
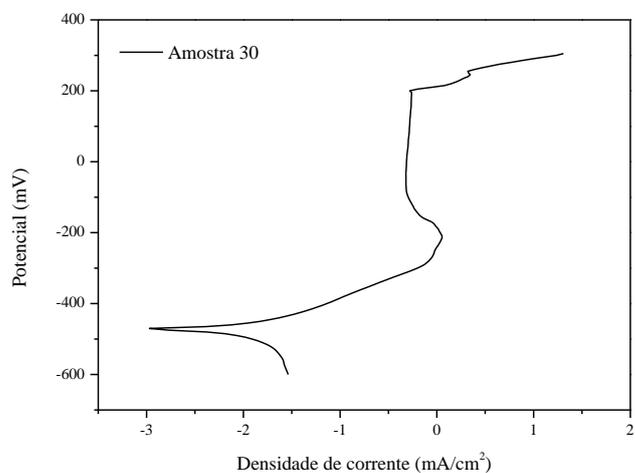
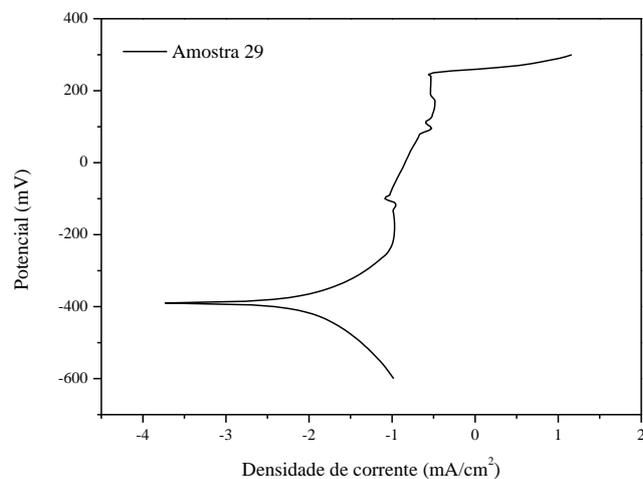
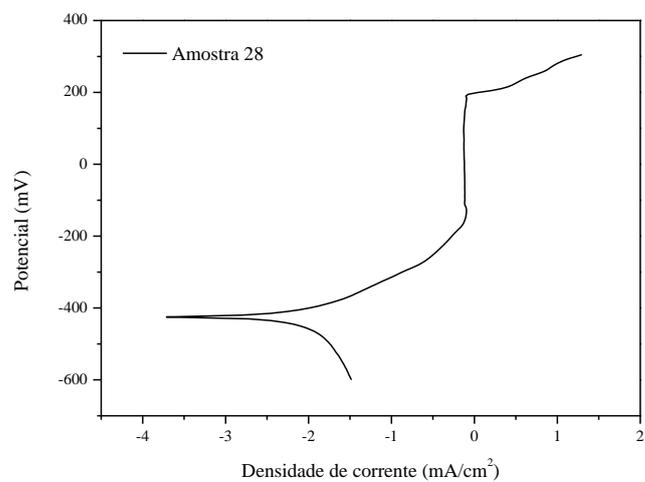
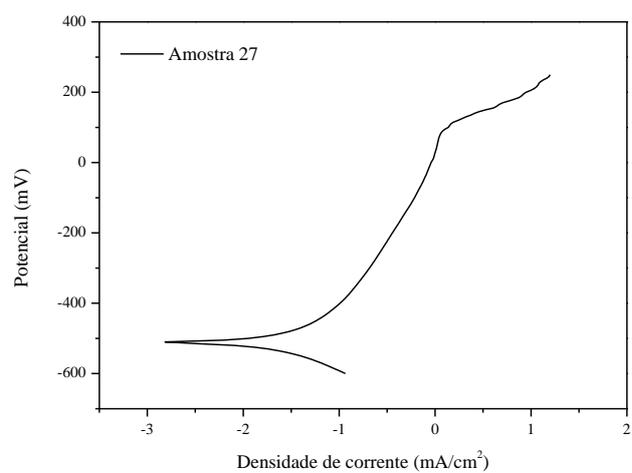
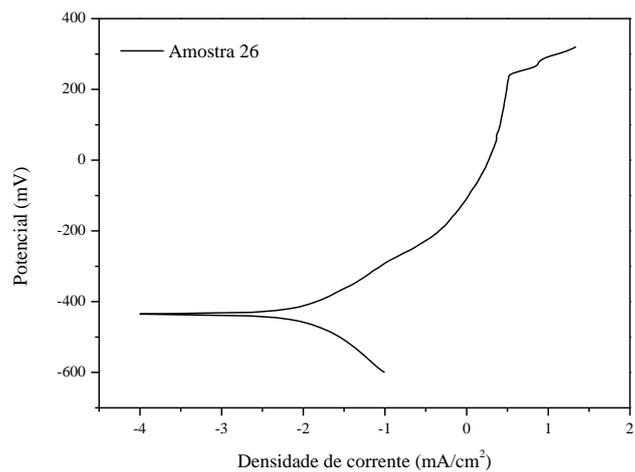
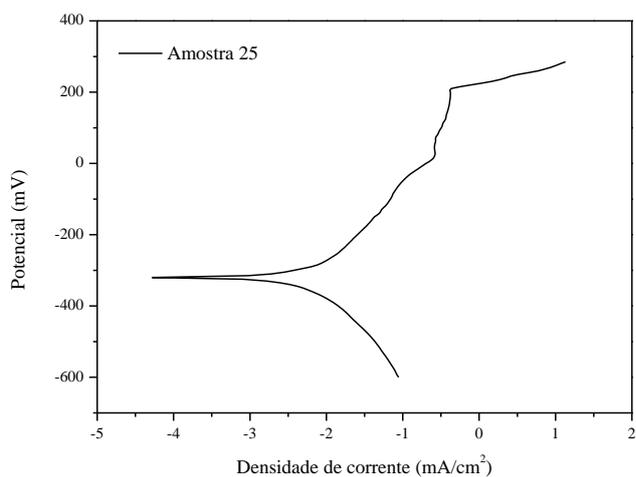
Exp.	Parâmetros				Grau de Sensitização (GS)			Média	Desvio-Padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	0,145	0,137	0,131	0,138	0,007
2	10,0	27,0	30,0	15,0	0,060	0,060	0,055	0,094	0,002
3	7,0	32,0	30,0	15,0	0,394	0,355	0,399	0,383	0,024
4	10,0	32,0	30,0	15,0	0,681	0,706	0,706	0,698	0,014
5	7,0	27,0	50,0	15,0	0,848	0,921	0,858	0,876	0,039
6	10,0	27,0	50,0	15,0	0,458	0,476	0,461	0,491	0,025
7	7,0	32,0	50,0	15,0	0,900	0,820	0,890	0,870	0,043
8	10,0	32,0	50,0	15,0	0,879	0,862	0,843	0,891	0,019
9	7,0	27,0	30,0	25,0	0,008	0,002	0,005	0,005	0,002
10	10,0	27,0	30,0	25,0	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001
11	7,0	32,0	30,0	25,0	0,073	0,033	0,049	0,052	0,019
12	10,0	32,0	30,0	25,0	0,004	0,006	0,003	0,005	0,002
13	7,0	27,0	50,0	25,0	0,081	0,115	0,089	0,095	0,018
14	10,0	27,0	50,0	25,0	0,007	0,002	0,002	0,004	0,003
15	7,0	32,0	50,0	25,0	0,543	0,538	0,604	0,518	0,020
16	10,0	32,0	50,0	25,0	0,172	0,144	0,191	0,169	0,024
17	5,5	29,5	40,0	20,0	0,287	0,328	0,342	0,318	0,029
18	11,5	29,5	40,0	20,0	0,165	0,111	0,143	0,118	0,022
19	8,5	24,5	40,0	20,0	0,105	0,082	0,055	0,081	0,025
20	8,5	34,5	40,0	20,0	0,907	0,964	0,894	0,876	0,014
21	8,5	29,5	20,0	20,0	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001
22	8,5	29,5	60,0	20,0	0,723	0,689	0,657	0,689	0,033
23	8,5	29,5	40,0	10,0	0,879	0,871	0,930	0,893	0,032
24	8,5	29,5	40,0	30,0	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001
25	8,5	29,5	40,0	20,0	0,436	0,400	0,445	0,369	0,023
26	8,5	29,5	40,0	20,0	0,361	0,417	0,347	0,375	0,037
27	8,5	29,5	40,0	20,0	0,240	0,296	0,325	0,287	0,043
28	8,5	29,5	40,0	20,0	0,220	0,232	0,178	0,236	0,012
29	8,5	29,5	40,0	20,0	0,177	0,193	0,184	0,185	0,008
30	8,5	29,5	40,0	20,0	0,198	0,110	0,154	0,173	0,023
31	8,5	29,5	40,0	20,0	0,123	0,179	0,204	0,180	0,017

Fonte: Autor.

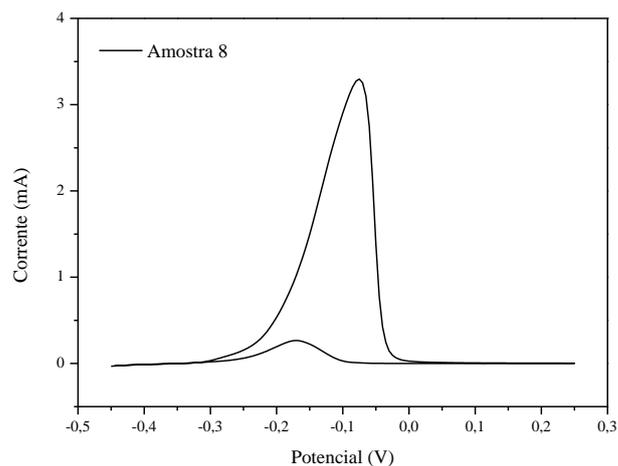
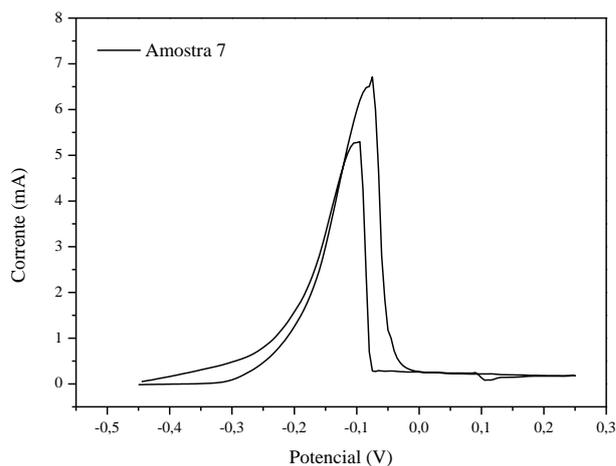
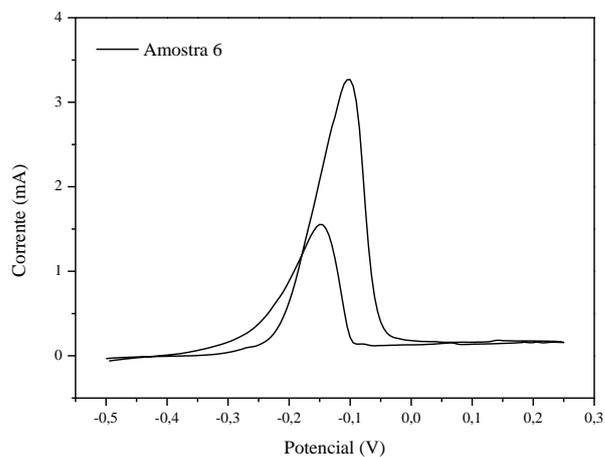
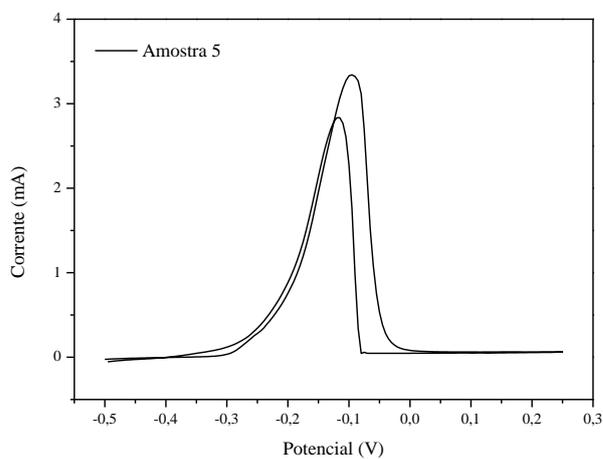
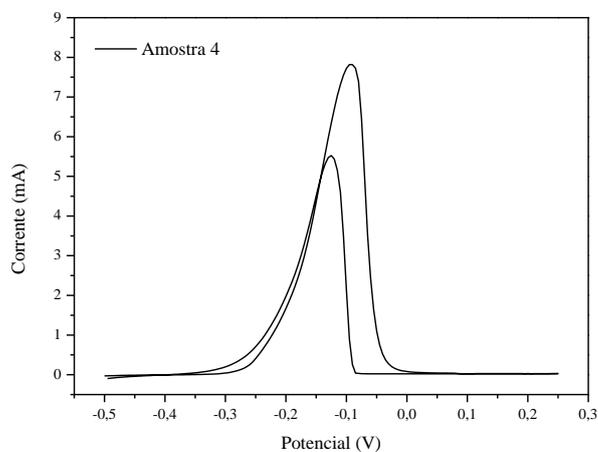
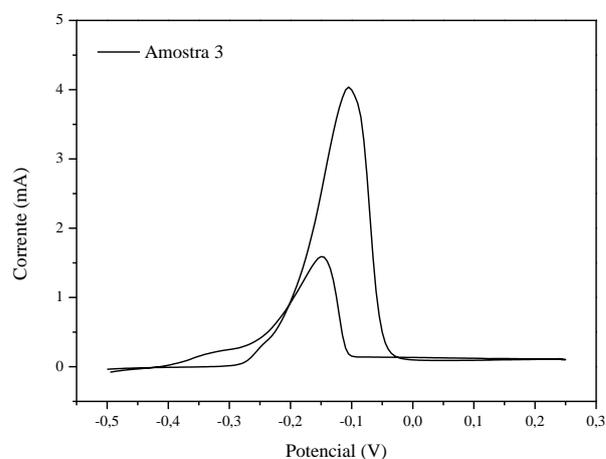
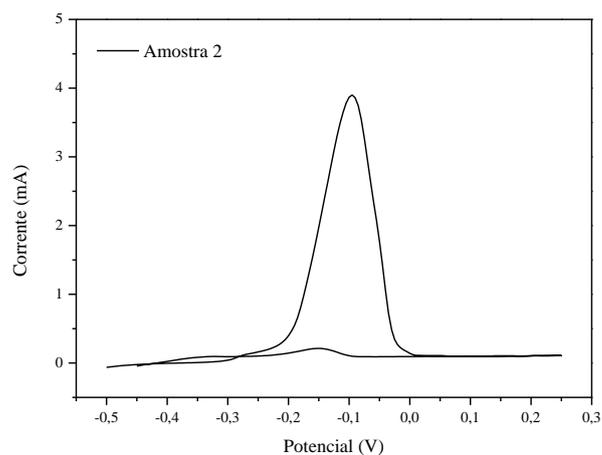
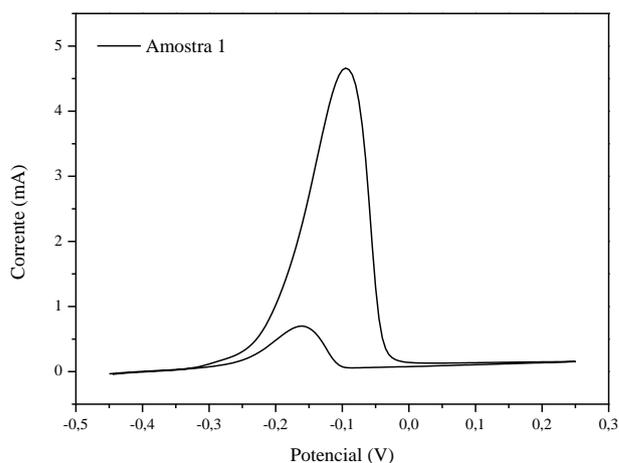
APÊNDICE D - Curvas de polarização anódica do revestimento em solução de 3,5%p. NaCl.

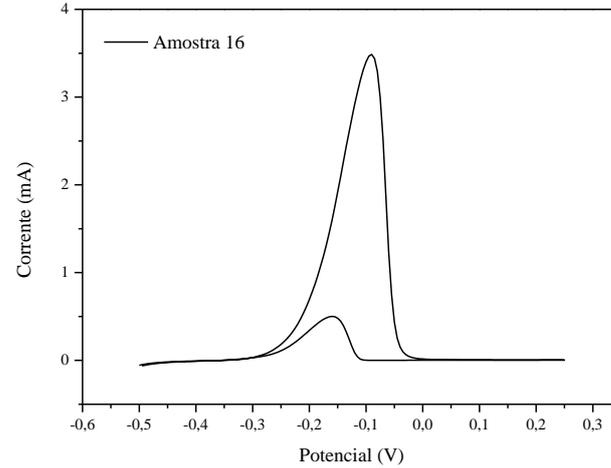
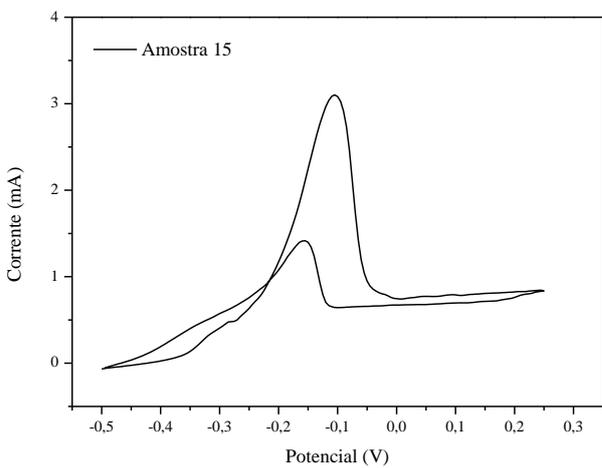
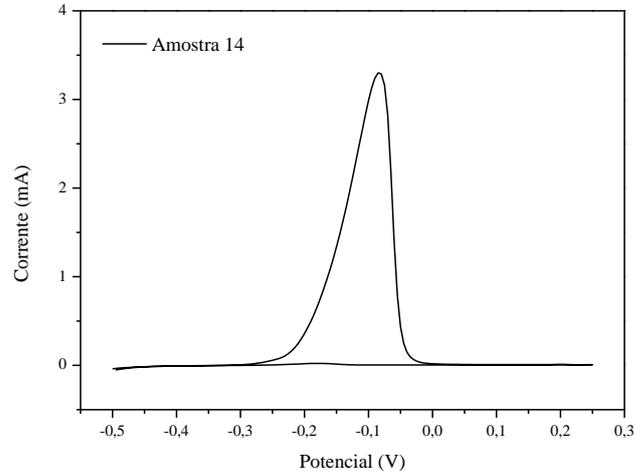
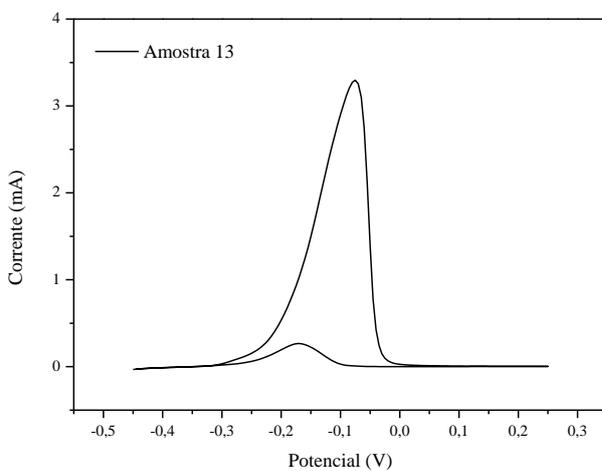
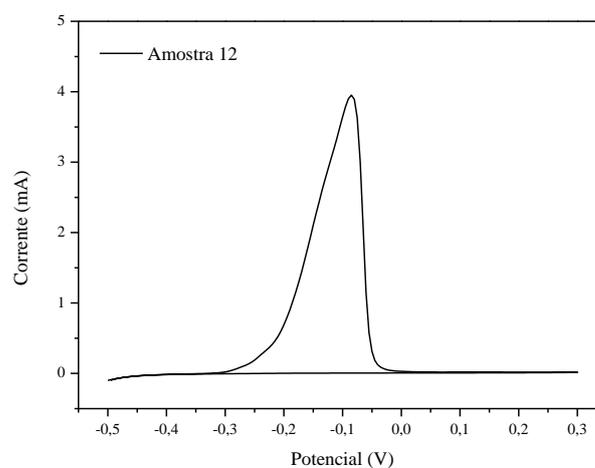
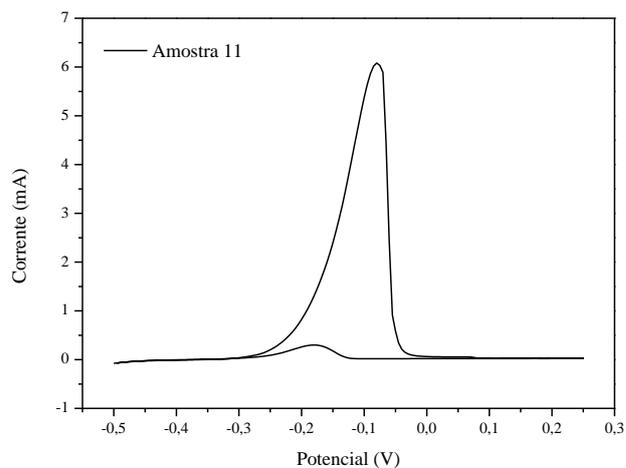
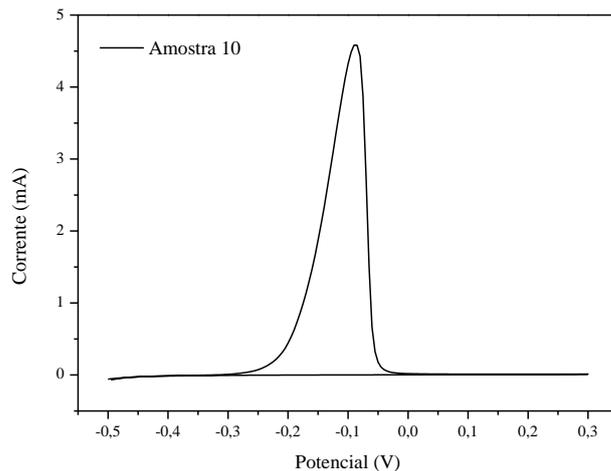
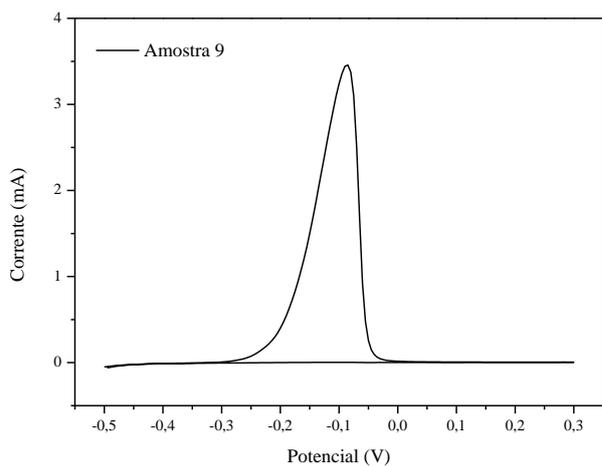


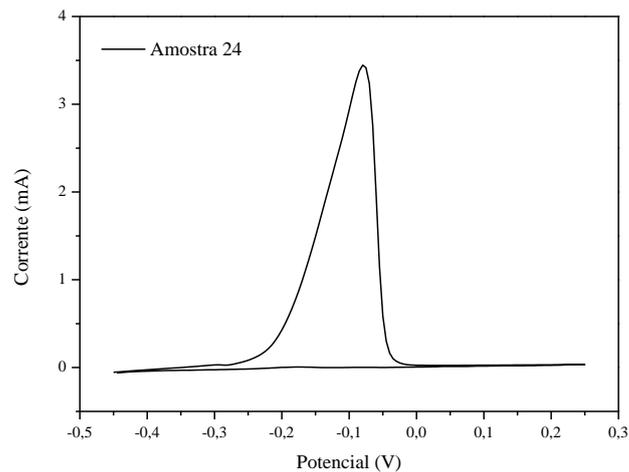
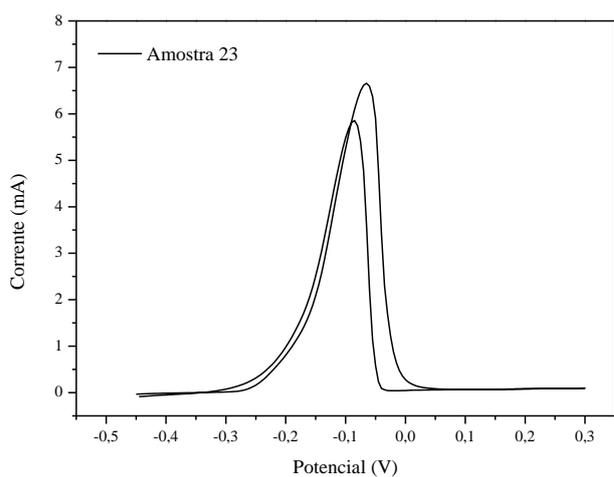
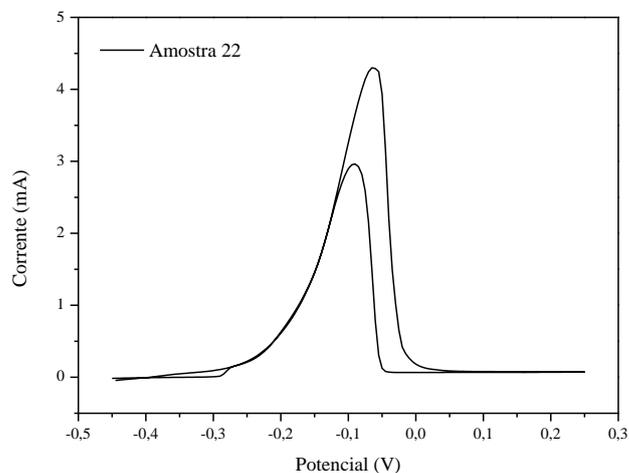
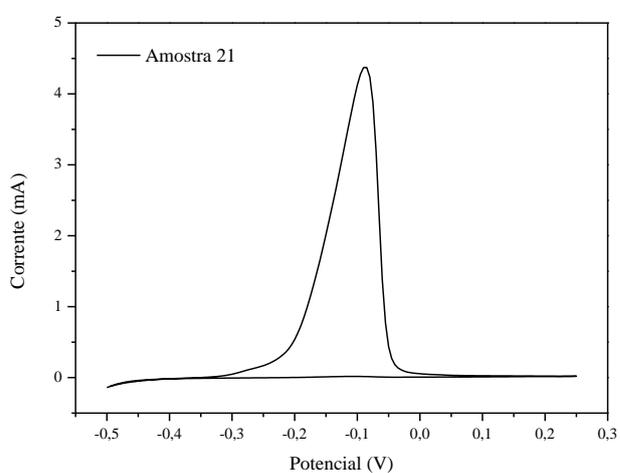
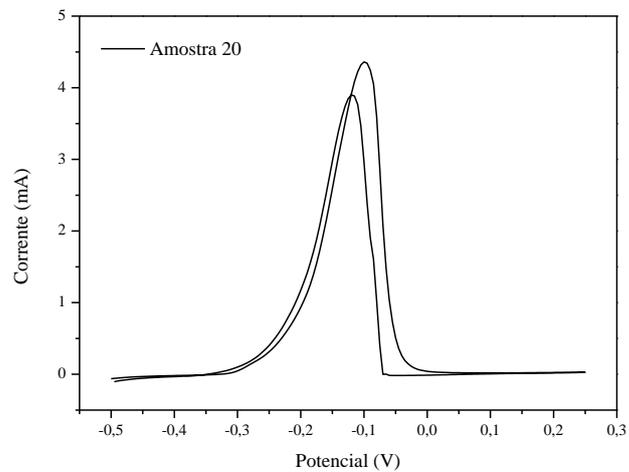
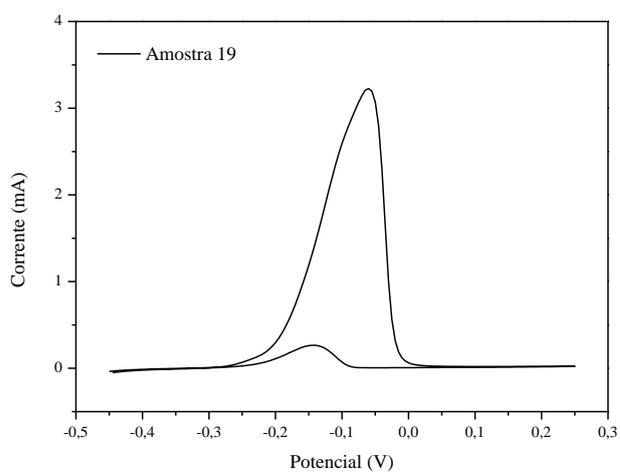
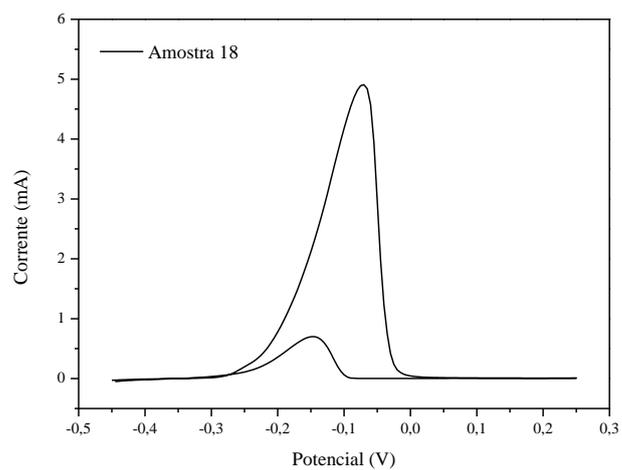
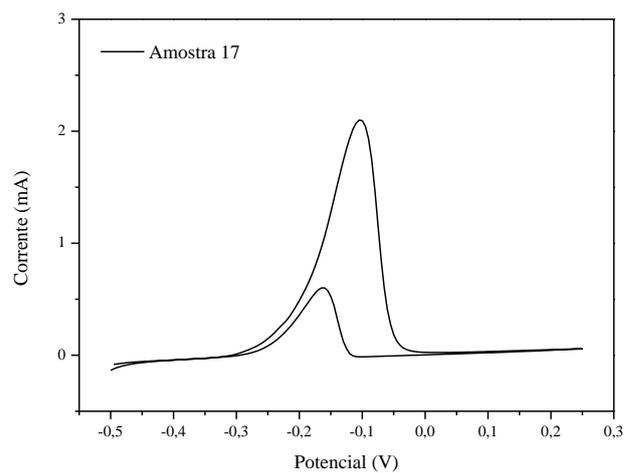


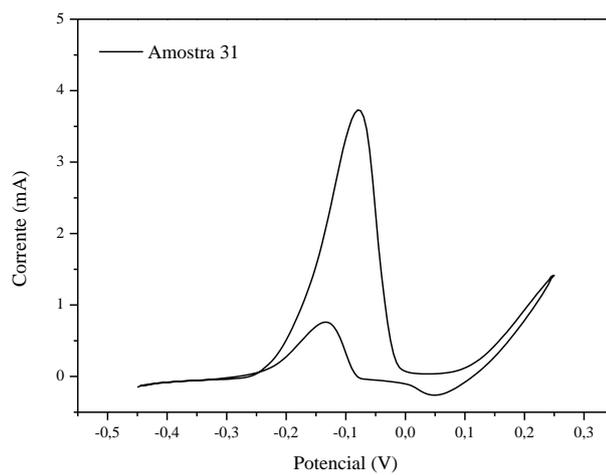
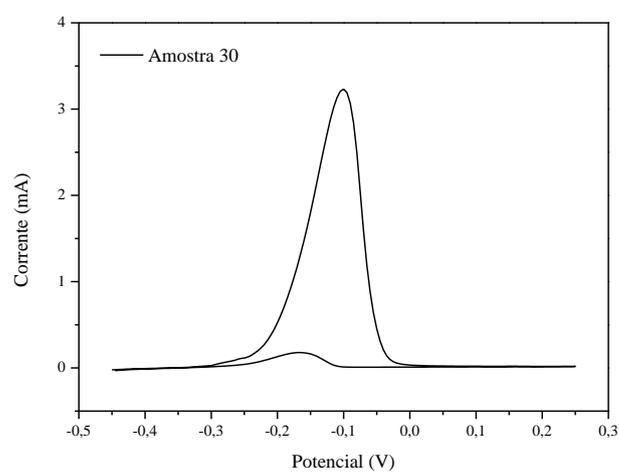
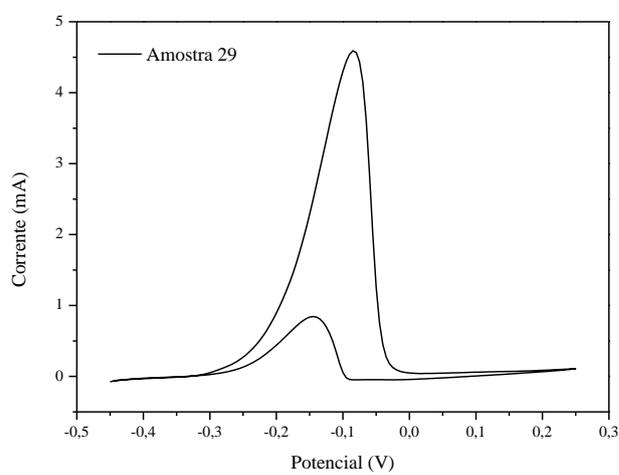
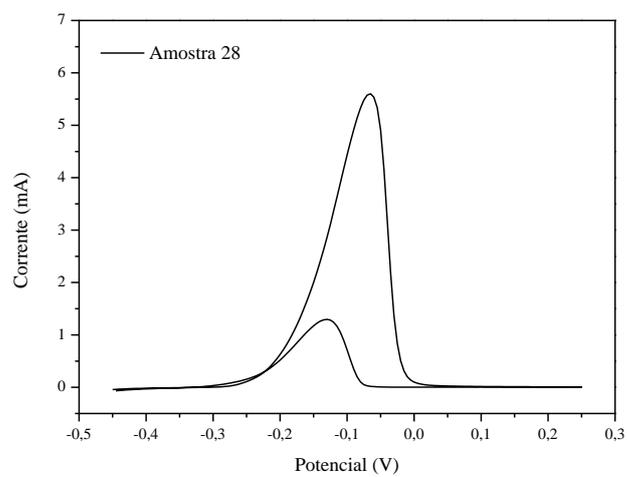
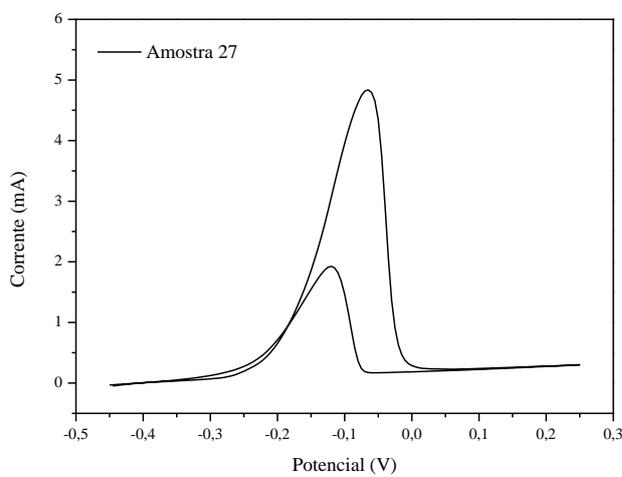
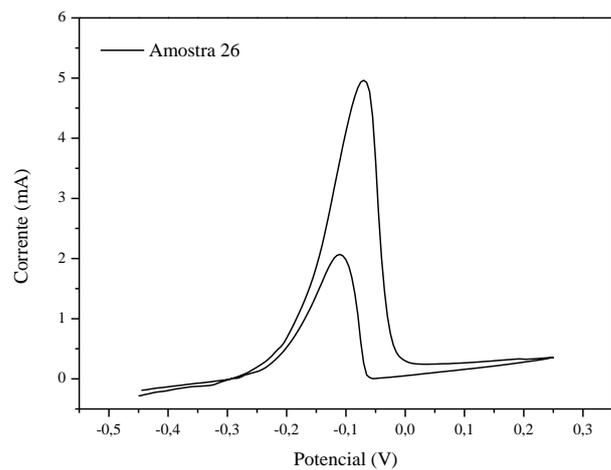
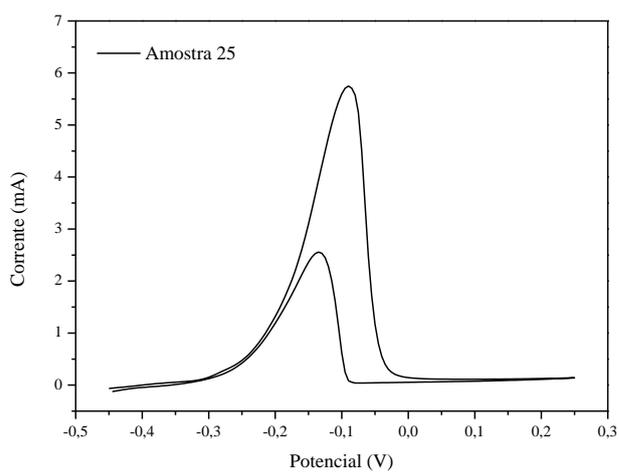


APÊNDICE E- Curvas obtidas pelo ensaio DL-EPR em solução de 0,5 M H₂SO₄ + 0,01 M KSCN para os revestimentos.









ANEXO I- Cálculo da diluição realizado pelo Dr. José Henrique de Freitas Gomes.

Exp.	Parâmetros				Diluição (%)				Média	Desvio-Padrão
	Va	T	Vs	N	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4		
1	7,0	27,0	30,0	15,0	22,87	27,92	29,33	26,63	26,44%	0,032
2	10,0	27,0	30,0	15,0	22,74	27,68	26,75	26,12	25,82%	0,022
3	7,0	32,0	30,0	15,0	28,61	30,43	34,11	32,82	31,49%	0,025
4	10,0	32,0	30,0	15,0	33,66	32,30	34,01	25,01	31,25%	0,042
5	7,0	27,0	50,0	15,0	38,29	37,63	34,35	34,62	36,22%	0,020
6	10,0	27,0	50,0	15,0	34,89	30,97	33,88	35,06	33,69%	0,019
7	7,0	32,0	50,0	15,0	32,51	38,56	36,55	40,86	37,12%	0,035
8	10,0	32,0	50,0	15,0	40,85	38,89	40,02	44,55	41,08%	0,025
9	7,0	27,0	30,0	25,0	14,19	26,51	26,55	22,57	22,46%	0,058
10	10,0	27,0	30,0	25,0	21,73	15,81	16,52	19,22	18,32%	0,027
11	7,0	32,0	30,0	25,0	21,20	24,53	25,79	23,33	23,71%	0,020
12	10,0	32,0	30,0	25,0	19,26	23,35	20,63	24,58	21,96%	0,024
13	7,0	27,0	50,0	25,0	25,57	24,98	28,24	21,04	24,96%	0,030
14	10,0	27,0	50,0	25,0	25,41	23,03	24,91	19,87	23,31%	0,025
15	7,0	32,0	50,0	25,0	28,29	25,88	30,16	30,76	28,77%	0,022
16	10,0	32,0	50,0	25,0	27,37	31,38	30,80	31,21	30,19%	0,019
17	5,5	29,5	40,0	20,0	38,58	28,46	29,66	29,53	31,56%	0,047
18	11,5	29,5	40,0	20,0	26,59	31,09	32,16	33,96	30,95%	0,031
19	8,5	24,5	40,0	20,0	16,97	26,56	27,77	20,04	22,84%	0,052
20	8,5	34,5	40,0	20,0	36,39	37,94	32,91	35,07	35,58%	0,021
21	8,5	29,5	20,0	20,0	17,68	17,25	21,98	17,42	18,58%	0,023
22	8,5	29,5	60,0	20,0	34,70	34,96	32,55	40,92	35,78%	0,036
23	8,5	29,5	40,0	10,0	37,76	37,04	44,39	42,58	40,44%	0,036
24	8,5	29,5	40,0	30,0	23,10	28,03	22,33	23,17	24,16%	0,026
25	8,5	29,5	40,0	20,0	31,35	34,96	28,78	29,11	31,05%	0,028
26	8,5	29,5	40,0	20,0	27,34	34,93	31,37	33,03	31,67%	0,032
27	8,5	29,5	40,0	20,0	28,02	34,58	30,76	30,15	30,88%	0,027
28	8,5	29,5	40,0	20,0	32,74	32,63	33,23	32,72	32,83%	0,003
29	8,5	29,5	40,0	20,0	28,33	33,35	30,65	27,63	29,99%	0,026
30	8,5	29,5	40,0	20,0	29,89	31,74	30,23	32,48	31,09%	0,012
31	8,5	29,5	40,0	20,0	28,32	31,36	35,73	28,65	31,02%	0,034

Fonte: GOMES (2010).