



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**



RAFAEL BARBOSA CARNEIRO DOS SANTOS

**DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO AISI 317L CONTRA CORROSÃO POR
PROCESSO GTAW MECANIZADO COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO**

CAMPINA GRANDE

2022

RAFAEL BARBOSA CARNEIRO DOS SANTOS

**DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO AISI 317L CONTRA CORROSÃO POR
PROCESSO GTAW MECANIZADO COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Linha de pesquisa: Processos Mecânicos Metalúrgicos

Orientador: Dr. Renato Alexandre Costa de Santana

Coorientador: Dr. Marcos Mesquita da Silva

CAMPINA GRANDE – PB

2022

S337d

Santos, Rafael Barbosa Carneiro dos.

Deposição de revestimento AISI 317L contra corrosão por processo GTAW mecanizado com adição de arame frio / Rafael Barbosa Carneiro dos Santos. - Campina Grande, 2022.

115 f. il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Renato Alexandre Costa de Santana, Prof. Dr. Marcos Mesquita da Silva."

Referências.

1. Soldagem de Revestimento. 2. AISI 317L. 3. Corrosão. 4. GTAW-MAF. 5. Aço Inoxidável Austenítico. I. Santana, Renato Alexandre Costa de. II. Silva, Marcos Mesquita da. III. Título.

CDU 621.791(043)

DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO AISI 317L CONTRA CORROSÃO POR PROCESSO GTAW
MECANIZADO COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO

RAFAEL BARBOSA CARNEIRO DOS SANTOS

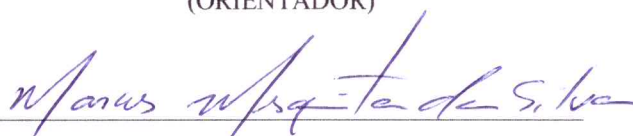
Dissertação Aprovada em 23/12/2021 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Prof. Dr. RENATO ALEXANDRE COSTA DE SANTANA

CPF: 866.886.264-20

(ORIENTADOR)



Prof. Dr. MARCOS MESQUITA DA SILVA

CPF: 046.578.894-78

(CO-ORIENTADOR)



Prof. Dr. THEOPHILO MOURA MACIEL

CPF: 132.648.504-00

(EXAMINADOR EXTERNO)



Prof. Dr. RAPHAEL HENRIQUE FALCÃO DE MELO

CPF: 071.160.154-26

(EXAMINADOR EXTERNO)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada mãe.

A sua luta pela vida me faz enxergar como é precioso o dom de viver.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar vivo, me sentir vivo e encontrar prazer em viver.

Agradeço a toda minha família por estar ao meu lado em cada decisão, em cada momento do meu existir. Minha noiva, meus pais, irmãos, avós, tios e tias que não acreditam somente nas minhas ideias ou no meu potencial. Acreditam em mim.

Agradeço aos meus professores que, mais do que me orientar, foram compreensão, sabedoria e sustento durante a caminhada. Agradeço ao Professor Theophilo Maciel, quem primeiro me orientou e despertou em mim o interesse pela academia. Agradeço ao Professor Renato Santana por ter me acolhido com tanto empenho ao longo da caminhada e por me mostrar que a pesquisa científica é uma mistura de excelência e emoção. Agradeço ao Professor Marcos Mesquita por ter acrescentado na minha vida uma experiência de humanidade, humildade, entrega e leveza. Te agradeço, Professor Marcos, por todas as horas compartilhadas em laboratório, por todo o apoio que transcende a pesquisa, por toda a compreensão e flexibilização. O senhor me deu, ao longo desses anos, uma enorme lição de vida. Serei eternamente grato.

Agradeço a todos os demais professores e colegas que auxiliaram e tanto contribuíram nessa caminhada: Professor Raphael, Professor Luiz, Jomar, João Pedro, Vinicius, Brenda, Mathews e Arthur. Meu muito obrigado.

Por fim, agradeço a Bolognesi Energia (empresa na qual atuo como Engenheiro Corporativo) por ter concordado e me dado todo o apoio para cursar meu mestrado. Agradeço especialmente aos gestores que enxergaram a importância dessa pesquisa na minha carreira e me deram todo o suporte para continuar firme.

A todos que contribuíram nessa tão suada conquista e contribuição científica, meu muito obrigado.

“Comecei a pensar: que eu me organizando, posso desorganizar.”

Francisco de Assis (Chico Science)

DOS SANTOS, R.B.C. Deposição de Revestimento AISI 317L Contra Corrosão por Processo GTAW Mecanizado com Adição de Arame Frio. 115f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)**, Universidade Federal de Campina Grande. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2022.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo investigar a resistência à corrosão de revestimentos de aço inoxidável austenítico aplicados em substrato de aço carbono via processo GTAW mecanizado com adição de arame frio (GTAW-MAF). As soldagens foram realizadas utilizando como o metal de adição arames do aço AISI 317L, com diâmetro de 1,2mm. Inicialmente, foi realizado um estudo sistemático de cordões de solda isolados a fim de investigar o efeito dos parâmetros de soldagem na geometria e diluição desses cordões. Para isso, foi traçado um planejamento de experimentos fatorial linear com três variáveis independentes (corrente, velocidade de alimentação e distância eletrodo/peça) além da adição de pontos centrais e axiais (2^3+6+3), totalizando 17 ensaios. As variáveis respostas analisadas foram diluição (%), molhabilidade ($^\circ$), altura e largura dos cordões (mm), selecionando três experimentos com a melhor viabilidade operacional para serem utilizados no processo de revestimento. No processo de soldagem de revestimentos utilizou-se duas técnicas: com e sem preaquecimento do substrato. A temperatura de preaquecimento utilizada foi de 150 $^\circ$ C. Para os cordões isolados, obteve-se alturas entre 1,87 e 5,03mm, larguras entre 6,79 e 13,03mm, molhabilidades entre 51,60 e 133,65 $^\circ$ e diluições entre 5,65 e 47,82%. O preaquecimento mostrou-se eficaz na diminuição de descontinuidades entre cordões e conseguiu-se desenvolver uma técnica satisfatória e replicável para a deposição de revestimento AISI 317L via processo GTAW-MAF. Verificou-se que o processo de deposição utilizado conferiu revestimentos com composição química semelhantes às do material de adição utilizado e que os melhores resultados de resistência à corrosão e diluição se deram ao utilizar correntes de soldagem acima de 220A, velocidade de alimentação entre 4m/min e 5m/min e distância do eletrodo para a peça de 10mm. O revestimento R2T2 apresentou bons resultados de diluição (10,38%), resistência à polarização 2,8x maior em relação ao substrato, pouca presença de inclusões e boa regularidade operacional na deposição dos cordões com baixa presença de descontinuidades.

Palavras-chave: Soldagem de Revestimento, Corrosão, GTAW-MAF, Aço Inoxidável Austenítico.

DOS SANTOS, R.B.C. Deposition of Coating AISI 317L Against Corrosion by Mechanized GTAW Process with Cold Wire Addition. 115f. **Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering)**, Federal University of Campina Grande. Graduate program in Mechanical Engineering. Campina Grande, 2022.

ABSTRACT

The present work aims to investigate the corrosion resistance of austenitic stainless steel coatings applied on carbon steel substrate via mechanized GTAW process with the addition of cold wire (GTAW-MAF). The welds were carried out using AISI 317L steel wires with a diameter of 1.2mm as the filler metal. For the isolated welding beads, a linear factorial design experiment was designed with three independent variables (current, feed speed and electrode/part distance) and with the addition of central and axial points (2^3+6+3), totaling 17 tests . The response variables analyzed were dilution (%), wettability ($^\circ$), height and width of beads (mm), selecting the three parameters with the best operational feasibility to be used in the coating process. In the welding coatings process, two techniques were used: with and without substrate preheating. Preheating proved to be effective in reducing discontinuities between weld beads and it was possible to develop a viable and replicable technique for the deposition of AISI 317L coating via the GTAW-MAF process. It was found that the deposition process used provided coatings with chemical composition similar to those of the addition material used and that the best results in corrosion resistance and dilution were given when using welding currents above 220A, feed speed between 4m/min and 5m/min and electrode-to-part distance of 10mm. The R2T2 coating showed good dilution results (10.38%), resistance to polarization 2.8x greater in relation to the substrate, little presence of inclusions and good operational regularity in the deposition of beads with low presence of discontinuities.

Keywords: Weld Coating, Corrosion, GTAW-MAF, Austenitic Stainless Steel.

PUBLICAÇÕES

- Artigos publicados:

SANTOS, Rafael Carneiro dos et al. **EMPREGO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW MECANIZADO COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO**. Anais do I Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Diamantina (MG), Online, 2020.

VARELA, J.P.I, SANTOS, R.B.C., et al **APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE AÇO E317L ATRAVÉS DO PROCESSO GTAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO: TÉCNICAS OPERACIONAIS**. IV Conepetro, 2021.

- Capítulo de livro:

SANTOS, Rafael Barbosa Carneiro. **ANÁLISES DA GEOMETRIA, DILUIÇÃO E QUALIDADE DE REVESTIMENTOS DE AÇO AISI 317L APLICADOS PELO PROCESSO GTAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO**. In: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua (org.). Coleção desafios das engenharias: engenharia química 2. Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

- Artigo em revisão:

SANTOS, R.B.C. et al **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO GTAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO NA GEOMETRIA DE SOLDAS DEPOSITADAS COM METAL DE ADIÇÃO E317L**. Revista Materia, 2021.

- Patente depositada:

“PROCESSO PARA DEPOSIÇÃO DE CORDÕES DE SOLDA COM ELEVADA ESTABILIDADE ATRAVÉS DA SOLDAGEM TIG COM ARAME FRIO”.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de soldagem: (a) por pressão; (b) por fusão.	22
Figura 2 - Equipamentos para soldagem GTAW.	23
Figura 3 - Revestimento de aço inoxidável austenítico sobre aço carbono. (a) Seções transversal e longitudinal. (b) Seção transversal com detalhe indicando a extensão da ZTA (EZTA).	26
Figura 4 - Princípio de operação da soldagem de revestimento.	27
Figura 5 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda.	28
Figura 6 - Representação da camada passiva de óxidos.	29
Figura 7 - Representação da camada passiva de óxidos.	30
Figura 8 - Diagrama de Schaeffler.	31
Figura 9 - Esquema mostrando um contorno de grão com precipitado de carboneto de cromo e, no entorno dos precipitados, uma região pobre em carbono.	32
Figura 10 - Regiões da ZF: (A) região misturada; (B) região não misturada; (C) região de fusão parcial.	34
Figura 11 - Efeito do nível de corrente de soldagem no perfil do cordão soldado: (a) corrente excessivamente baixa; (b) corrente excessivamente alta; (c) corrente recomendada.	36
Figura 12 - Áreas para medida da diluição na seção transversal de um cordão.	37
Figura 13 - Exemplos de morfologias da ferrita delta na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos.	39
Figura 14 - Diagrama de Delong.	40
Figura 15 - Formas de corrosão.	41
Figura 16 - Representação do perfil de concentração de cromo das regiões.	42
Figura 17 - Representação esquemática da sensitização em uma junta.	43
Figura 18 - Curva de polarização esquemática em escala linear.	44
Figura 19 - Diagrama de Nyquist para os seguintes circuitos elétricos: a) um único capacitor; b) associação de um resistor e um capacitor em série (RC série); c) associação de um resistor e um capacitor em paralelo (RC paralelo); d) Associação de um circuito RC paralelo em série com um resistor.	45
Figura 20 - Fluxograma geral da pesquisa.	47
Figura 21 - Cortes e dimensões do substrato.	48

Figura 22 - Análise química por Espectroscopia de Emissão Ótica. Referência ASTM E415/2015.	49
Figura 23 - Microestrutura do substrato. Ataque nital 2%. Aumento de 50 e 200x.	50
Figura 24 – Distribuição da macrodureza do substrato.	50
Figura 25 - Fonte de soldagem multiprocesso DIGIPlus A7.	51
Figura 26 - Representação dos parâmetros de soldagem DAE, DAP, DEP, DEB E DBO.	52
Figura 27 - Tocha GTAW acoplada ao trator de soldagem.	53
Figura 28 - Posição da tocha “empurrando a solda”.	54
Figura 29 - Cordões exploratórios.	54
Figura 30 – Chapa e cortes para caracterização dos cordões isolados.	56
Figura 31 - Cortes transversais das chapas.	57
Figura 32 - - Imagens das seções transversais para os cordões 4 e 11.	57
Figura 33 – Demonstração para medição da molhabilidade.	58
Figura 34 – Espaçamento entre os cordões no revestimento.	59
Figura 35 - Testes variando apenas a angulação do eletrodo.	59
Figura 36 - (a) Perfil geométrico desejado para ponta do eletrodo; (b) Posição adequada para afiação; (c) Posição inadequada para afiação.	60
Figura 37 - Nomenclatura utilizada para os revestimentos.	61
Figura 38 - (a) método de medição da altura máxima, altura mínima e largura. (b) método de medição e cálculo da diluição.	62
Figura 39 – Chapa 1: cordões 9 e 16; Chapa 2: cordão 7.	64
Figura 40 - Chapa 3: cordões 3 e 15; Chapa 4: cordões 5 e 12; Chapa 5: cordão 1.	65
Figura 41 - Chapa 6: cordões 8 e 17; Chapa 7: cordões 6 e 14.	66
Figura 42 - Chapa 8: cordões 10 e 13; Chapa 9: cordões 4 e 11; Chapa 10: cordão 2.	67
Figura 43 - Gráfico de relação DEP x Vm.	68
Figura 44 - Média das alturas dos cordões isolados (em mm).	70
Figura 45 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Altura (p=0,5).	72
Figura 46 - Superfície de resposta: influência de I e VA sobre a altura, fixando a DEP em 12,5mm.	73

Figura 47 – Média das larguras dos cordões isolados (em mm).	74
Figura 48 - Gráfico da relação entre a altura e largura, R/L.	76
Figura 49 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Largura (p=0,05).	77
Figura 50 - Superfície de resposta: influência de I e VA sobre a largura, fixando a DEP em 12,5mm.	78
Figura 51 - Médias da molhabilidade dos cordões isolados.	79
Figura 52 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Molhabilidade (p=0,05)	80
Figura 53 - Superfície de resposta: influência de VA e I sobre a molhabilidade, fixando a DEP em 12,5mm.	81
Figura 54 - Médias de diluição dos cordões isolados (%).	82
Figura 55 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Diluição (p=0,05)	84
Figura 56 - Superfície de resposta: influência de VA e I sobre a diluição, fixando a DEP em 12,5mm.	85
Figura 57 – Macrografias superficiais dos revestimentos.	86
Figura 58 – Macrografias transversais dos revestimentos.	86
Figura 59 - Segundo cordão com molhabilidade indesejada (1). A linha tracejada em (2) mostra uma molhabilidade desejável para o 2º cordão e a imagem (3) apresenta a nova molhabilidade cordão após usinagem (esmerilhamento).	87
Figura 60 – (a) análise das alturas máximas e das (b) alturas mínimas dos revestimentos.	88
Figura 61 – Análise da largura.	89
Figura 62 – Análise da diluição.	89
Figura 63 - Microscopia ótica dos revestimentos R1 T2, R2 T2 e R3 T2. Aumentos de 50x e 100x.	91
Figura 64 - Microscopia Eletrônica de Varredura em região de inclusão em R1T2.	93
Figura 65 - Curvas de potencial de circuito aberto.	96
Figura 66 - Diagramas de Nyquist do metal de base e dos revestimentos.	97
Figura 67 - Curvas de polarização potenciodinâmica do metal de base e dos revestimentos 01, 02 e 03.	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de corrente GTAW.	23
Quadro 2 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem.	34
Quadro 3 - Valores médios de dureza do substrato.	50
Quadro 4 - Parâmetros de soldagem.	50
Quadro 5 - Composição química nominal do metal de adição E 317L.	51
Quadro 6 - Nomenclaturas para medidas do mecanismo bocal/eletro/arame/peça.	52
Quadro 7 - Níveis testados / Variáveis para soldagem no processo GTAW-MAF.	54
Quadro 8 - Matriz de planejamento (2^3+6+3).	54
Quadro 9 - Parâmetros para o cordão de aquecimento.	55
Quadro 10 - Parâmetros utilizados para deposição dos revestimentos.	60
Quadro 11 – Técnicas utilizadas nos revestimentos.	60
Quadro 12 - Respostas do planejamento experimental.	68
Quadro 13 - Alturas dos cordões isolados (em mm).	69
Quadro 14 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta altura, R.	70
Quadro 15 – Resumo dos ensaios com maiores e menores valores de altura.	72
Quadro 16 - Largura dos cordões isolados (em mm).	73
Quadro 17 - Relação altura/largura (R/L).	74
Quadro 18 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta largura, L.	75
Quadro 19 – Molhabilidade dos cordões isolados.	78
Quadro 20 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta molhabilidade.	79
Quadro 21 – Diluição dos cordões isolados (%).	81
Quadro 22 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta diluição.	82
Quadro 23 – Composição química percentual em massa.	89
Quadro 25 – Resultados dos ensaios de polarização potenciodinâmica.	97

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

LETRAS E SÍMBOLOS

A	Ampere
θ	Ângulo cordão/substrato
γ	Austenita
I	Corrente
Im	Corrente média
D (%)	Diluição
H _L	Energia de Soldagem
δ	Ferrita delta
°C	Graus Celsius
L	Largura do cordão
q	Quantidade de energia
R	Reforço do cordão
η	Rendimento térmico
V _m	Tensão média
V _a	Velocidade de alimentação de arame
v	Velocidade de soldagem

ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente alternada
CC-	Corrente contínua com polaridade direta
CC+	Corrente contínua com polaridade reversa
CFC	Cúbico de Face Centrada
Cr23C6	Carbonetos de Cromo
DAE	Distância arame/eletrodo
DAP	Distância arame/peça
DBP	Distância bocal/peça
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DEB	Distância eletrodo/bocal
DEP	Distância eletro/peça
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EIE	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

FCAW	Soldagem a Arco com Eletrodo Tubular (<i>Flux Cored Arc Welding</i>)
GR	Grau do aço
GTAW	Soldagem a Arco Gás-Tungstênio (<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>)
GTAW-MAF	Soldagem TIG mecanizada com arame frio
MAG	<i>Metal active gas</i>
MB	Metal de Base
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MIG	<i>Metal inert gas</i>
MO	Microscopia Ótica
MS	Metal de Solda
PRE	<i>Pitting Resistance Equivalent</i>
Rp	Resistência de polarização
SAW	Soldagem ao arco submerso (<i>Submerged arc welding</i>)
SMAW	Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos (<i>Shielded Metal Arc Welding</i>)
TIG	Tungtênio inerte gás (<i>Tungsten inert gas</i>)
ZF	Zona Fundida
ZL	Zona de Ligação
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivo	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.3	Objetivos específicos	20
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Processos de soldagem	21
2.1.1	Processo GTAW	21
2.1.2	Soldagem de revestimento	24
2.2	Aços inoxidáveis austeníticos	28
2.2.1	Introdução	28
2.2.2	Ferrita δ	29
2.2.3	Sensitização	30
2.3	Metalurgia da soldagem	31
2.3.1	Introdução	31
2.3.2	Energia de soldagem	33
2.3.3	Corrente e tensão	34
2.3.4	Velocidade de soldagem e velocidade de alimentação	35
2.3.5	Diluição	36
2.3.6	Soldagem de aços inoxidáveis austeníticos	37
2.4	Corrosão	40
2.4.1	Introdução	40
2.4.2	Ensaio de corrosão	42
2.4.2.1	Resistência de Polarização Linear	42
2.4.2.2	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)	43

2.5	Planejamento experimental	45
2.5.1	Introdução	45
2.5.2	Tipos de planejamento	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Fase 1 – Esclarecer a necessidade	47
3.2	Fase 2 – Corte do substrato	47
3.3	Fase 3 – Caracterização do substrato	48
3.4	Fase 4 – Soldagem (cordões isolados)	50
3.5	Fase 5 – Caracterização dos cordões isolados	55
3.6	Fase 6 – Soldagem dos revestimentos	58
3.7	Fase 7 – Caracterização dos revestimentos	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	Soldagem dos cordões isolados	64
4.2	Caracterização dos cordões isolados	68
4.2.1	Análise da Reposta: Altura	69
4.2.2	Análise da Resposta: Largura	74
4.2.3	Análise da Resposta: Molhabilidade	78
4.2.4	Análise da Resposta: Diluição	81
4.3	Caracterização dos revestimentos	85
4.3.1	Análise Macrográfica	85
4.3.2	Altura, largura e diluição dos revestimentos	88
4.4	Análise de composição química dos revestimentos	90
4.5	Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura	90
4.6	Ensaio de Polarização Potenciodinâmica e de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	95
5	CONCLUSÕES	100
	REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

Em um mercado onde a competitividade aumenta constantemente, o aperfeiçoamento dos processos produtivos tem se tornado, cada vez mais, um fator diferencial para empresas que buscam obter uma maior qualidade e confiabilidade no produto final, sempre aliado ao menor custo possível.

Dentro dos processos mecânicos metalúrgicos, a soldagem tem destaque como o principal processo de união devido à grande integridade e eficiência das juntas, diversidade nos materiais aplicáveis, custo relativamente baixo e rápida velocidade para execução. Exatamente por apresentar essas e outras vantagens, o processo de soldagem vem sendo amplamente utilizado, como por exemplo, nas atividades de exploração e produção de petróleo naval e *offshore* (BAEK et al., 2021; DE SOUZA et al., 2014; SATHISH et al., 2021).

Além da visão clássica de um processo de união, processos de soldagem são também utilizados na recuperação de peças desgastadas, para corte e para aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas (KOTARI et al., 2020; MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012; SAHOO; SONI; MASANTA, 2016; YA-LONG et al., 2018). Deste modo, utiliza-se o processo de soldagem para deposição de material sobre uma superfície, formando um revestimento com características diferenciadas, aplicação denominada de soldagem de revestimento (GOMES, 2010). Dentre as técnicas de proteção de superfícies contra corrosão, a aplicação por processos de soldagem torna-se atrativo pelo fato de unir o revestimento metalurgicamente ao substrato (NETO et al., 2017). Para tanto, diversos tipos de processos de soldagem podem ser empregados, como por exemplo GTAW, soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW), entre outros (DEEPAK et al., 2021; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ et al., 2020; XU et al., 2015).

Visando a deposição de revestimentos contra corrosão, o processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (*Gas Tungsten Arc Welding* – GTAW), devido às suas características, pode apresentar extrema relevância no momento da escolha de qual processo utilizar (LIMA et al., 2020; WANG et al., 2007; XU et al., 2015). Contudo, para esse tipo de aplicação (revestimento contra corrosão), quando se necessita de uma produtividade considerável, o processo GTAW convencional pode não atender à demanda, surgindo então a necessidade de mecanizá-lo através da alimentação automática do arame, que pode ser frio ou quente (*Cold-Wire ou Hot-Wire*) (DAS BANIK et al., 2021; WANG et al., 2021). O processo GTAW mecanizado com arame frio (GTAW-MAF) consiste na alimentação automática do

metal de adição através de uma bobina, enquanto que a alimentação de arame quente consiste na aplicação de uma corrente elétrica para aquecimento do cordão visando facilitar a sua fusão e aumentar a taxa de deposição (OLIVARES; DÍAZ, 2016).

Dentro deste contexto, a problemática gira em torno da configuração para tal mecanização, como a obtenção de um mecanismo que promova o deslocamento da tocha acoplada e alimente com metal de adição de maneira contínua, além dos ajustes dos parâmetros de soldagem (velocidade de deslocamento da tocha, velocidade de alimentação do metal de adição, comprimento do arco elétrico, etc.). Para validar esses parâmetros estabelecidos, se faz necessário avaliar como será possível variá-los de modo a obter resultados comparativos, bem como quais os ensaios que garantem um resultado satisfatório para o presente estudo.

1.1 Justificativa

Sabe-se que as condições de trabalho a que são submetidos diversos equipamentos na indústria do petróleo e gás exigem materiais que suportem altas pressões e elevadas temperaturas (CAVALCANTE et al., 2016). Nessas condições comumente encontradas também em outros segmentos das indústrias, observa-se que existe uma preocupação de maneira significativa com a prevenção da corrosão em estruturas metálicas (DO AMARAL; CORREIA; PEREIRA, 2008). No caso de equipamentos que transportam óleo ou gás, quando a corrosão não é controlada, ocorre o inevitável vazamento nas tubulações, causando danos irreparáveis ao meio ambiente (PAIVA, 2000).

Desse modo, procura-se trabalhar com materiais que apresentem uma boa resistência a corrosão, como por exemplo os aços inoxidáveis. Porém, o custo para obtenção de equipamentos completamente fabricados com esse material é altíssimo. Assim, uma alternativa atrativa para substituição de materiais de custo elevado em ambientes agressivos é a aplicação de revestimentos, procedimento que contribui para a melhoria da resistência a corrosão sem o expressivo aumento de custo de fabricação do componente, quando comparado com o equipamento totalmente fabricado em material especial (SANDES et al., 2017).

Em geral, esses revestimentos podem ser de aços inoxidáveis austeníticos ou superligas de níquel. Dentro os aços inoxidáveis, destacam-se as ligas AISI 304, 304L, 308, 308L, 316, 316L, 317 e 317L (JUNIOR, 2000). Ligas como a AISI 316L e 317L são comumente utilizadas em plantas industriais em função de sua composição química e estrutura cristalina FCC, fatores que proporcionam excelentes propriedades relacionadas à ductilidade, resistência à corrosão e soldabilidade, tornando tais ligas ótimas opções para aplicações industriais desde baixas até altas temperaturas (GUILHERME et al., 2014).

Os processos de soldagem empregados para a realização de revestimentos são diversos (NOURI; ABDOLLAH-ZADEH; MALEK, 2007; PALANI; MURUGAN, 2007). O processo GTAW apresenta boas características para aplicação em soldagem de revestimento, porque além de garantir alta qualidade do depósito devido à estabilidade do arco, apresenta um excelente controle de energia térmica transferida ao metal de base, pois o controle da fonte de calor e do metal de adição são independentes (FERNANDES, 2013; MIRANDA et al., 2015).

Além disso, o processo mecanizado pode oferecer soluções tanto no aspecto de produtividade como em relação à heterogeneidade da solda, pois, neste caso, variações expressivas no formato do cordão associadas, por exemplo, com mudanças pequenas de composição química do metal base, usualmente dentro do permitido por normas técnicas, são altamente indesejáveis (MODENESI, 2013).

Dessa maneira, associando a necessidade do aprofundamento de investigações nessas áreas com a expressiva variabilidade de parâmetros comparativos que esse processo oferece, forma-se um enorme potencial para geração de pesquisas e publicações de trabalhos científicos.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Investigar a resistência à corrosão de revestimentos de aço inoxidável AISI 317L aplicados em substrato de aço carbono via processos GTAW mecanizado com alimentação de arame frio.

1.2.3 Objetivos específicos

- Elaborar técnica de soldagem para a realização do processo GTAW mecanizado com alimentação de arame frio em aço carbono;
- Verificar o efeito desses parâmetros de soldagem sobre a resistência à corrosão e os níveis de diluição dos revestimentos;
- Verificar o efeito da diluição e da composição química sobre a resistência à corrosão dos revestimentos.

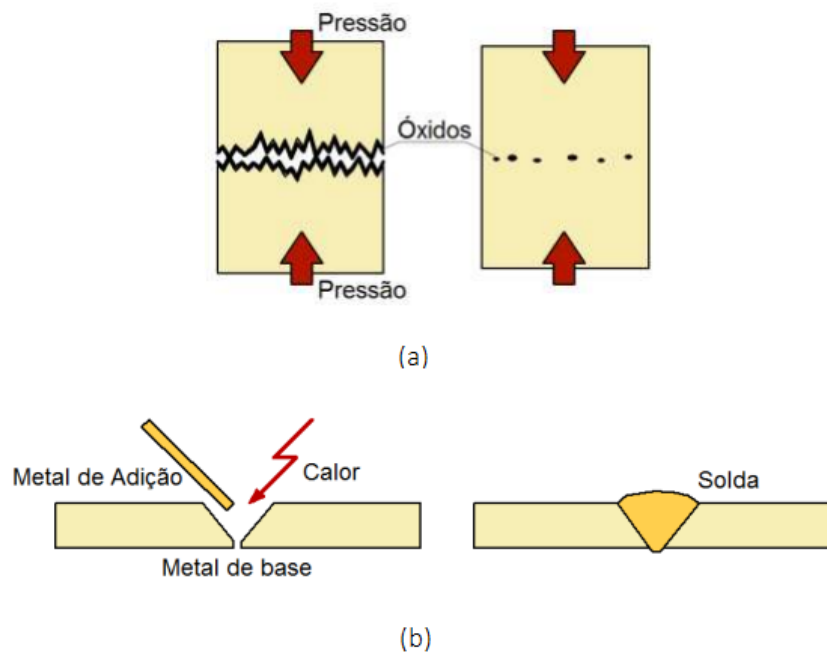
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de soldagem

2.1.1 Processo GTAW

Atualmente existem diversos processos de soldagem, que podem se subdividir em dois grandes grupos: processos por fusão e processos por pressão (deformação). Os processos por pressão consistem em deformar as superfícies de contato permitindo a aproximação dos átomos a distâncias muito pequenas, podendo ser realizado um aquecimento local para facilitar a deformação das superfícies de contato. Os processos por fusão se baseiam na aplicação localizada de calor na região de união até a fusão do metal base juntamente com o metal de adição (quando este é utilizado), destruindo as superfícies de contato e produzindo a união pela solidificação do metal fundido (SILVA, 2013). A Figura 1 apresenta como se caracterizam os processos de soldagem por pressão (a) e por fusão (b).

Figura 1 - Processos de soldagem: (a) por pressão; (b) por fusão.



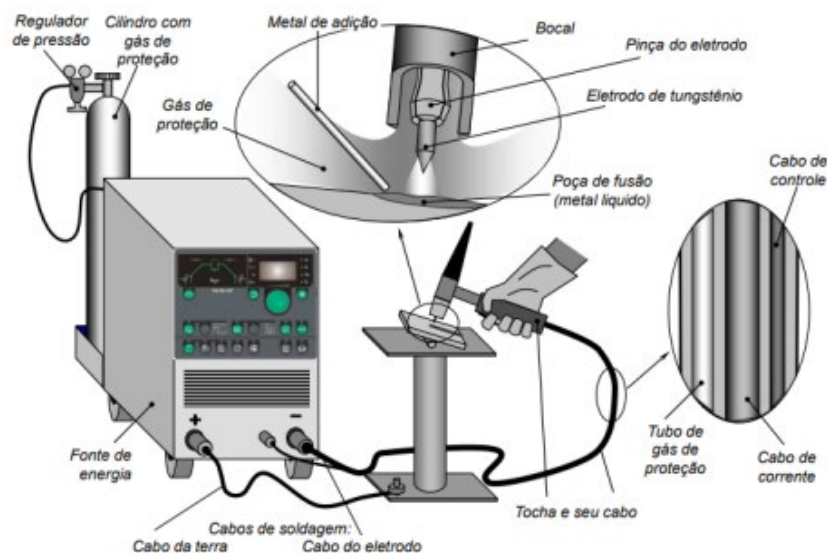
Fonte: adaptado de MODENESI, 2012.

Os processos de soldagem por fusão são amplamente utilizados, e tem-se como exemplos: Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW); Soldagem a Arco Gás-Metal (*Gas Metal Arc Welding* - GMAW); Soldagem a Arco com Eletrodo Tubular (*Flux Cored Arc Welding* - FCAW); Soldagem ao Arco Submerso

(*Submerged Arc Welding - SAW*); Soldagem a Arco Gás Tungstênio (*Gas Tungsten Arc Welding - GTAW*) e outros.

Também conhecido pela sigla TIG (*Tungsten Inert Gas*), a soldagem GTAW é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento localizado e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a unir (PEIXOTO, 2012). Normalmente, o equipamento utilizado neste processo consiste em uma fonte de energia, cilindro de gás protetor, dispositivo para abertura de arco, cabos e mangueiras. A fonte de corrente elétrica é do tipo corrente constante, com valor de saída ajustável para cada operação e pode ser contínua, alternada ou pulsada. A Figura 2 apresenta os equipamentos comumente utilizados no processo de soldagem GTAW.

Figura 2 - Equipamentos para soldagem GTAW.



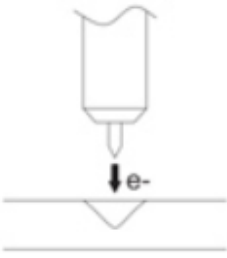
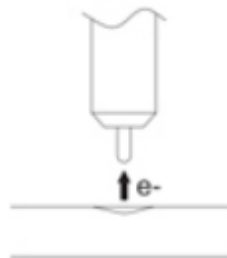
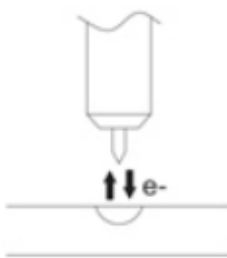
Fonte: LEITE, 2018.

O processo GTAW apresenta como grande vantagem o excelente controle da energia térmica transferida ao metal de base, devido ao controle independente da fonte de calor e do metal de adição. Outras vantagens desse processo são: a qualidade da solda, geralmente isenta de defeitos e a possibilidade de um controle preciso das variáveis de soldagem (MIRANDA, 2015).

Outro fator de importância neste processo é a polaridade para correntes contínuas, que pode ser direta (CC-) ou reversa (CC+). Na polaridade direta, o eletrodo de tungstênio encontra-se no polo negativo e 70% do calor gerado ocorre na peça. Esta condição proporciona uma

maior penetração e durabilidade do eletrodo. O Quadro 1 apresenta os parâmetros de corrente na soldagem GTAW.

Quadro 1 - Parâmetros de corrente GTAW.

TIPO DE CORRENTE	CONTÍNUA		ALTERNADA
	Direta CC-	Inversa CC+	
Características	Direta CC-	Inversa CC+	CA
Objetivo	Penetração profunda e preservação do tungstênio	Penetração "rasa" e efeito limpeza de óxido superficial	Preservação do W e efeito limpeza a cada meio ciclo
Aplicação	Aços carbono, baixa/alta liga, inoxidáveis, prata e cobre e ligas, revestimentos	Viável para soldagem de pequenas espessuras	Alumínio, magnésio e suas ligas
Eletrodo de W: capacidade de suportar corrente sem fundir	Ótima, pode-se usar altos valores de corrente	Pobre, somente para baixos valores de corrente	Boa, pode-se usar valores intermediários de corrente
Ação de limpeza do óxido na soldagem de Al e Mg e suas ligas	Não	Sim	Sim, a cada meio ciclo
Balanco de calor no arco (aprox.)	70% na peça, 30% no eletrodo	30% na peça, 70% no eletrodo	50% na peça, 50% no eletrodo
Fluxo de elétrons - Penetração			

Fonte: adaptado de ESAB, 2020.

O processo GTAW também pode ser dividido em convencional e mecanizado. O processo convencional é uma soldagem manual realizada por um soldador, onde, normalmente, se os parâmetros de soldagem forem bem ajustados, produzirão soldas de excelente qualidade, com poucos defeitos ou descontinuidades, principalmente no emprego de materiais nobres (FERNANDES, 2013). A grande vantagem do processo mecanizado encontra-se na produtividade que esse processo viabiliza. No entanto, ao se mecanizar um processo, surge uma necessidade de maior apuração nos ajustes dos parâmetros de soldagem, como corrente, tensão, velocidade de alimentação de metal de adição, velocidade de soldagem, vazão do gás de

proteção, comprimento do arco, distância do arame à peça, dentre outros (DA SILVA et al., 2019).

Neste processo, os gases normalmente empregados são o argônio ou o hélio, que têm a função de proteger o metal em estado de fusão contra a contaminação de outros gases da atmosfera, tais como o oxigênio e o nitrogênio (SENAI - ES, 1996). Marques (2005) apresenta que, ao comparar a soldagem GTAW com a utilização dos gases Argônio e Hélio, é possível verificar:

- Melhor estabilidade do arco com argônio que com hélio;
- Menor consumo de argônio, já que este é mais denso que o hélio;
- Menores tensões de arco com argônio que com hélio;
- Menor custo do argônio;
- Maior penetração na soldagem com hélio que com argônio;
- Maior facilidade na abertura do arco com argônio;
- Melhor efeito de limpeza dos óxidos na soldagem com corrente alternada com argônio;
- Possibilidade de uso de maiores velocidades de soldagem com hélio.

Deste modo, para a seleção do gás de proteção deve-se considerar, principalmente, o tipo de metal que se deseje soldar, a posição de soldagem e a espessura da peça.

2.1.2 Soldagem de revestimento

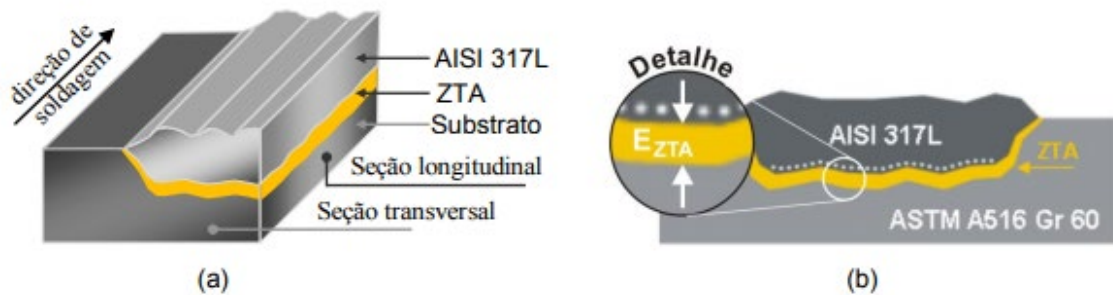
Pode-se definir soldagem de revestimento como sendo a deposição de um material de adição sobre um metal de base (substrato) para dar a superfície algumas propriedades que diferem significativamente daquelas do metal base, como o aumento da resistência ao desgaste ou à corrosão (POLIDO, RAFAEL SAITO; GALLEGRO, 2020; SILVA, 2013). Elias (2014) sugere que as principais aplicações deste processo são:

- Criação de superfícies com características especiais;
- Prorrogação da vida útil de peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação;
- Recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão.

Deste modo, diferentes metais de adição são depositados com a finalidade de melhorar as propriedades não somente de resistência à corrosão e ao desgaste, mas, também, resistência a altas temperaturas, aumento da dureza, controle dimensional ou para obtenção de algumas necessidades metalúrgicas (MURUGAN; PARMAR, 1997). Na Figura 3 é possível verificar

uma representação de seções transversais e longitudinais de revestimento de aço inoxidável sobre aço carbono.

Figura 3 - Revestimento de aço inoxidável austenítico sobre aço carbono. (a) Seções transversal e longitudinal. (b) Seção transversal com detalhe indicando a extensão da ZTA (EZTA).



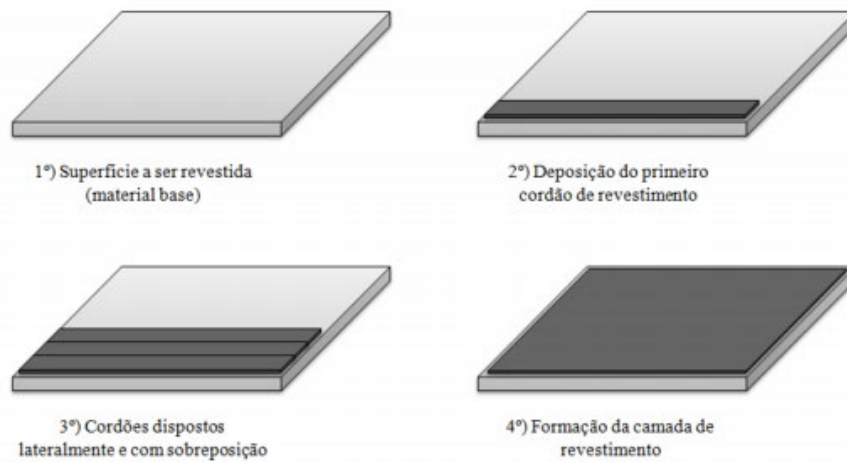
Fonte: SILVA 2009; SILVA et al. (2009b).

A fabricação de peças inteiramente de aços inoxidáveis apresenta um custo expressivamente maior em relação a fabricação com aços carbonos. Logo, uma das principais vantagens deste processo de revestimento está relacionada ao fato de que camadas anticorrosivas podem ser produzidas de forma mais barata, a partir de materiais de menor custo. Além disso, o processo de deposição de revestimento por soldagem contribui para que os revestimentos sejam depositados com rapidez e economia de material (ELIAS; PARANHOS, 2014). Deste modo, os revestimentos de aços inoxidáveis sobre aços carbono se mostram como uma boa solução para os problemas de fabricação de materiais que combinem altos níveis de propriedades mecânicas com boa resistência à corrosão (FERREIRA, 2008).

É importante ressaltar que a aplicação de revestimento pode ser realizada por diferentes processos de soldagem e a escolha do processo mais adequado depende de diversos fatores tais como versatilidade, custo, fator operacional (tempo de soldagem/ tempo total), habilidade do operador, energia de soldagem, diluição (%), taxa de deposição (kg/h), tamanho da peça, posição de soldagem, tipo de liga para revestimento, dentre outros (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

O processo de revestimento ocorre com a deposição dos cordões e com um dado nível de sobreposição até que toda a região de interesse seja recoberta, como apresentado na Figura 4. O nível de sobreposição dos cordões depende da aplicação do revestimento e do processo de soldagem empregado (GOMES, 2010).

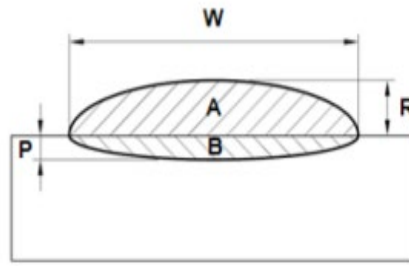
Figura 4 - Princípio de operação da soldagem de revestimento.



Fonte: GOMES, 2010.

Uma das principais diferenças entre a soldagem de revestimento e as aplicações convencionais de soldagem (na maioria dos casos, soldas de união) está relacionada à geometria desejada do cordão de solda. Enquanto nas aplicações convencionais (soldas de união) se espera alta penetração (P) visando garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (na Figura 5, W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D), conforme a figura 5. O objetivo da obtenção deste perfil geométrico característico se dá visando que o processo possa recobrir a maior área possível com o menor número de passes, promovendo economias em tempo e material. Em relação a baixa diluição, espera-se que uma maior proporção de metal de adição na solda conceda à esta as propriedades desejadas para o revestimento. Dessa maneira, um dos maiores desafios da soldagem de revestimento consiste no ajuste adequado dos parâmetros do processo para que o material depositado adquira a geometria desejada (GOMES, 2010).

Figura 5 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda.



Fonte: GOMES, 2010.

2.2 Aços inoxidáveis austeníticos

2.2.1 Introdução

Os aços inoxidáveis são aços com elevada porcentagem de elementos de liga, como o cromo que é o elemento de liga predominante (pelo menos 11%) e o níquel, além de outros elementos como molibdênio. Uma ampla faixa de propriedades mecânicas, combinadas com uma excelente resistência à corrosão, torna os aços inoxidáveis muito versáteis nas suas possibilidades de aplicações (WILLIAM; CALLISTER, 2002). Cada elemento de liga pode influenciar, de maneiras diferentes, nas propriedades do aço inoxidável, a exemplo do níquel que confere maior ductilidade e do titânio e nióbio que evitam a combinação do cromo com o carbono, evitando a diminuição da resistência à corrosão. A presença de cromo em solução sólida age de forma que, o material quando exposto à atmosfera contendo oxigênio, forma uma camada passiva de óxidos que impede o contato do metal base com a atmosfera agressiva (GENEROSO, D.J.; DAMIN, 2020) conforme apresenta a Figura 6.

Figura 6 - Representação da camada passiva de óxidos.



Fonte: DE LIMA; PAREDES; GOMES, 2011.

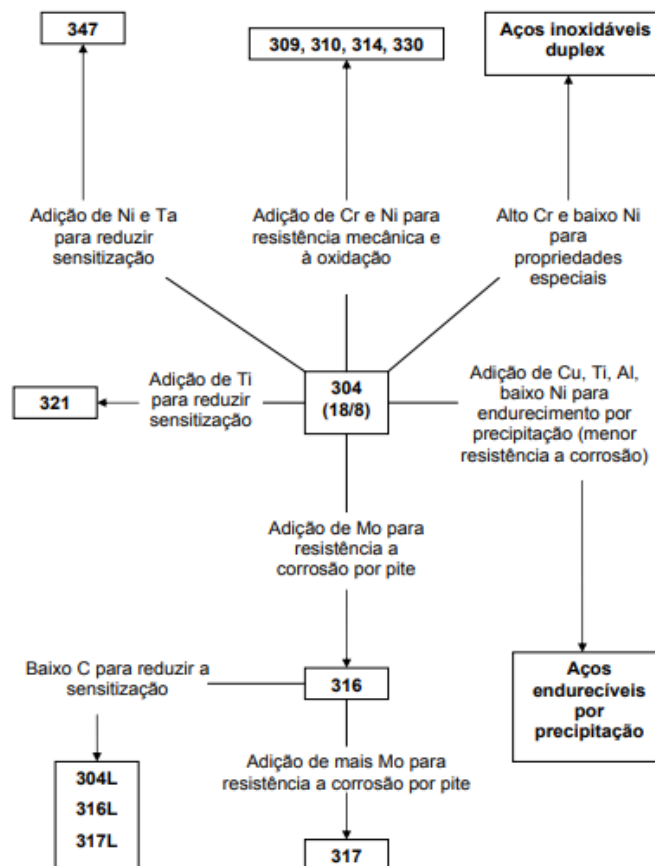
Este tipo de aço é dividido em diferentes classes com base na microestrutura apresentada para cada uma delas, podendo ser ferríticos, martensíticos, austeníticos ou aços inoxidáveis duplex.

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam um maior teor de carbono em sua composição, possuindo elevada dureza e resistência mecânica. Já os aços inoxidáveis ferríticos apresentam comportamento magnético, contém menores concentrações de carbono do que os martensíticos e apresentam uma boa resistência à corrosão a temperaturas elevadas.

A Figura 7 apresenta diferentes classificações de aços inoxidáveis de acordo com suas composições. Os aços inoxidáveis austeníticos formam o maior grupo de aços inoxidáveis em

uso, representando cerca de 65% a 70% do total produzido (MODENESI, 2001). Composto basicamente por ferro, cromo e níquel, o aço inoxidável austenítico dispõe de propriedades que o torna ainda mais resistente à corrosão, se comparados com o ferrítico e martensítico. Ou seja, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma combinação favorável de propriedades, tais como resistência à corrosão e à oxidação, resistência mecânica a quente, trabalhabilidade e soldabilidade (PADILHA; GUEDES, 1994).

Figura 7 - Representação da camada passiva de óxidos.



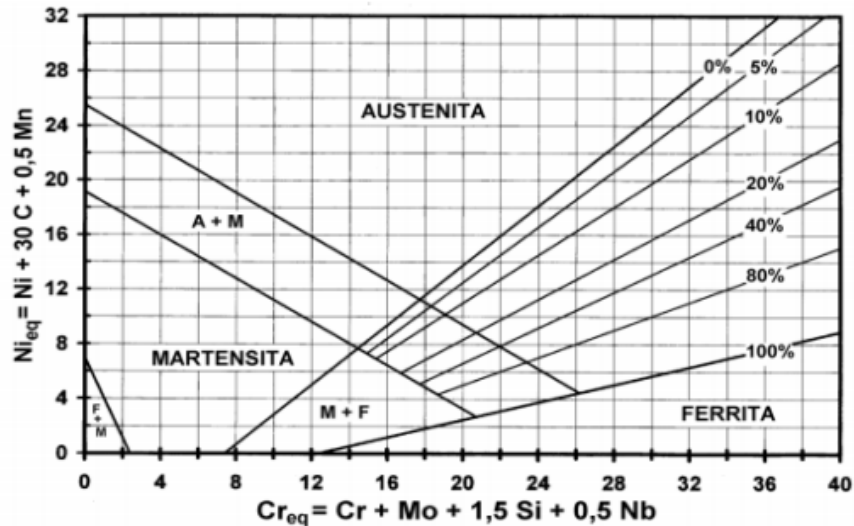
Fonte: FERREIRA, 2008.

2.2.2 Ferrita δ

O ferro possui diferentes formas alotrópicas, sendo a ferrita δ uma delas. Sua formação se dá a partir da segregação de elementos estabilizadores de ferrita durante a solidificação e processamento termomecânico (LIPPOLD; KOTECKI, 2005). Pode-se dividir alguns elementos de liga como sendo estabilizadores de ferrita δ (por exemplo, Cr, Mo, Si, Nb e Al) e estabilizadores de austenita (Ni, C e Mn). Um metal de solda de aço inoxidável austenítico pode iniciar a sua solidificação tanto na forma de ferrita δ , como na forma de austenita. Schaeffler (1949) apresenta que a formação de ferrita δ depende da relação Cr/Ni, considerando que,

quanto maior for a presença de Cr em relação ao Ni, maior a tendência de solidificação em forma de ferrita δ . A Figura 8 apresenta o diagrama elaborado por Schaeffler (1949) que relaciona as fases do aço com a quantidade de Cromo e Níquel equivalentes.

Figura 8 - Diagrama de Schaeffler.



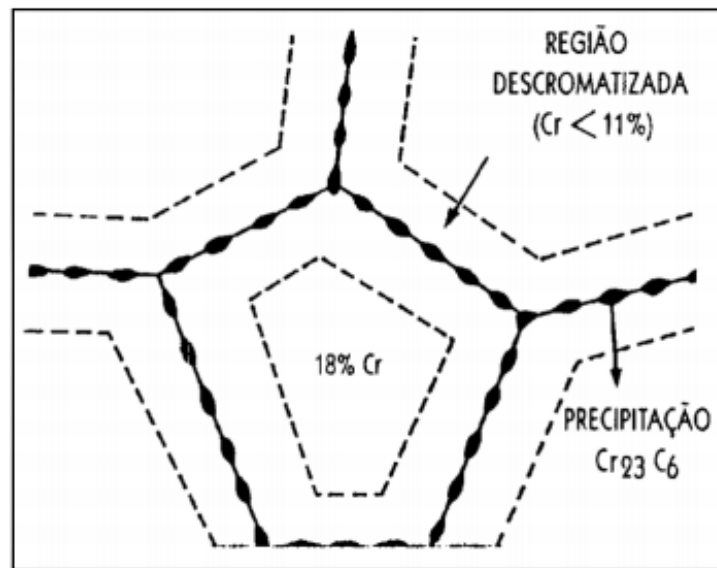
Fonte: Schaeffler, 1949.

A presença da ferrita δ na microestrutura pode apresentar benefícios ou malefícios. Estas condições dependem, basicamente, da aplicação à que se destina o material, do local onde a ferrita δ se encontra e da fração volumétrica (quantidade) existente (ALTIERI, 2016). Quando apresentada em baixos teores a ferrita δ pode ser considerada benéfica, devido a diminuição da tendência ao surgimento de fissuras na solidificação. Porém, em teores mais elevados essa pode apresentar magnetismo residual e diminuir a resistência à corrosão e à tenacidade a baixas temperaturas (MODENESI, 2001).

2.2.3 Sensitização

Apesar de possuir elevada resistência à corrosão, os aços inoxidáveis austeníticos podem ter essa propriedade afetada por um fenômeno denominado “Sensitização”. A sensitização é uma corrosão intergranular que ocorre devido a precipitação de carbonetos ricos em cromo nos contornos de grão de aços inoxidáveis austeníticos expostos a temperaturas entre 450 e 850°C (SHREIR, 1995). O crescimento destes carbonetos faz surgir nas suas adjacências uma zona empobrecida em cromo, que ao permanecer em determinadas faixas de temperaturas e em meios corrosivos, se tornam susceptíveis ao ataque (VIOTO; ANTUNES, 2016). Tal situação é esquematizada na Figura 9.

Figura 9 - Esquema mostrando um contorno de grão com precipitado de carboneto de cromo e, no entorno dos precipitados, uma região pobre em carbono.



Fonte: MÜRI; MARGARIT-MATTOS, 2011.

Alguns métodos para que a sensitização seja minimizada ou evitada:

- Resfriar rapidamente o aço por tempera através do intervalo de temperatura de sensitização;
- Reduzir o teor de carbono para valores inferiores a 0,03%. Assim, pela falta de carbono na liga, não haverá formação em grande quantidade de carboneto de cromo, além de que quanto maior a quantidade de carbono mais rápida é a formação de carbonetos;
- Adicionar elementos estabilizadores à liga, tais como titânio, nióbio, vanádio e tântalo. Esses elementos têm uma afinidade maior por carbono que o cromo, formando carbonetos de titânio, nióbio, vanádio ou tântalo em vez de carboneto de cromo.

2.3 Metalurgia da soldagem

2.3.1 Introdução

Uma abordagem clássica considera a soldagem como sendo um método de união de peças, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes podem ser usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). O estudo da metalurgia da soldagem busca analisar os principais efeitos metalúrgicos que ocorrem nas juntas soldadas, como as transformações microestruturais, forma

de solidificação e formação de descontinuidades, em função dos processos, parâmetros e procedimentos de soldagem utilizados.

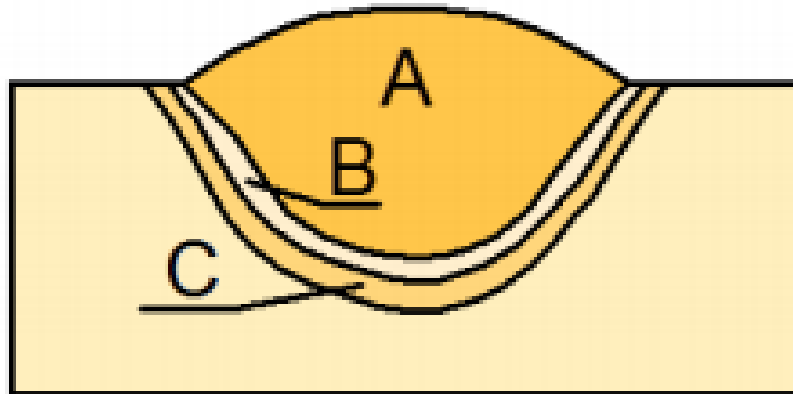
Durante a realização de uma solda, as regiões adjacentes do metal de base são submetidas a ciclos térmicos cujas temperaturas de pico decrescem à medida que se afasta do eixo central da solda. Assim, podem-se esperar que surjam diferentes regiões com alterações microestruturais ao longo de sua seção transversal, em relação ao material original (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Segundo Barbedo (2011) as principais regiões que podem apresentar diferenças em suas microestruturas e, conseqüentemente, em suas propriedades são o metal de base, a zona termicamente afetada (ZTA), a zona de ligação (ZL) e a zona fundida (ZF) ou metal de solda (MS).

As características microestruturais destas regiões dependem basicamente das condições térmicas na qual a junta foi submetida e da composição química do metal de base e do metal de adição (LANCASTER, 1999).

- Metal de Base (MB): região mais afastada da solda não alterada pelo ciclo térmico. Suas temperaturas de pico alcançadas durante a soldagem são inferiores a temperatura crítica.
- Zona fundida (ZF): região onde o material foi fundido durante a soldagem e caracterizado por temperaturas de pico superiores à sua temperatura de fusão. Esta região pode ser dividida em outras três regiões, região misturada, região não-misturada e região parcialmente fundida, conforme apresenta a Figura 10.

Figura 10 - Regiões da ZF: (A) região misturada; (B) região não misturada; (C) região de fusão parcial.



Fonte: MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012.

- Zona de ligação: região compreendida entre a ZF e ZTA. Na grande parte dos materiais, esta região é bem reduzida e somente pode ser observada em nível microscópico, podendo até mesmo não vir a ser identificada, como é o caso dos aços de baixo carbono.
- Zona termicamente afetada (ZTA): É a região não fundida do metal de base, mas cuja microestrutura e/ou propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico durante a soldagem. As temperaturas de pico durante a soldagem desta região foram inferiores à sua temperatura de fusão, mas superiores a temperatura crítica de transformação.

2.3.2 Energia de soldagem

A energia de soldagem é um dos principais parâmetros para se avaliar pois, além de influenciar as características geométricas da junta, é determinante nos ciclos térmicos impostos ao material e, portanto, nas possíveis transformações microestruturais e no comportamento da junta soldada.

A energia de soldagem (H – *heat input*) representa a quantidade de energia gerada pelo arco (q) por unidade de comprimento (L), ou seja, considerando o tempo (t) utilizado durante a soldagem, H representará a potência do arco (P) dividida pela velocidade de soldagem (v), conforme a Equação I:

$$H = \frac{q}{L} = \frac{q/t}{L/t} = \frac{P}{v}$$

(1)

Tomando a potência do arco elétrico como função da corrente (I) e da tensão de soldagem (V), a Equação (1) pode ser escrita como sendo (Equação 2):

$$H = \frac{P}{v} = \frac{V \times I}{v} \quad (2)$$

Pode-se definir como rendimento térmico (η) as perdas de energia que ocorrem durante a soldagem. Esse valor é função do processo de soldagem e do tipo da polaridade de corrente utilizada. Desse modo, pode-se apresentar que valor líquido da energia de soldagem (H_L) é dado por (Equação 3):

$$H_L = \eta \cdot H \quad (3)$$

Lima Júnior (2013) indica que para maiores valores de energia de soldagem aplicada na junta soldada, maior será o calor transferido para esta, maior será a poça de fusão, mais larga a zona termicamente afetada, entre outros efeitos. Por outro lado, também apresenta que a utilização de baixos valores pode provocar falhas de penetração, assim como elevadas velocidades de resfriamento, o que, em certas ocasiões, pode ser prejudicial. No Quadro 2 verifica-se o rendimento térmico para alguns processos de soldagem.

Quadro 2 - Rendimento térmico para alguns processos de soldagem.

Processo	Rendimento térmico (η)
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70 - 0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 - 0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 - 0,50
Laser (LBW)	0,005 - 0,70

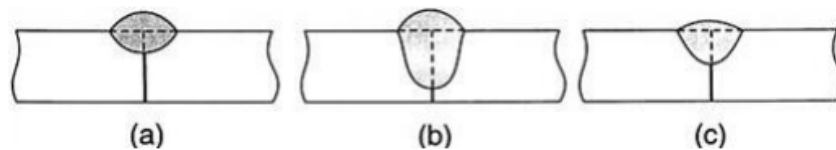
Fonte: MODENESI, 2003.

2.3.3 Corrente e tensão

A corrente pode ser tratada como uma variável independente do processo, sendo a energia de soldagem diretamente proporcional e a sua variação influencia na taxa de deposição

e penetração, de modo que se as variáveis do processo forem mantidas constantes e o valor da corrente de soldagem for aumentado, ocorrerá aumento na penetração da solda, na taxa de deposição do metal de adição e no diâmetro da gota de solda até o ponto de transição (ALVES, 2008). A Figura 11 apresenta diferentes efeitos no cordão de soldagem de acordo com a corrente utilizada.

Figura 11 - Efeito do nível de corrente de soldagem no perfil do cordão soldado: (a) corrente excessivamente baixa; (b) corrente excessivamente alta; (c) corrente recomendada.



Fonte: AWS, 1990.

Já a tensão do arco é conhecida como a diferença de potencial entre o eletrodo e a peça e esta variável de soldagem é influenciada por quatro fatores: corrente do arco; perfil da ponta do eletrodo; distância entre o eletrodo e a peça e pelo tipo do gás de proteção (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Quando a tensão aumenta, o comprimento do arco também aumenta, aumentando assim, a probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras (GOMES, 2006).

2.3.4 Velocidade de soldagem e velocidade de alimentação

A velocidade de soldagem representa a velocidade de deslocamento com que o arco se move ao longo da junta soldada, influenciando no tamanho e na penetração do cordão. Quando tal velocidade se encontra muito baixa, é verificado um aumento na quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e a penetração seja baixa, dado que calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base. Por outro lado, para velocidades de soldagem muito altas, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui, podendo ocorrer ainda mordeduras ao longo do cordão (MIRANDA, 1999).

A velocidade de alimentação influencia diretamente a quantidade de material depositado na poça de fusão, porém, se a posição da alimentação do arame se encontrar no arco de soldagem ao invés de se encontrar na poça de fusão, a transferência de material para a peça pode se tornar irregular, causando instabilidade no arco e podendo provocar defeitos no cordão de solda (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). O aumento na velocidade de

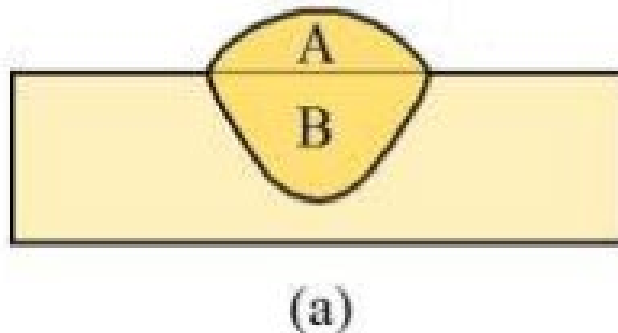
alimentação pode acarretar uma diminuição na diluição, devido ao fato de que com o aumento da velocidade uma maior quantidade de material terá que ser fundida com a mesma energia de soldagem (SHANMUGAM; MURUGAN, 2006).

2.3.5 Diluição

Sabe-se que a zona fundida é formada pela mistura do metal de base com o metal de adição na poça de fusão. Deste modo, diluição (D%) é a quantidade de metal de base presente no metal de solda. A Figura 12 apresenta as áreas utilizadas para medida da diluição, que pode ser calculada através da seguinte expressão (Equação 4):

$$D = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad (4)$$

Figura 12 - Áreas para medida da diluição na seção transversal de um cordão.



Fonte: Adaptado de MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012.

Quando não há deposição de metal de adição a solda é denominada de autógena, e sua diluição será 100%. Desta forma, o conceito de diluição é importante quando se deseja controlar a participação do metal base na formação da solda, como por exemplo, na soldagem de metais dissimilares e em processos de revestimentos feitos por soldagem (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Assim, tratando de revestimentos, o desejável é que se obtenha uma baixa porcentagem de diluição (WEMAN, 2011) de modo que, quanto menor a diluição, menor a variação na composição química do metal de solda, estando mais próximo das propriedades nominais do material depositado (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992), além de que, menores valores de diluição podem implicar em uma menor probabilidade de precipitação de

microestruturas frágeis e susceptíveis a corrosão ao longo de todo o volume do metal de solda, devido a menor participação da composição química do metal de base (DE MELO et al., 2012).

No caso da deposição de aço inoxidável visando revestimento contra corrosão, quanto menor o nível de diluição, espera-se um menor percentual de C e maiores percentuais de Cr e Ni na superfície do revestimento, promovendo uma melhor resistência à corrosão.

Os valores de diluição também são afetados por propriedades como condutividade térmica, geometria da junta e espessura da chapa. Maiores valores de condutividade térmica e espessura proporcionam uma maior taxa de resfriamento, diminuindo os níveis de diluição.

2.3.6 Soldagem de aços inoxidáveis austeníticos

Soldabilidade pode ser definida como a capacidade que um material oferece ao ser unido através de um processo de soldagem obtendo uma estrutura final que satisfaça as propriedades desejadas em projeto (propriedades mecânicas x aspecto superficial x descontinuidades) (AWS, 2012). Se tratando de aços inoxidáveis austeníticos, pode-se dizer que estes possuem uma boa soldabilidade, com baixa sensibilidade à formação de porosidade, boa tenacidade e ausência de transformação martensítica durante a soldagem. Logo, com a escolha correta do processo de soldagem e do metal de adição, é possível obter soldas adequadas sem a necessidade de preaquecimento ou tratamentos pós soldagem (MODENESI, 2001).

A relação Cr/Ni influencia na forma e na ordem de solidificação do metal (ferrita δ ou austenita γ) e uma nomenclatura estabelece as diferentes morfologias (apresentadas na Figura 13) dos grãos nesses metais de solda, de acordo com tal relação. Deste modo, microestrutura final da zona fundida de um aço inoxidável austenítico dependerá da forma de solidificação do aço e das transformações subsequentes no estado sólido (MODENESI, 2001).

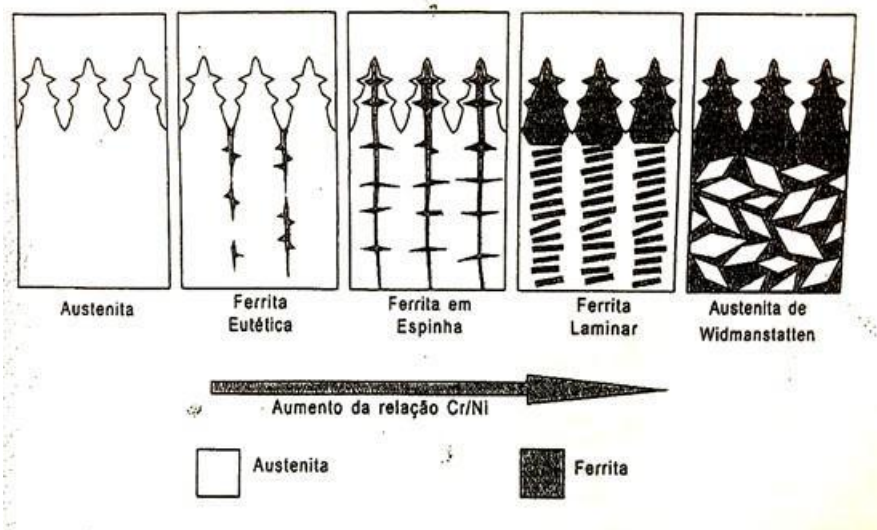
Segundo Modenesi (2001), as principais microestruturas encontradas na ZF de um aço inoxidável austenítico são, para valores crescentes da relação Cr/Ni, conforme a Figura 13:

- *Austenita (A)*: Solidificação direta para austenita, sem formação de ferrita.
- *Austenita + ferrita eutética (AF)*: Inicialmente tem-se a solidificação de austenita primária com ferrita eutética localizada em contornos de grão ou dendritas ao final da solidificação.
- *Austenita + ferrita em espinha*: Solidificação de ferrita primária com formação de austenita tanto nas etapas finais da formação de ferrita como já no estado sólido, fazendo com que a ferrita remanescente se localize ao longo do centro

das dendritas. Importante ressaltar que essa morfologia é a mais comumente encontrada em soldas de aços inoxidáveis austeníticos.

- *Austenita + ferrita laminar*: Inicialmente tem-se a solidificação de ferrita primária, que se transforma em austenita principalmente no estado sólido. Essa microestrutura é característica de soldas resfriadas rapidamente ou com elevada quantidade de ferrita. Esta nomenclatura é dada pelo fato que a austenita aparece na forma de lâminas aproximadamente paralelas com a ferrita remanescente.
- *Ferrita + austenita de Widmanstätten*: Para esta microestrutura, a solidificação ocorre somente com a formação de ferrita. Essa estrutura é comum em soldas de aços inoxidáveis duplex, e a austenita é formada na matriz de ferrita já completamente solidificada, nucleando nos contornos de grão da ferrita.

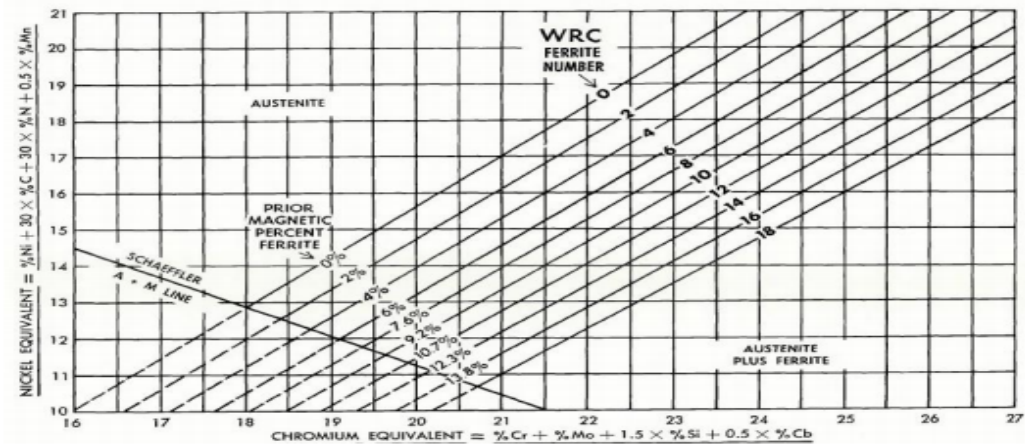
Figura 13 - Exemplos de morfologias da ferrita delta na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos.



Fonte: MODENESI, 2001.

Os elementos de liga apresentam fortes influências na microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades de soldas de aços inoxidáveis austeníticos. O Nitrogênio (N), por exemplo, apesar de não ser considerado nas expressões do diagrama de Schaeffler, é um forte estabilizador de austenita. Para aços inoxidáveis austeníticos com consideráveis percentuais de N e com valores de Ni equivalente superiores a 10%, utiliza-se o Diagrama de Delong (Figura 14), que, ao utilizar o Método Magnético para determinar os percentuais de Ferrita δ pode vir a ser considerado mais preciso que o diagrama de Schaeffler.

Figura 14 - Diagrama de DeLong.



Fonte: DELONG, 1974.

2.4 Corrosão

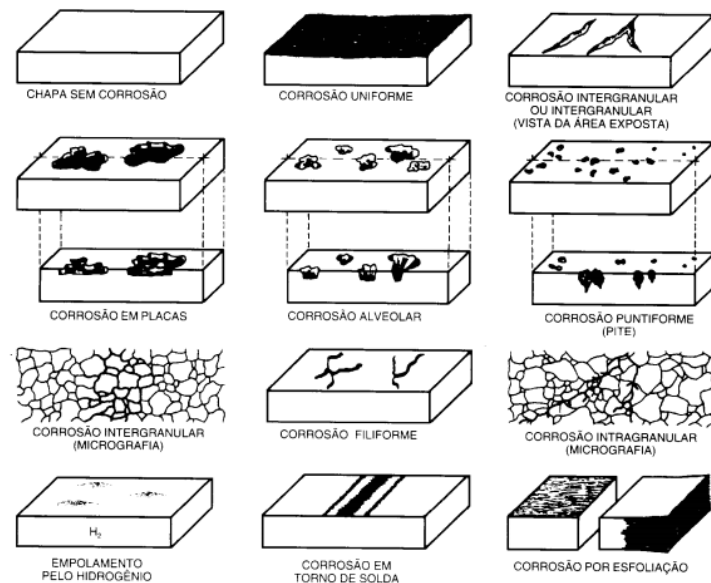
2.4.1 Introdução

Pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2003). Os efeitos causados pela corrosão em materiais metálicos são, em sua maioria, altamente indesejáveis. Isso se dá pelo fato que a deterioração de um material por corrosão desgasta e fragiliza a estrutura, tornando-o muitas vezes inoperante.

O conhecimento das formas que a corrosão pode ocorrer é de extrema importância, desse modo, pode-se avaliar o processo corrosivo sob diversos aspectos, como morfologia, as causas ou mecanismos, fatores mecânicos, meio corrosivo e localização do ataque.

Os tipos de corrosão são bastante variados, e o conhecimento desses tipos auxilia na aplicação de medidas adequadas para proteção. A Figura 15 demonstra de forma esquemática vários desses tipos de corrosão.

Figura 15 - Formas de corrosão.



Fonte: GENTIL, 2003.

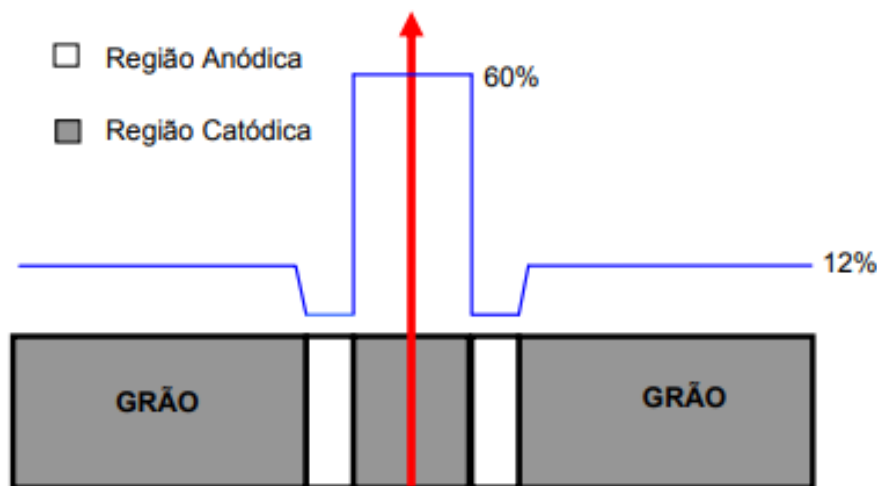
Dentre os tipos apresentados a corrosão por pite pode ser uma das mais prejudiciais, pois apesar de afetar uma pequena área da superfície do material metálico, esse processo age de maneira rápida, causando perda de espessura do material metálico originando perfurações e pontos de concentradores de tensões, ocasionando a diminuição da resistência mecânica do material e conseqüentemente a possibilidade de fratura (GENTIL, 2003).

Uma estimativa da resistência à corrosão por pite de um aço inoxidável pode ser feita através de sua composição química pela determinação do índice PRE (*Pitting Resistance Equivalent*), que leva em conta os principais elementos responsáveis por conferir essa característica à estas ligas (DOS SANTOS JR; BIEHL; ANTONINI, 2017) e é calculado conforme apresentado da Equação 5.

$$\text{PRE} = \%Cr + 3,3\%Mo + 30\%N \quad (5)$$

Outro tipo de corrosão que afeta os aços inoxidáveis austeníticos é a corrosão intergranular. Este tipo de corrosão tem origem na sensitização, e consiste no empobrecimento de cromo nas áreas adjacentes aos contornos de grão, atingindo um valor abaixo do crítico de 12% para a formação do filme passivo, devido à precipitação de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6) nos contornos de grão (FERREIRA, 2008). Este processo, representado na Figura 16, promove a aparição de áreas catódicas ricas em cromo (região central dos grãos e contornos de grão) e áreas anódicas pobre em cromo (áreas adjacentes aos contornos), o que gera uma pilha ativa-passiva com deterioração preferencial das áreas anódicas.

Figura 16 - Representação do perfil de concentração de cromo das regiões.



Fonte: GENTIL, 2003.

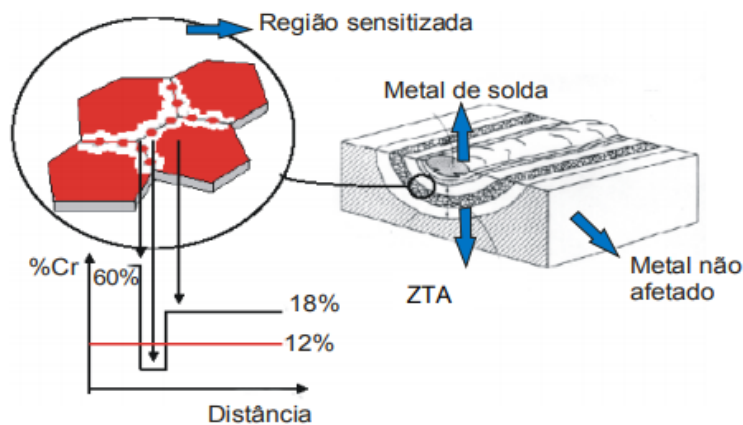
O processo de sensitização pode surgir durante o resfriamento lento após solubilização, durante a soldagem ou no alívio de tensões. Aços inoxidáveis austeníticos sensitizados, quando postos em operação ou expostos a algum meio corrosivo prejudicial, apresentam as regiões

adjacentes aos contornos de grão bastante fragilizadas e, pelo fato de se desenvolver microscopicamente, esse tipo de corrosão é de difícil percepção e muito danosa ao aço (GENTIL, 2003).

Os processos de soldagem normalmente imprimem um ciclo térmico de aquecimentos e resfriamentos de maneira não homogênea nas zonas termicamente afetadas (ZTA's). Esta condição pode propiciar o desenvolvimento de diferenças microestruturais que estão relacionadas com a composição química, o tamanho de grão, a possíveis transformações de fase e ao aparecimento de novos precipitados (Cr_{23}C_6) nos contornos de grãos dos aços inoxidáveis austeníticos (FEDELE, 2004).

Deste modo, ao atingir a faixa de temperatura na qual propicie ao metal uma precipitação de fases secundárias, a ZTA poderá concentrar, em seus contornos de grão, precipitados como o carboneto de cromo. Assim, conforme a Figura 17 ilustra, o tamanho de grão tem forte influência na cinética de precipitação de Cr_{23}C_6 , dado que quanto maior for o tamanho de grão mais rapidamente haverá a precipitação nos contornos através do fenômeno da sensibilização contribuindo para um avanço da corrosão intergranular.

Figura 17 - Representação esquemática da sensibilização em uma junta.



Fonte: FEDELE, 2004.

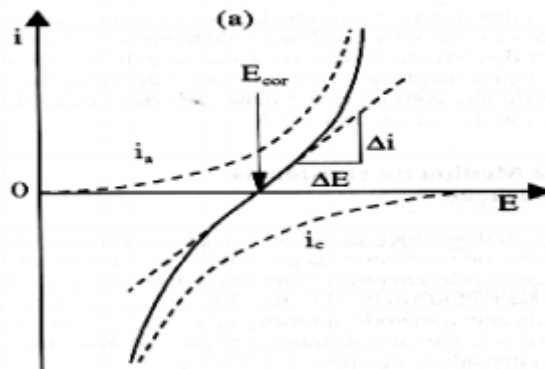
2.4.2 Ensaios de corrosão

2.4.2.1 Resistência de Polarização Linear

Este método determina a velocidade de corrosão através da realização da polarização anódica ou catódica de alguns milivolts em torno da resistência de polarização do metal ou liga metálica. Algumas dificuldades práticas que esse método evita são a influência da queda ôhmica e dos fenômenos de transporte que pode ser minimizada, uma vez que a densidade de corrente utilizada é baixa.

Pode ser visto na Figura 18, de forma esquemática, a linearidade nas proximidades da resistência de polarização quando as curvas de polarização são realizadas em escala linear. Deste modo, a resistência de polarização (R_p) é definida como o inverso da inclinação da reta, e é independente do grau de linearidade (SILVA, 2013).

Figura 18 - Curva de polarização esquemática em escala linear.



Fonte: SILVA, 2013.

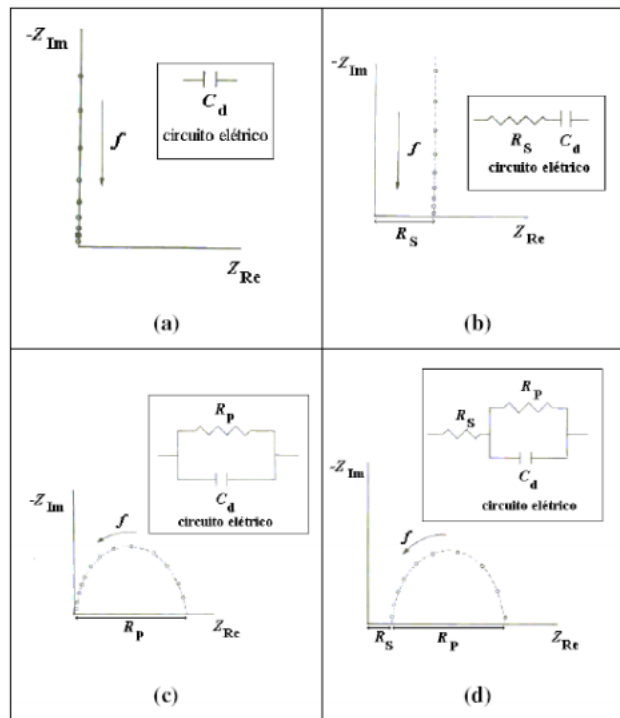
A resistência de polarização pode ser medida experimentalmente por um galvanostato ou um potenciostato. Os equipamentos disponíveis funcionam basicamente com um circuito semelhante. O método potenciostático ou potenciodinâmico se apresenta como mais favorável para uso em laboratório, dado que os procedimentos de ensaios podem ser bem controlados. Já o método galvanostático é experimentalmente mais simples e comercialmente mais usado devido à existência de dispositivos de monitoramento da resistência de polarização.

2.4.2.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

A espectroscopia de impedância eletroquímica consiste numa técnica onde utiliza-se um pequeno estímulo, geralmente tensão alternada tipo senoidal, a fim de perturbar o sistema, com o intuito de analisar a interface metal-solução. Essa pequena perturbação gera uma resposta que permite estudar os processos físicos, químicos e eletroquímicos que ocorrem na superfície do eletrodo de trabalho (SABARÁ, 2013). A impedância de um circuito representa o nível de dificuldade pelo qual um sinal elétrico (potencial ou corrente) enviado a esse circuito encontra ao percorrê-lo. Deste modo, os mecanismos eletroquímicos são revelados a partir um conjunto capacitor/indutor/resistor e a variação de comportamento destes em função da frequência f .

A forma mais usada para expressar os resultados obtidos através da técnica de impedância é o diagrama de Nyquist, que consiste em uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para uma frequência particular. Este diagrama é um plano complexo (real-imaginário) de coordenadas cartesianas, onde se tem nas abscissas a parte real (termos resistivos) e nas ordenadas a parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos) (SILVA, 2013). A Figura 19 apresenta o diagrama de Nyquist para quatro condições de circuitos elétricos.

Figura 19 - Diagrama de Nyquist para os seguintes circuitos elétricos: a) um único capacitor; b) associação de um resistor e um capacitor em série (RC série); c) associação de um resistor e um capacitor em paralelo (RC paralelo); d) Associação de um circuito RC paralelo em série com um resistor.



Fonte: SILVA, 2013.

2.5 Planejamento experimental

2.5.1 Introdução

O planejamento de experimentos, ou DOE (*Design Of Experiments*) é definido como “uma abordagem sistemática e rigorosa para a resolução de problemas de engenharia, que aplica princípios e técnicas na fase de coletas de dados de modo a assegurar a geração de conclusões de engenharia válida, defensável e suportáveis.” (FIRKA, 2011). A técnica DOE (*Design of Experiments*) é um método de experimentos que identifica as variáveis que mais influenciam no processo, buscando realizar o menor número possível de experimentos. O objetivo da técnica é alcançar um melhor desempenho do processo, minimizando a variabilidade e os custos envolvidos. Assim, este método foi elaborado para determinar, entre vários fatores, qual é o mais influente no processo. Inicialmente, é necessário conhecer a fundo e selecionar as variáveis independentes do processo e os seus níveis, para que se obtenha uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais (KANG; SHIN, 2021; VERRAN; MENDES; VALENTINA, 2008).

2.5.2 Tipos de planejamento

O arranjo mais comum é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, elevado ao número de fatores. Barbedo (2011) sugere que as principais vantagens desse arranjo é a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e seus repetíveis níveis, enquanto que uma desvantagem é a falta de identificação da variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis, além de demandar um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.

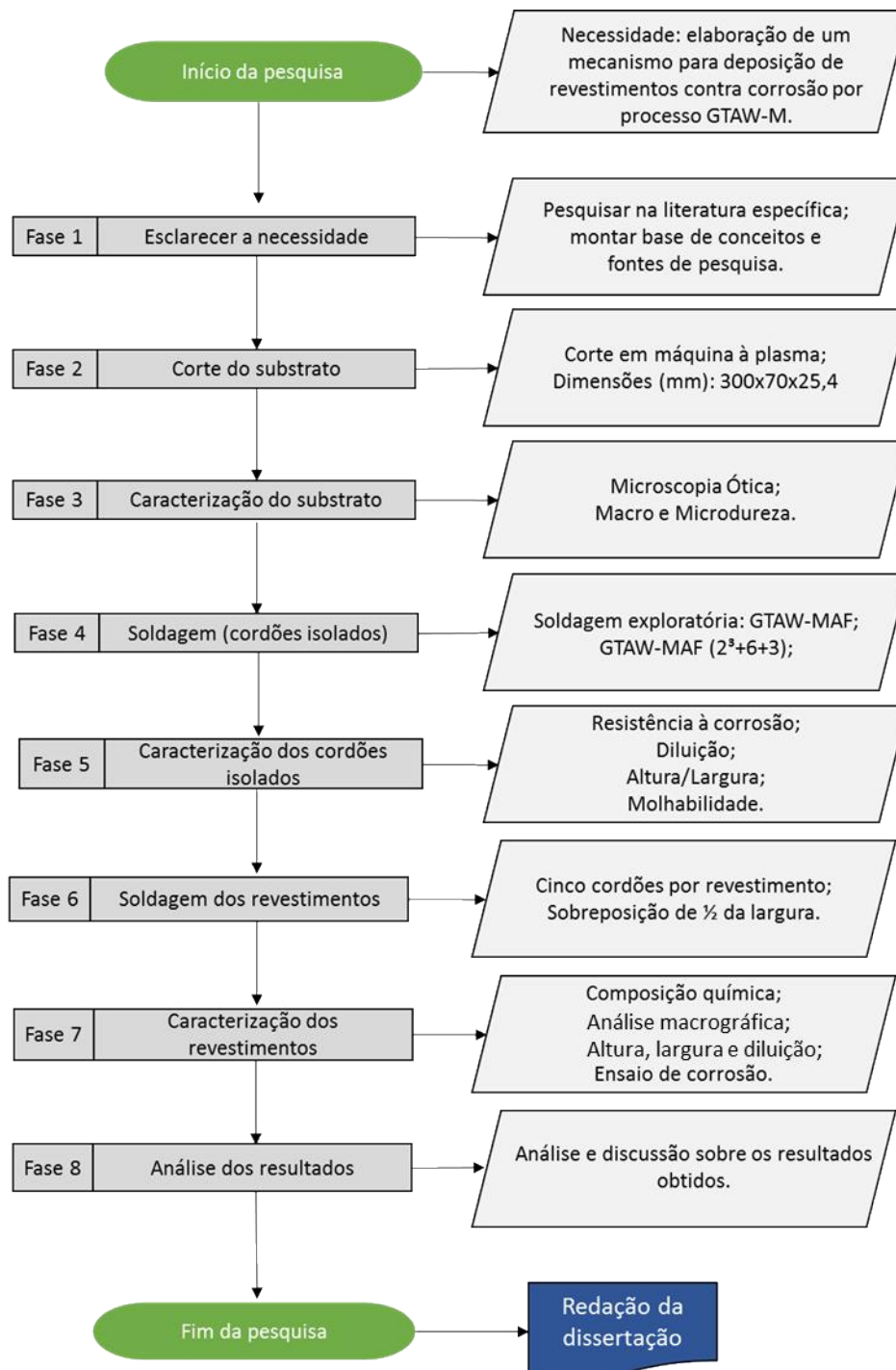
Dentro do planejamento, há ainda técnicas como repetições do ponto central ou a realização réplicas de todos os experimentos. Esta última tem a vantagem de reduzir o erro padrão, por ter maior quantidade de experimentos. Porém, dependendo da urgência em se obter os resultados ou do tempo para realização dos experimentos, é feita a escolha de qual metodologia é mais adequada. Se os experimentos são demorados e/ou se deseja obter resultados rápidos, então pode ser usado a repetição do ponto central, que gera menos experimentos do que se trabalhando com réplicas dos experimentos.

Caso não se obtenha bons resultados com o planejamento fatorial completo, a técnica do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) pode ser aplicada, onde são acrescentados ensaios nas condições axiais e dessa forma é possível visualizar, através das superfícies de respostas se existe uma curvatura no modelo, que desta vez é composto não só por termos lineares, mas também por termos quadráticos (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada nesse trabalho é apresentada pelo fluxograma da Figura 20. As etapas relacionadas a cortes e soldagem foram realizadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Campina Grande, e as etapas relacionadas a caracterizações e ensaios foram realizadas na Universidade Federal de Campina Grande.

Figura 20 - Fluxograma geral da pesquisa.



Fonte: autoria própria.

3.1 Fase 1 – Esclarecer a necessidade

Na primeira fase, foram desempenhadas pesquisas sobre os temas de maior relevância para o trabalho, que são: aços inoxidáveis austeníticos, a metalurgia e processo de soldagem GTAW e corrosão.

Para tanto, a base da pesquisa foram livros relacionados aos temas citados e materiais disponibilizados em sites de busca acadêmicos (*SciELO, Google Academic, periódicos capes*).

3.2 Fase 2 – Corte do substrato

Os substratos foram cortados no Instituto Federal da Paraíba, campus Campina Grande, com a utilização de uma máquina de corte a plasma. A chapa de aço carbono utilizada para substrato possuía 12,7 mm de espessura (meia polegada) e as dimensões selecionadas para corte foram 300mm de comprimento e 70mm de altura, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Cortes e dimensões do substrato.



Fonte: autoria própria.

3.3 Fase 3 – Caracterização do substrato

Inicialmente, decidiu-se por caracterizar o substrato de aço carbono dado que na sua aquisição no mercado de construção, não foi fornecida a sua composição química. Deste modo, uma amostra foi enviada ao laboratório da *TecMetal* (Rio de Janeiro) para que fosse submetida ao ensaio de Espectrometria de Emissão Ótica.

Em paralelo, foi realizada uma caracterização a partir da microestrutura do substrato no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), visando comparar os resultados obtidos em relação ao ensaio de Espectrometria de Emissão Ótica.

A partir da análise química por Espectroscopia de Emissão Ótica foi obtida a composição química do metal de base, conforme apresenta a Figura 22:

Figura 22 - Análise química por Espectroscopia de Emissão Ótica. Referência ASTM E415/2015.

Al	As	B	Bi	C	Ca	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	La	Mn
0.044	0.009	0.000	<0.002	0.166	0.001	<0.003	0.007	0.012	0.008	99.10	0.001	0.550
Mo	Nb	Ni	P	Pb	S	Si	Sn	Ti	V	W	Zn	Zr
<0.002	<0.003	0.027	0.019	<0.003	0.005	0.027	0.005	<0.001	<0.001	0.016	0.003	<0.001

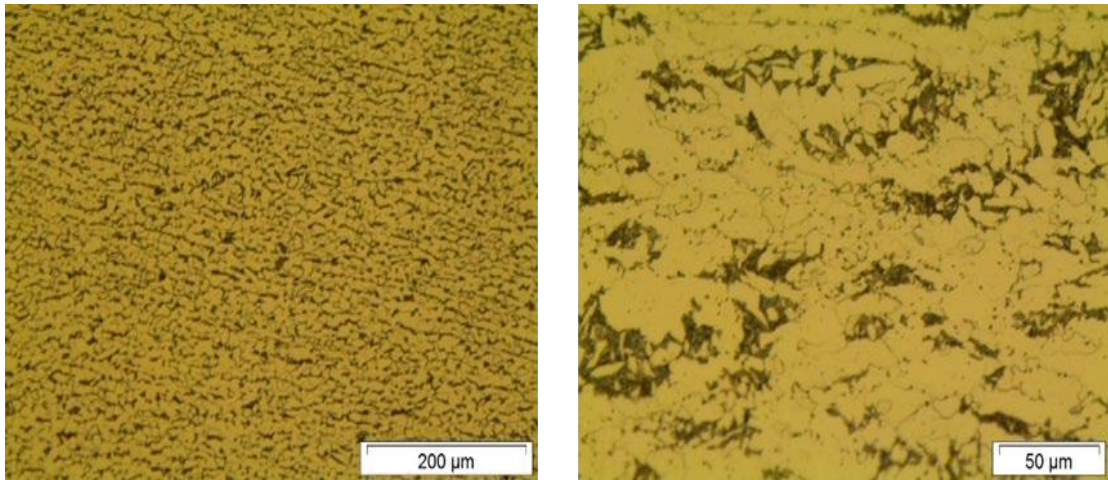
Fonte: relatório de análise química. TecMetal, 2019.

Visando uma melhor visibilidade, as amostras foram lixadas durante cinco minutos para cada lixa utilizada (220, 280, 320, 360, 400, 600 e 1200) e rotacionada em 90° após cada troca de lixa. Em sequência, um polimento foi realizado com aluminas nº4, nº3 e nº2.

Preparadas as amostras, estas foram atacadas com o reagente Nital 2% (98% álcool etílico + 2% ácido nítrico concentrado) e a caracterização microestrutural foi realizada via microscopia ótica, com a utilização de um Microscópio Olympus BX 51M.

As metalografias agregaram à análise da composição química as imagens da microestrutura do substrato, que se apresentou com baixo teor de carbono, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Microestrutura do substrato. Ataque nital 2%. Aumento de 50 e 200x.

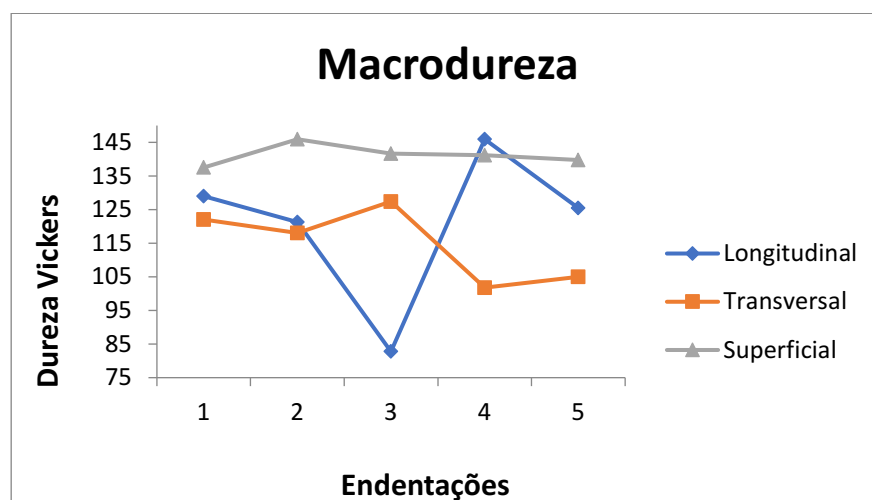


Fonte: autoria própria.

Também foram realizados ensaios de dureza Vickers para caracterização do substrato. Para tanto, foram analisadas amostras superficiais, longitudinais e transversais do metal de base. Foram realizadas 5 endentações com 3kg de carga e um tempo de aplicação de 30 segundos.

Os resultados de dureza também apontam propriedades semelhantes às encontradas nos aços SAE 1020, conforme apresentado na Figura 24, que apresenta os valores médios para as análises longitudinais, transversais e superficiais e no Quadro 3 que apresenta os valores médios de dureza nessas 3 direções.

Figura 24 – Distribuição da macrodureza do substrato.



Fonte: autoria própria.

Quadro 3 - Valores médios de dureza do substrato.

Amostra	Macro dureza (Vickers)	Desvio padrão (Vickers)
Longitudinal	120,87	23,26
Transversal	114,83	11,02
Superficial	141,20	3,08

Fonte: autoria própria.

3.4 Fase 4 – Soldagem (cordões isolados)

O equipamento utilizado para o processo GTAW-MAF foi uma fonte de soldagem multiprocesso DIGIPlus A7 que se encontra no Laboratório de Soldagem e Manutenção (LABSeM) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus Campina Grande, conforme a Figura 25. Esta fonte possui sistema de aquisição de dados o que possibilita a avaliação, entre outros parâmetros, da corrente e tensão média de soldagem durante o processo. O Apêndice A apresenta tais valores.

Figura 25 - Fonte de soldagem multiprocesso DIGIPlus A7.



Fonte: autoria própria.

O Quadro 4 apresenta os principais parâmetros de soldagem, enquanto o Quadro 5 apresenta a composição química do metal de adição.

Quadro 4 - Parâmetros de soldagem.

Parâmetro	Utilizado
Gás de proteção:	<i>Argônio</i>
Vazão do gás:	<i>15L/min</i>
Metal de adição:	<i>Arame AISI 317L</i>
Diâmetro do arame:	<i>1,2mm</i>
Polaridade:	<i>CC+</i>
Velocidade de soldagem:	<i>18,2 cm/min</i>
Distância eletrodo/bocal (DEB):	<i>5mm</i>
Distância arame/peça (DAP):	<i>2mm</i>

Fonte: autoria própria.

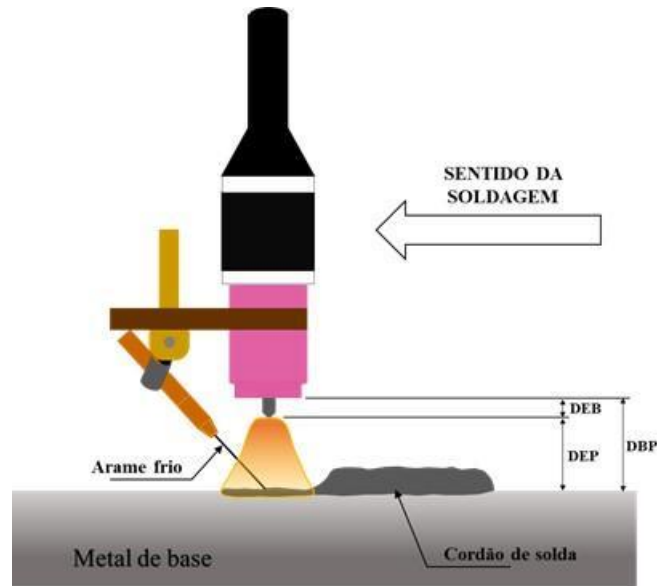
Quadro 5 - Composição química nominal do metal de adição E 317L.

Metal de adição	Composição (% em peso)														
	C	Cr	Ni	M o	M n	Si	C o	Ti	P	C u	Al	S	N	B	Fe
E317L	0,0 18	18, 84	13, 66	3, 56	1, 34	0, 42	0, 18	0,0 03	0,0 21	0, 11	0,0 03	0,0 13	0,0 58	0,00 12	B al.

Fonte: SANDVIK, 2010.

A Figura 26 apresenta as nomenclaturas estabelecidas para medir as distâncias do mecanismo bocal/eletrodo/arama/peça, enquanto o Quadro 6 estabelece a nomenclatura utilizada para cada medida.

Figura 26 - Representação dos parâmetros de soldagem DAE, DAP, DEP, DEB E DBO.



Fonte: autoria própria.

Quadro 6 - Nomenclaturas para medidas do mecanismo bocal/eletro/arame/peça.

Sigla	Parâmetro	Valor
DAP	Distância arame/peça	2mm – Fixa
DEB	Distância eletrodo/bocal	5mm – Fixa
DEP	Distância eletro/peça	Variável independente
DBP	Distância bocal/peça	Variável dependente
DAE	Distância arame/eletrodo	Variável dependente

Fonte: autoria própria.

Além da alimentação via bobina, a movimentação da tocha foi mecanizada com a utilização de um trator de soldagem, conforme a Figura 27. Foi utilizado um sistema de aquisição de dados para o monitoramento das tensões e correntes.

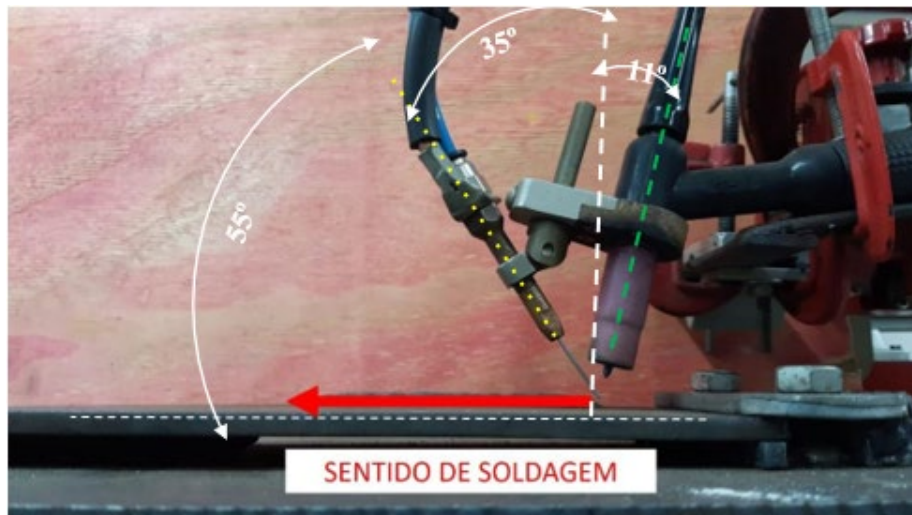
Figura 27 - Tocha GTAW acoplada ao trator de soldagem.



Fonte: autoria própria.

O metal de adição foi depositado em direção paralela ao deslocamento da tocha, anterior ao eletrodo, de modo que o arco elétrico atue diretamente sobre a poça de fusão, diminuindo a penetração. Essa técnica pode ser denominada como “empurrando a solda”, e é ilustrada na Figura 28.

Figura 28 - Posição da tocha “empurrando a solda”.



Fonte: autoria própria.

Inicialmente, foram realizados 32 cordões exploratórios isolados através do processo GTAW-MAF visando obter tanto os limites dos parâmetros do equipamento como auxiliar na definição de quais parâmetros de soldagem seriam fixados e quais seriam variáveis. A Figura

29 apresenta a variação do comportamento dos cordões para diferentes parâmetros de soldagem utilizados.

Figura 29 - Cordões exploratórios.



Fonte: autoria própria.

Os parâmetros definidos como variáveis foram a velocidade de alimentação de arame (V_a , em m/min), corrente elétrica (I , em amperes) e distância do eletrodo/peça (DEP). Após os cordões exploratórios serem analisados superficialmente, foram definidos os valores máximos e mínimos para cada parâmetro variável, conforme o Quadro 7. O Quadro 8 apresenta a matriz de planejamento de experimentos elaborada, com três parâmetros variáveis, adição de três pontos centrais e dois pontos axiais (2^3+6+3), resultando em 17 ensaios.

Quadro 7 - Níveis testados / Variáveis para soldagem no processo GTAW-MAF.

NÍVEIS TESTADOS VARIÁVEIS	-1,68	-1	0	1	1,68
	V_a (m/min)	2,3	3,0	4,0	5,0
I (A)	186,4	200,0	220,0	240,0	253,6
DEP (mm)	8,3	10,0	12,5	15,0	16,7

Fonte: autoria própria.

Quadro 8 - Matriz de planejamento (2^3+6+3).

ENSAIOS	Ordem aleatória	V_a	I	DEP
1	8°	-1	-1	-1

2	17°	1	-1	-1
3	4°	-1	1	-1
4	15°	1	1	-1
5	6°	-1	-1	1
6	11°	1	-1	1
7	3°	-1	1	1
8	9°	1	1	1
9	1°	-1,68	0	0
10	13°	1,68	0	0
11	16°	0	-1,68	0
12	7°	0	1,68	0
13	14°	0	0	-1,68
14	12°	0	0	1,68
15	5°	0	0	0
16	2°	0	0	0
17	10°	0	0	0

Fonte: autoria própria.

Para cada chapa de substrato foram realizados três cordões isolados, sendo o primeiro apenas para aquecimento, a fim de não se iniciar a solda em chapas frias, e com todos os parâmetros fixos (logo não contabilizando como um ensaio), visando garantir o aquecimento do equipamento e as mesmas condições de temperatura para todas as chapas. Foi utilizado um ignitor manual para abertura do arco elétrico e a ordem de realização dos ensaios foi aleatória. Os parâmetros fixados para o cordão de aquecimento foram estabelecidos conforme o Quadro 9:

Quadro 9 - Parâmetros para o cordão de aquecimento.

Parâmetro	Valor
Corrente (I)	200A
Velocidade de alimentação (Va):	0,1m/min
Distância eletrodo/peça:	10mm

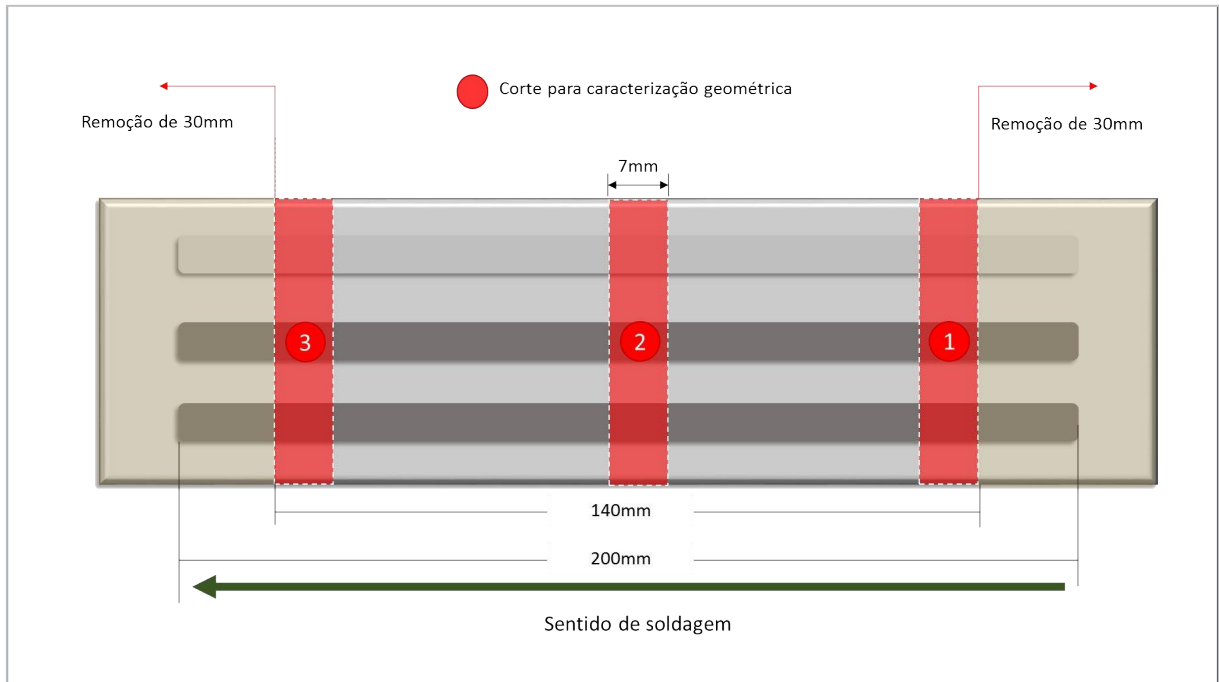
Fonte: autoria própria.

3.5 Fase 5 – Caracterização dos cordões isolados

Após a soldagem dos cordões isolados foram realizados quatro cortes transversais nos substratos visando a caracterização dos cordões. Os cortes foram realizados com o auxílio de uma cortadeira metalográfica, presente no Laboratório de Materiais para Indústria de Petróleo e Tubulações Industriais (LABMAT) no IFPB, campus Campina Grande. Os primeiros e

últimos 30mm de cada cordão foram descartados, visando avaliar a continuidade dos 140mm restantes. Cada amostra foi retirada com 7mm de largura. A Figura 30 ilustra a disposição dos cortes no substrato. A Figura 31 apresenta seções das chapas após cortes transversais.

Figura 30 – Chapa e cortes para caracterização dos cordões isolados.



Fonte: autoria própria.

Figura 31 - Cortes transversais das chapas.

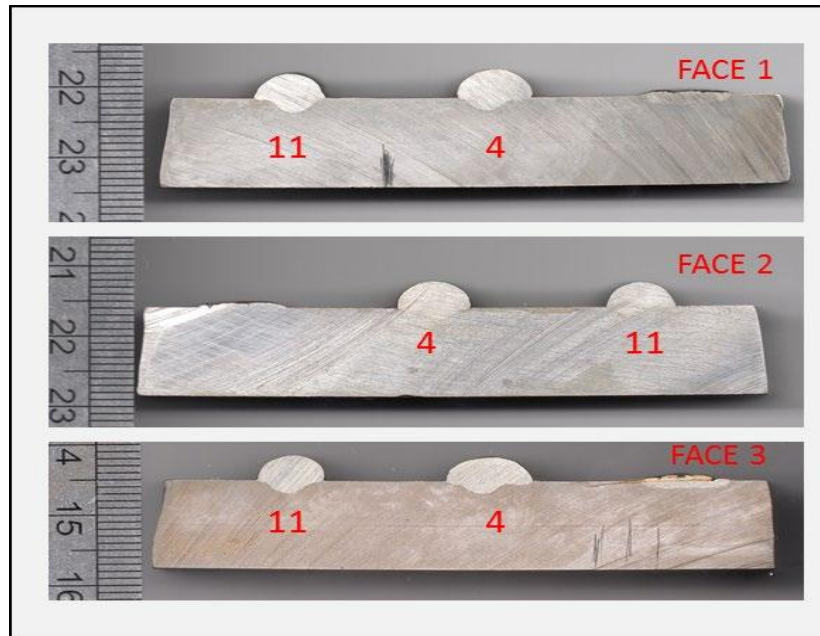


Fonte: autoria própria.

Após o corte, três amostras de cada cordão foram digitalizadas. A Figura 32 apresenta as seções transversais obtidas de uma das chapas. Os parâmetros usados como respostas para o planejamento de experimento e que foram analisados e comparados são a diluição (%),

molhabilidade ($^\circ$), altura (mm) e largura (mm) dos cordões. Tais respostas serviram como auxílio para a escolha dos parâmetros a serem utilizados nos revestimentos.

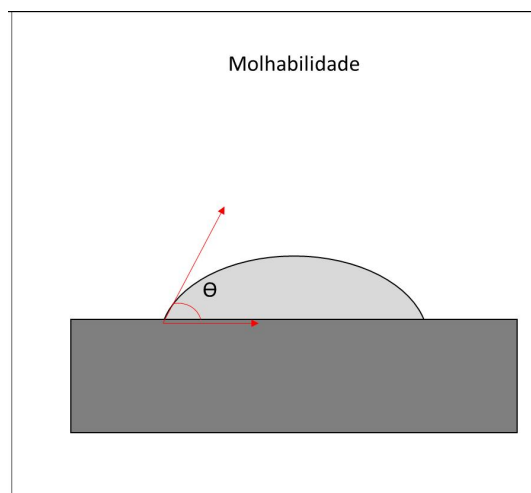
Figura 32 - Imagens das seções transversais para os cordões 4 e 11.



Fonte: autoria própria.

Para calcular a diluição, altura/largura e molhabilidade as seções transversais foram atacadas de modo a destacar o metal de solda no substrato, e com a utilização de programa computacional CAD (*Computer Aided Design*) foram determinadas as medidas das áreas. O cálculo para obter os resultados de diluição foi apresentado na Equação (4) e a Figura 33 apresenta a medida da molhabilidade.

Figura 33 – Demonstração para medição da molhabilidade.



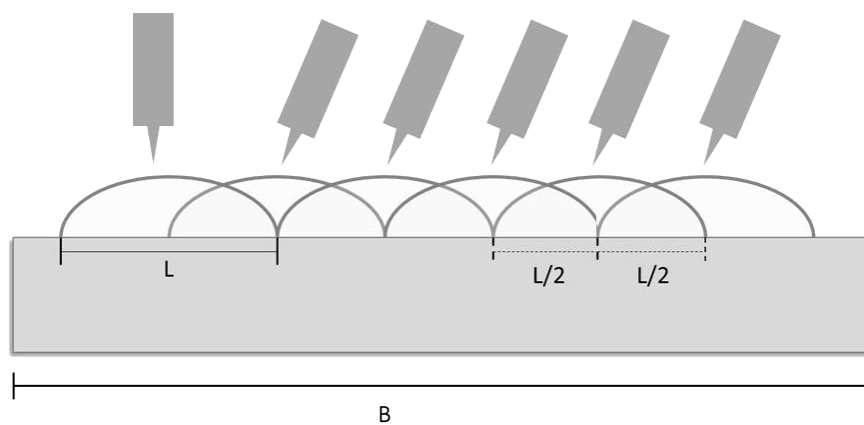
Fonte: autoria própria.

A molhabilidade é dada a partir da medida do ângulo de reforço (θ). Quanto menor for o ângulo de reforço, maior será a molhabilidade.

3.6 Fase 6 – Soldagem dos revestimentos

Utilizando as repostas da Análise de Variância (ANOVA), foram selecionados três parâmetros para realização da soldagem dos revestimentos via processo GTAW-MAF. Os parâmetros selecionados levaram em conta também a baixa presença de descontinuidades observadas nas seções transversais dos cordões isolados. Para cada revestimento, 6 cordões foram depositados no substrato com uma sobreposição de 50%, ou seja, a distância para deposição entre os cordões será a metade da largura de cada cordão anterior, conforme a Figura 34. Essa disposição foi escolhida dada a maior praticidade para alinhamento dos cordões de sobreposição, além de um maior preenchimento da área revestida. Após a realizações de revestimentos testes, decidiu-se diminuir a velocidade de soldagem de 18,2 cm/min (conforme utilizada nos cordões isolados) para 14cm/min visando aumentar o tempo de deposição de metal de adição e promover uma melhor fixação deste no substrato. Para cada revestimento, após a deposição do primeiro cordão, a tocha foi inclinada em 7° para os 5 próximos cordões, visando melhor aderência e diminuição de falhas por preenchimento. Tal condição também é representada na Figura 34. As soldagens foram executadas no Instituto Federal da Paraíba - IFPB, campus Campina Grande, com o mesmo equipamento utilizado na Fase 4.

Figura 34 – Representação do espaçamento entre os cordões no revestimento e inclinação da tocha.



Fonte: autoria própria.

Antes da deposição de cada cordão foi realizada a afiação do eletrodo de tungstênio. Após testes com três angulações diferentes, verificou-se que com uma angulação em torno de 30° na ponta do eletrodo conseguia-se maior estabilidade no arco e, conseqüentemente, maior regularidade na deposição, conforme apresenta a Figura 35. A Figura 36 demonstra o perfil geométrico desejado da ponta do eletrodo e a maneira adequada para a sua afiação.

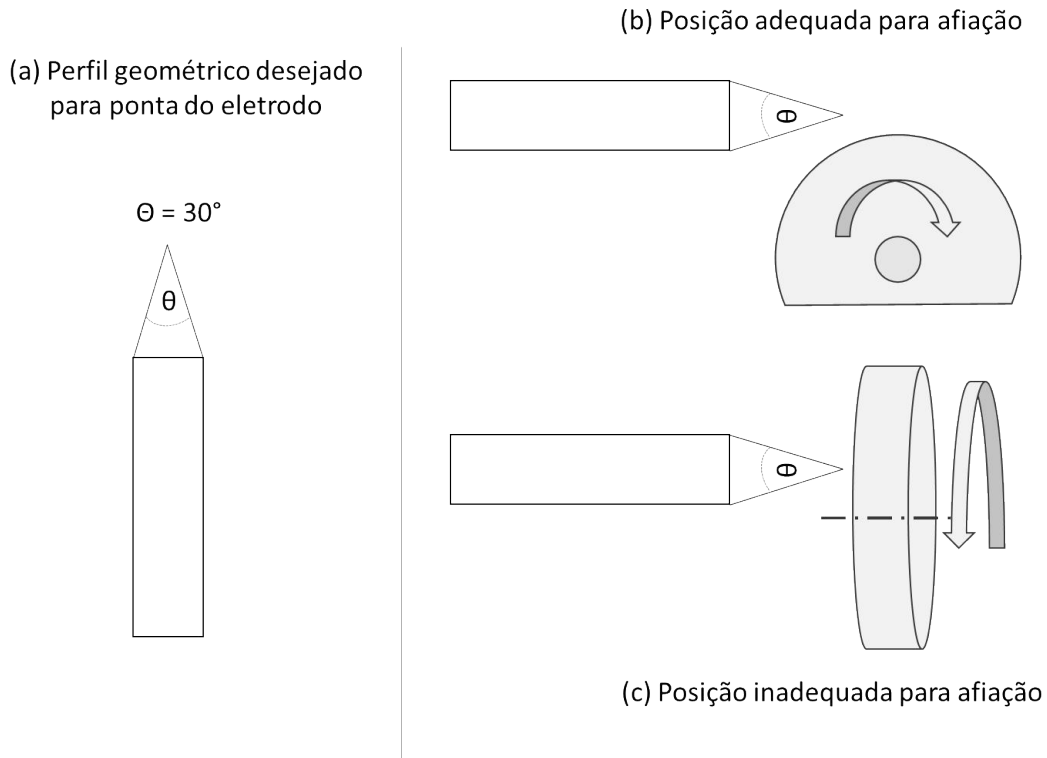
Figura 35 - Testes variando apenas a angulação do eletrodo.



TESTE 1 – 30°
TESTE 2 – 50°
TESTE 3 – 70°

Fonte: autoria própria.

Figura 36 - (a) Perfil geométrico desejado para ponta do eletrodo; (b) Posição adequada para afiação; (c) Posição inadequada para afiação.



Fonte: autoria própria.

Para cada um dos três parâmetros selecionados foram realizados revestimentos com e sem preaquecimento, totalizando seis chapas revestidas. A utilização de preaquecimento se deu a partir do interesse em verificar o efeito deste na diminuição de discontinuidades nas seções transversais dos revestimentos, bem como com o intuito de se obter perfis depositados apresentando boa molhabilidade, o que facilita a aderência de cordões sobrepostos e evita o aparecimento de vazios entre cordões.

O preaquecimento das chapas se deu através do aquecimento com chama neutra utilizando gás oxiacetileno. O preaquecimento foi realizado entre cada cordão depositado. A temperatura da chapa/cordão foi elevada, nos pontos 1, 3 e 4 da Figura 30, até 200°C e nesse momento a chama era desativada. O decaimento da temperatura na chapa foi acompanhado com a utilização de termômetro digital (marca Hikari, modelo HT-460) nos três pontos citados e, ao atingir 150°C, o processo de deposição de um novo cordão era iniciado.

O Quadro 10 apresenta os parâmetros selecionados para realização dos revestimentos, o Quadro 11 descreve as técnicas de soldagem utilizadas e a Figura 33 apresenta as nomenclaturas utilizadas para os revestimentos.

Quadro 10 - Parâmetros utilizados para deposição dos revestimentos.

Revestimento	Corrente	Distância Eletrodo/Peça (DEP)	Velocidade de Alimentação (Va)
Revestimento I – R1	200A	10mm	3m/min
Revestimento II – R2	240A	10mm	5m/min
Revestimento III – R3	220A	12,5mm	4m/min

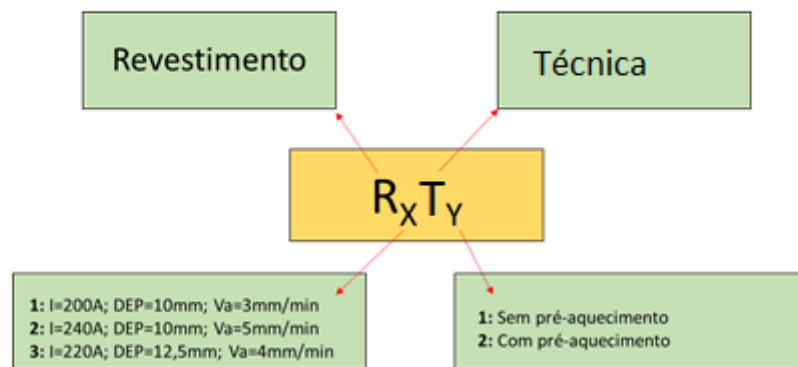
Fonte: autoria própria.

Quadro 11 – Técnicas utilizadas nos revestimentos.

Técnica 1 – T1	Técnica 2 – T2
Cordões realizados no sentido “empurrando”, com limpeza mecânica e sem a realização de um preaquecimento do substrato.	Cordões realizados no sentido “empurrando”, com limpeza mecânica e realização de um preaquecimento do substrato.

Fonte: autoria própria.

Figura 37 - Nomenclatura utilizada para os revestimentos.



Fonte: autoria própria.

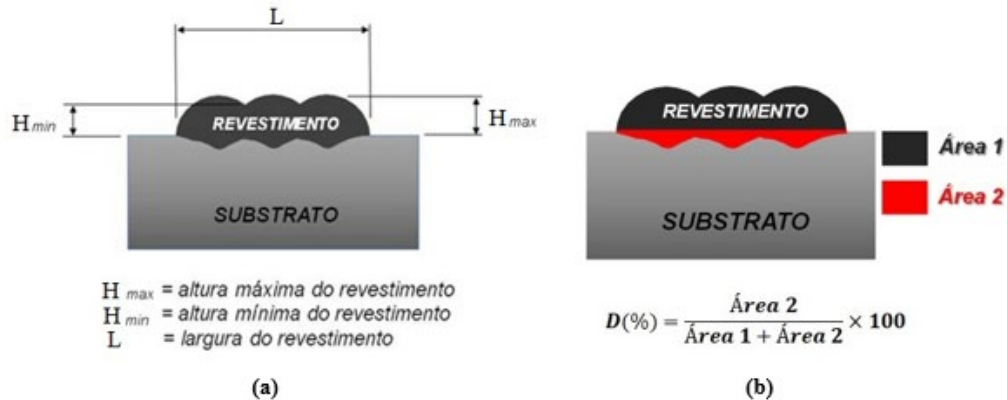
3.7 Fase 7 – Caracterização dos revestimentos

Caracterização geométrica e de deposição:

Para as análises dos revestimentos, primeiramente foi realizada uma análise visual, tanto na região superficial como interna (seção transversal), a fim de identificar falhas grosseiras como falta de preenchimento/fusão entre os cordões. A segunda análise foi baseada na geometria dos revestimentos, seguindo procedimento semelhante ao realizado nos cordões

isolados. A partir desta análise, obteve-se medidas de altura máxima, altura mínima, largura e diluição. As Figuras 38a e 38b apresentam a metodologia utilizada para realizar as medições desses parâmetros.

Figura 38 - (a) método de medição da altura máxima, altura mínima e largura. (b) método de medição e cálculo da diluição.



Fonte: autoria própria.

Ensaio eletroquímico:

Após verificação de falhas superficiais nos revestimentos onde aplicou-se a Técnica I (sem preaquecimento), decidiu-se caracterizar e comparar os resultados dos ensaios eletroquímicos dos três revestimentos realizados a partir da Técnica II, ou seja, R1T2, R2T2 e R3T2. Assim, foi realizado o aplainamento dos cordões de solda e retiradas amostras dos três revestimentos citados, além do metal de base (MB), com dimensões aproximadamente iguais a 20 x 20 mm no que concerne à largura e comprimento.

Foram realizados ensaios de polarização potenciodinâmica e de espectroscopia de impedância eletroquímica no Laboratório de Corrosão da UFCG, em conformidade com a norma ASTM G3-14 (2019). Os experimentos foram realizados em uma célula eletroquímica, na qual utilizou-se, além do eletrodo de trabalho (a amostra), um eletrodo de platina como contra eletrodo e um eletrodo de calomelano saturado (ECS) como eletrodo de referência.

Toda a área da superfície da amostra (4 cm²) foi exposta à solução de cloreto de sódio (NaCl) 3,5% (m/v). Anteriormente ao início dos testes, a solução foi purgada com gás nitrogênio. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios eletroquímicos foi um potenciostato/galvanostato PGSTAT302F da Autolab.

Em um primeiro momento, mediu-se o potencial de circuito aberto (OCP) até sua estabilização, durante 3600 segundos. Depois, os ensaios de espectroscopia de impedância

eletroquímica (EIE) foram realizados em uma faixa de varredura de 10 kHz a 104 Hz, com taxa de aquisição de 10 pontos por década e amplitude de 0,01 V. Por fim, os ensaios de polarização potenciodinâmica (PP) tiveram início em -0,3 V em relação ao OCP medido e foram finalizados em 1 V, a uma velocidade de varredura de 0,001 V/s. A análise das curvas deu-se pela utilização do software Nova 2.1.4.

Caracterização da composição química dos revestimentos:

Os revestimentos R1T1, R2T2 e R3T2 foram submetidos a ensaios de composição química por meio da utilização de um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX), modelo EDX-720, da marca Shimadzu.

Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A técnica de microscopia foi empregada para o estudo morfológico da estrutura superficial dos revestimentos eletrodepositados e tem como objetivo identificar presenças de grãos ou trincas nos revestimentos. Foi utilizado para o ensaio o Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo Vega3 da marca Tescan Oxford.

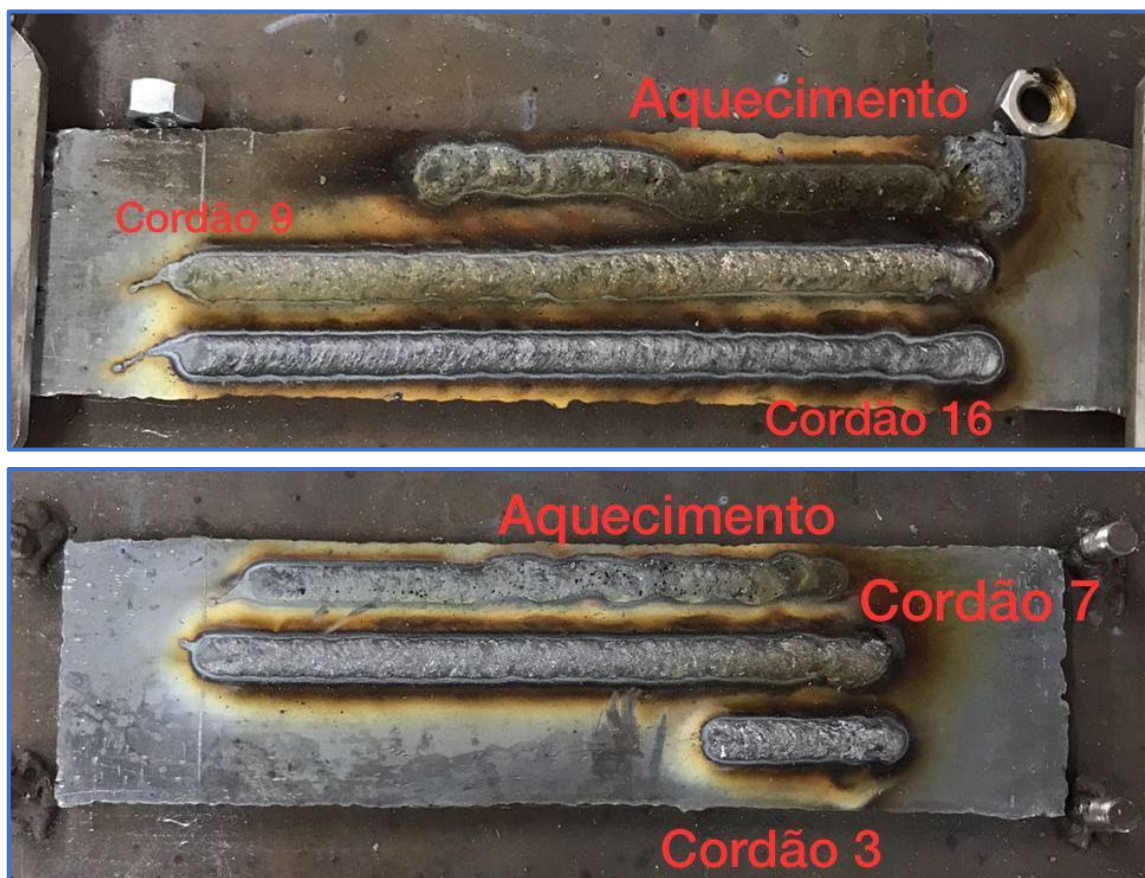
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Soldagem dos cordões isolados

A soldagem dos cordões isolados se deu conforme o planejamento traçado no Quadro 8, sendo realizados 17 cordões no total.

As Figuras 39-42 apresentam os aspectos dos cordões de solda obtidos de acordo com a variação dos parâmetros de soldagem.

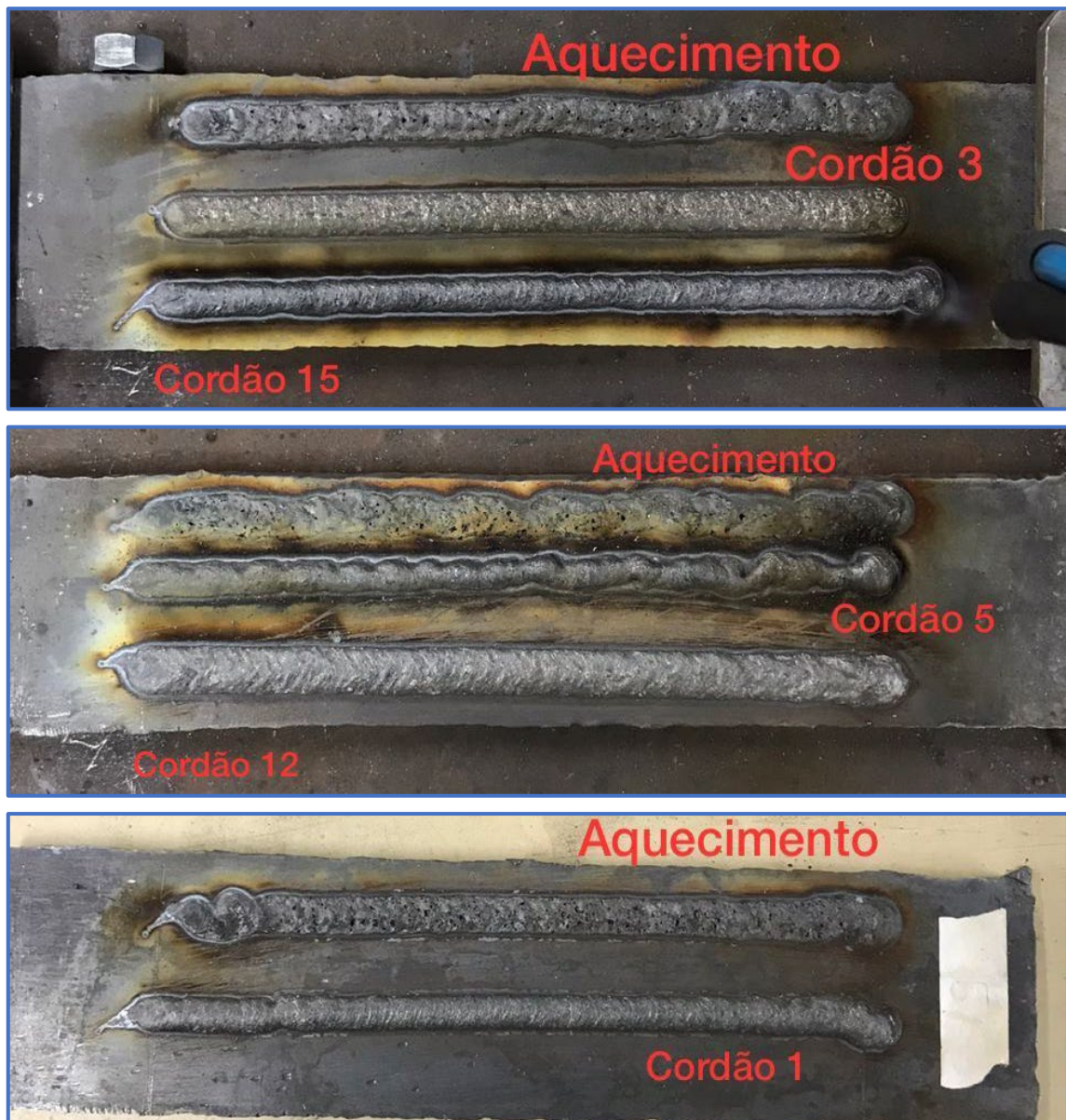
Figura 39 – Chapa 1: cordões 9 e 16; Chapa 2: cordão 7.



Fonte: autoria própria.

Para a soldagem dos cordões demonstrados na Figura 39, o arco elétrico apresentou estabilidade ao longo de praticamente toda a deposição. Os cordões 9 e 7 apresentaram visualmente um maior espalhamento, com cordões mais largos e com menores alturas em relação ao cordão 16, que apresentou comportamento mais estreito e com altura mais expressiva. Durante a soldagem do cordão 3 houve um empecilho com o dispositivo de fixação do terra, sendo necessário parar o processo e iniciar novamente na próxima chapa.

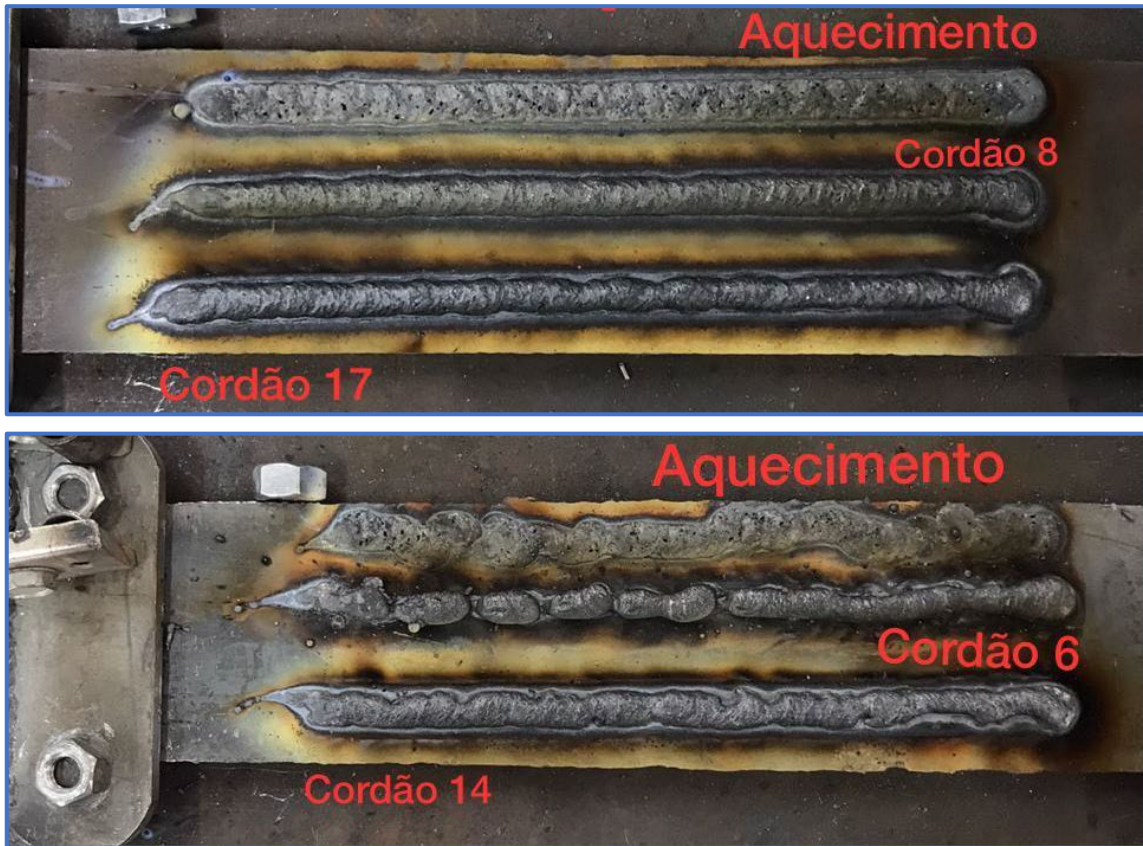
Figura 40 - Chapa 3: cordões 3 e 15; Chapa 4: cordões 5 e 12; Chapa 5: cordão 1.



Fonte: autoria própria.

Conforme é possível verificar na Figura 40, os cordões 3 e 12 apresentaram o mesmo comportamento de espalhamento, estabilidade e baixa altura, promovendo soldas para revestimento visualmente satisfatórias. O cordão 5 apresentou instabilidade ao longo de toda a soldagem, com pouca deposição e baixa largura. Esse comportamento pode se dar devido à baixa energia de soldagem aliada à baixa velocidade de alimentação utilizada nesse parâmetro. Os cordões 15 e 1 apresentaram comportamento estável, porém com baixo espalhamento. Para o cordão 1 foram verificadas baixa velocidade de alimentação e energia de soldagem, combinação que pode ter contribuído para a geometria estreita.

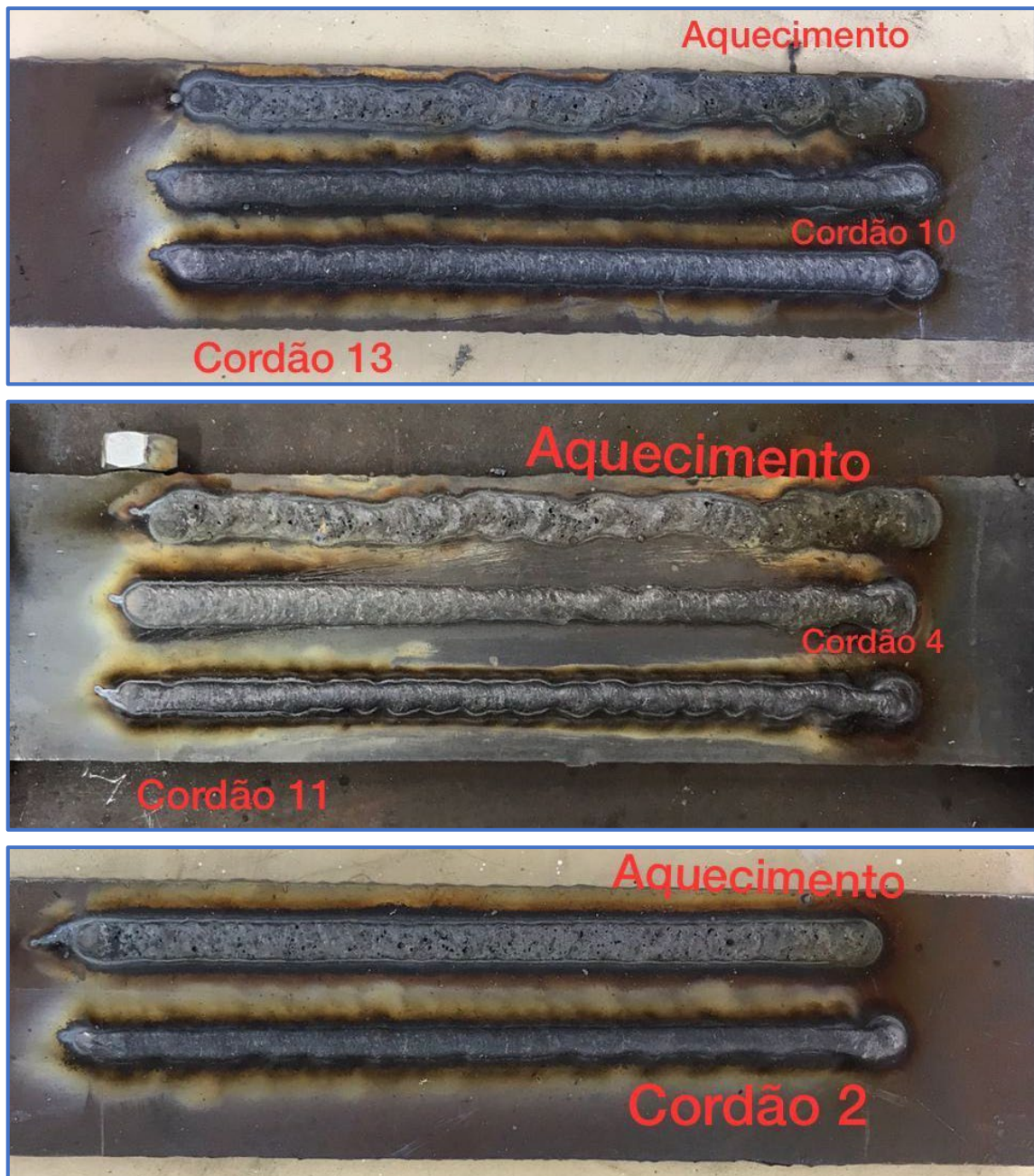
Figura 41 - Chapa 6: cordões 8 e 17; Chapa 7: cordões 6 e 14.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 41 verifica-se que os cordões 8 e 17 apresentaram um comportamento semelhante com baixo espalhamento. O cordão 6 apresentou, entre todos os cordões, a maior instabilidade de arco e pouca fusão do material depositado. Tal situação pode-se explicar devido à alta DEP aliada à uma baixa corrente. Devido à alta distância entre o eletrodo e a peça, e conseqüentemente, maior extensão do arco elétrico, é necessário que a tocha forneça energia suficiente para fundir o metal de adição que, para essa situação, era alimentado de maneira rápida entre a poça de fusão e o arco. Já o cordão 14, apesar da alta energia de soldagem verificada, apresentou instabilidade no arco elétrico. É importante ressaltar que esse cordão apresentou a maior DEP entre os ensaios realizados.

Figura 42 - Chapa 8: cordões 10 e 13; Chapa 9: cordões 4 e 11; Chapa 10: cordão 2.

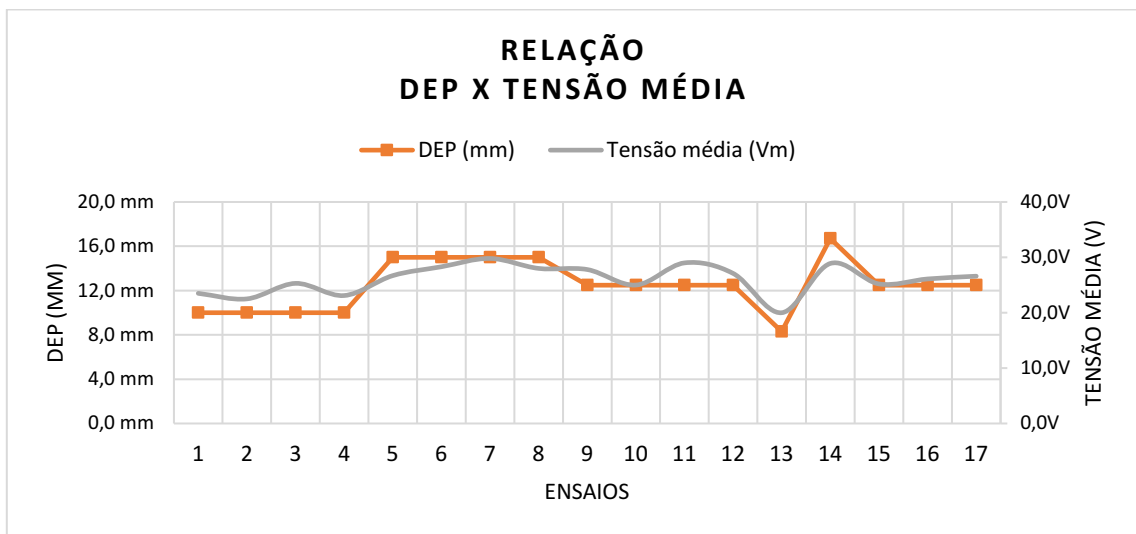


Fonte: autoria própria.

Na Figura 42 mais uma vez foi verificado que os cordões soldados com os maiores valores de DEP apresentaram instabilidade no arco elétrico, dificultando a deposição do metal de adição na poça de fusão. Em uma análise visual, cordões com maiores valores de corrente tendem a apresentar uma geometria mais larga e com menor altura. Com o aumento da velocidade de alimentação, aumenta-se a deposição de material na poça de fusão e, caso se tenha uma corrente suficientemente alta para elevar o aporte térmico e fundir mais material, é possível obter cordões com maiores alturas.

A Figura 43 apresenta a relação entre a distância eletrodo/peça e a tensão média. Como a energia de soldagem é diretamente proporcional a corrente e a tensão, para maiores valores de I e U_m , obtém-se maiores valores de H_L . Entretanto, sabe-se que uma maior distância entre o eletrodo e a peça tende a configurar um arco elétrico mais extenso. Essa maior extensão do arco elétrico promove um aumento na tensão média, condição verificada na imagem abaixo, onde as curvas de DEP e V_m apresentam comportamento semelhante.

Figura 43 - Gráfico de relação DEP x V_m .



Fonte: autoria própria.

4.2 Caracterização dos cordões isolados

Para as análises da altura, largura, diluição e molhabilidade foram obtidas medidas em três regiões do cordão de solda, conforme apresentado no esquema da Figura 30 (regiões 1, 3 e 4). O Quadro 12 apresenta os valores médios de cada um desses parâmetros juntamente com as variáveis independentes traçadas no planejamento experimental:

Quadro 12 - Respostas do planejamento experimental.

Ensaio	Variáveis Independentes			Respostas			
	Va (m/min)	I (A)	DEP (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)	Diluição (%)	Molhabilidade (°)
1	3,0	200,0	10,0	2,59	9,74	15,44	62,57
2	5,0	200,0	10,0	4,48	7,03	6,20	109,29
3	3,0	240,0	10,0	1,98	12,05	33,94	51,50
4	5,0	240,0	10,0	3,81	9,99	21,51	81,56
5	3,0	200,0	15,0	3,07	8,51	24,99	78,39
6	5,0	200,0	15,0	5,03	8,43	9,44	133,65
7	3,0	240,0	15,0	2,23	11,45	23,48	51,46
8	5,0	240,0	15,0	3,71	9,31	22,76	90,71
9	2,30	220,0	12,5	1,87	10,78	47,82	56,47
10	5,70	220,0	12,5	4,57	7,77	5,65	121,52
11	4,0	186,4	12,5	3,76	6,79	10,56	124,86
12	4,0	253,6	12,5	2,64	13,03	23,87	66,60
13	4,0	220,0	8,3	3,43	7,97	26,08	91,28
14	4,0	220,0	16,7	3,29	10,10	12,70	72,33
15	4,0	220,0	12,5	3,12	9,58	23,45	81,44
16	4,0	220,0	12,5	3,07	10,74	17,94	74,44
17	4,0	220,0	12,5	3,48	8,33	22,68	73,20

Fonte: autoria própria.

4.2.1 Análise da Reposta: Altura

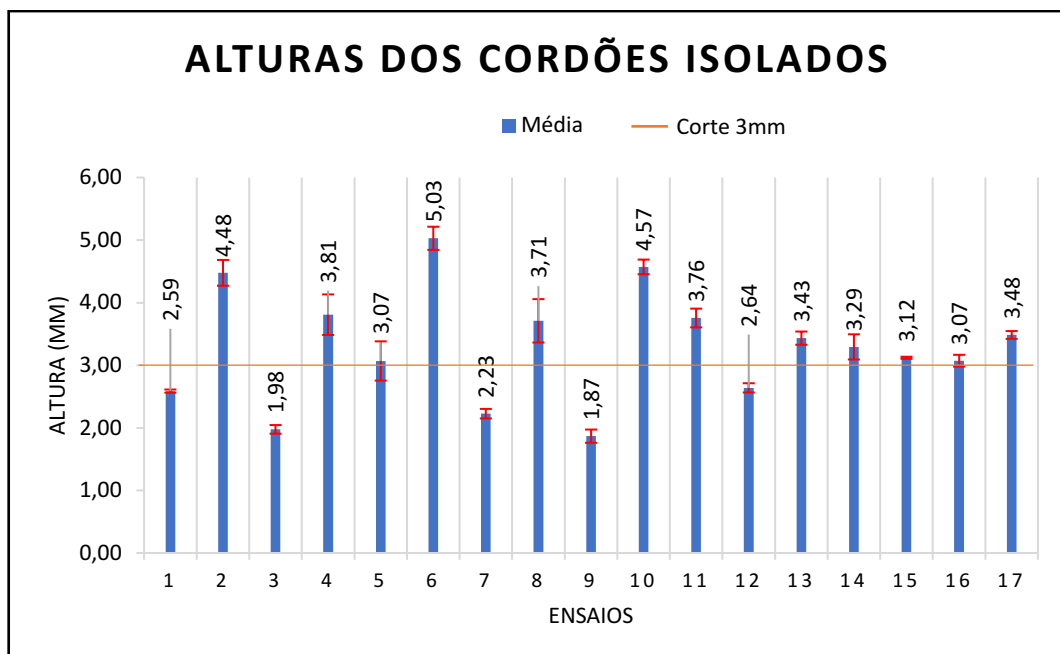
O Quadro 13 apresenta as medidas de altura obtidas a partir das seções transversais dos cordões isolados, enquanto a Figura 44 demonstra através de um gráfico as médias para cada cordão.

Quadro 13 - Alturas dos cordões isolados (em mm).

Ensaio	Face 1	Face 2	Face 3	Média	Desvio Padrão
1	2,62	2,58	2,57	2,59	0,03
2	4,30	4,43	4,70	4,48	0,21
3	2,04	1,98	1,90	1,98	0,07
4	3,88	4,09	3,46	3,81	0,32
5	3,37	3,09	2,75	3,07	0,31
6	4,89	5,24	4,96	5,03	0,19
7	2,15	2,22	2,31	2,23	0,08
8	4,03	3,76	3,34	3,71	0,35
9	1,76	1,97	1,88	1,87	0,11
10	4,61	4,66	4,44	4,57	0,12
11	3,69	3,65	3,93	3,76	0,15
12	2,71	2,57	2,64	2,64	0,07
13	3,32	3,44	3,54	3,43	0,11
14	3,27	3,10	3,50	3,29	0,20
15	3,14	3,10	3,12	3,12	0,02
16	3,02	3,18	3,02	3,07	0,09
17	3,42	3,49	3,55	3,48	0,06

Fonte: autoria própria.

Figura 44 - Média das alturas dos cordões isolados (em mm).



Fonte: autoria própria.

É possível verificar no Quadro 13 e na Figura 44 que o menor valor de altura medido nos cordões isolados foi de 1,87mm (cordão 9), enquanto o maior 5,03mm, no cordão 6. Apesar de possuir uma altura considerável, o cordão 6 apresentou diversas irregularidades como falta

de fusão e instabilidade do arco. A média de todas as alturas dos cordões foi 3,30mm, valor satisfatório para revestimentos quando se toma como base a norma N-1707, que recomenda uma altura líquida de no mínimo 3,00mm (PETROBRAS, 1999).

A partir da ANOVA com um nível de confiabilidade de 95%, foi observado que as variáveis Va e I apresentaram significância na relação com a altura. A variável DEP, juntamente com as interações entre as variáveis não apresentaram significância na correlação com as repostas de altura.

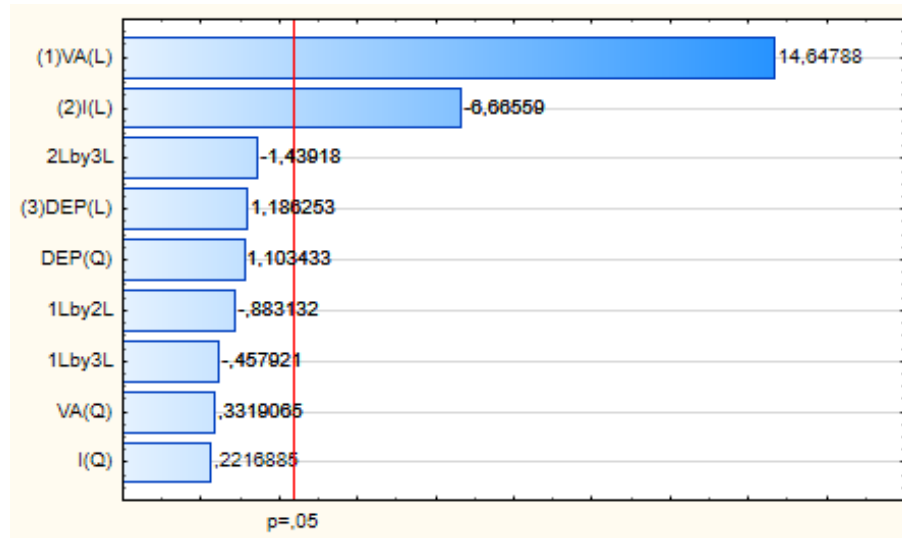
Quadro 14 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta altura, R.

Fator	SS	df	MS	F	p
VA (L)	10,02756	1	10,02756	214,5604	0,000002
VA (Q)	0,00515	1	0,00515	0,1102	0,749676
I (L)	2,07646	1	2,07646	44,4301	0,000286
I (Q)	0,00230	1	0,00230	0,0491	0,830885
DEP (L)	0,06577	1	0,06577	1,4072	0,274220
DEP (Q)	0,05690	1	0,05690	1,2176	0,306322
VA (L) by I (L)	0,03645	1	0,03645	0,7799	0,406470
VA (L) by DEP (L)	0,00980	1	0,00980	0,2097	0,660885
I (L) by DEP (L)	0,09680	1	0,09680	2,0712	0,193275
Error	0,32715	7	0,04674		
Total SS	12,69745	16			
R-sqr	0,97424				
MS Residual	0,0467354				
Adj	0,94111				
Ftabelado	3,29				

Fonte: autoria própria.

A Figura 45 apresenta o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados para a resposta altura. Com este gráfico é possível verificar que os fatores que cruzam a linha de referência ($p=0,05$) são estatisticamente significativos, e qual o nível de significância desses efeitos na resposta em questão. Verifica-se uma forte influência da velocidade de alimentação nos valores crescentes de altura, comportamento contrário e mais suavizado para a corrente.

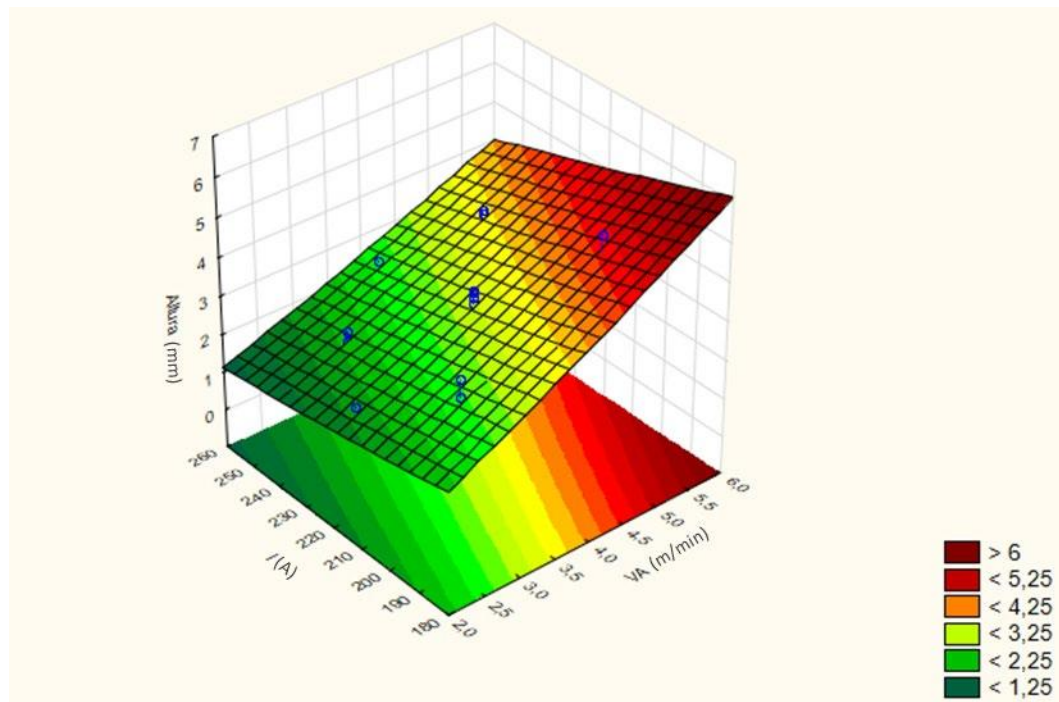
Figura 45 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Altura ($p=0,05$).



Fonte: autoria própria.

É possível avaliar, a partir da superfície de reposta presente na Figura 46, a influência da velocidade de alimentação e da corrente sobre a altura. Como percebe-se, para maiores valores de VA a tendência é que se obtenha maiores valores de altura. Tal condição pode se dar pelo fato de que quanto maior for a velocidade de alimentação, maior será a quantidade de metal depositado por unidade de comprimento. Já a corrente apresenta comportamento contrário, onde para maiores valores de corrente se obtém menores valores de altura. O aumento da corrente promove uma maior penetração e energia de soldagem, contribuindo para tal comportamento.

Figura 46 - Superfície de resposta: influência de I e VA sobre a altura, fixando a DEP em 12,5mm.



Fonte: autoria própria.

No Quadro 15 é apresentado um resumo das variáveis com maior significância em relação à altura e os ensaios que apresentaram os maiores e menores valores de reposita deste parâmetro.

Quadro 15 – Resumo dos ensaios com maiores e menores valores de altura.

Maiores valores de altura		VA (mm) (nível)	I(A) (nível)
Cordão 6	5,03 mm	5,0 (+1)	200,0 (-1)
Cordão 10	4,57 mm	5,70 (+1,68)	220,0 (0)
Cordão 2	4,48 mm	5,0 (+1)	200,0 (-1)
Menores valores de altura		VA (mm) (nível)	I(A) (nível)
Cordão 9	1,87 mm	2,30 (-1,68)	220,0 (0)
Cordão 3	1,98 mm	3,0 (-1)	240,0 (+1)
Cordão 7	2,23 mm	3,0 (-1)	240,0 (+1)

Fonte: autoria própria.

4.2.2 Análise da Resposta: Largura

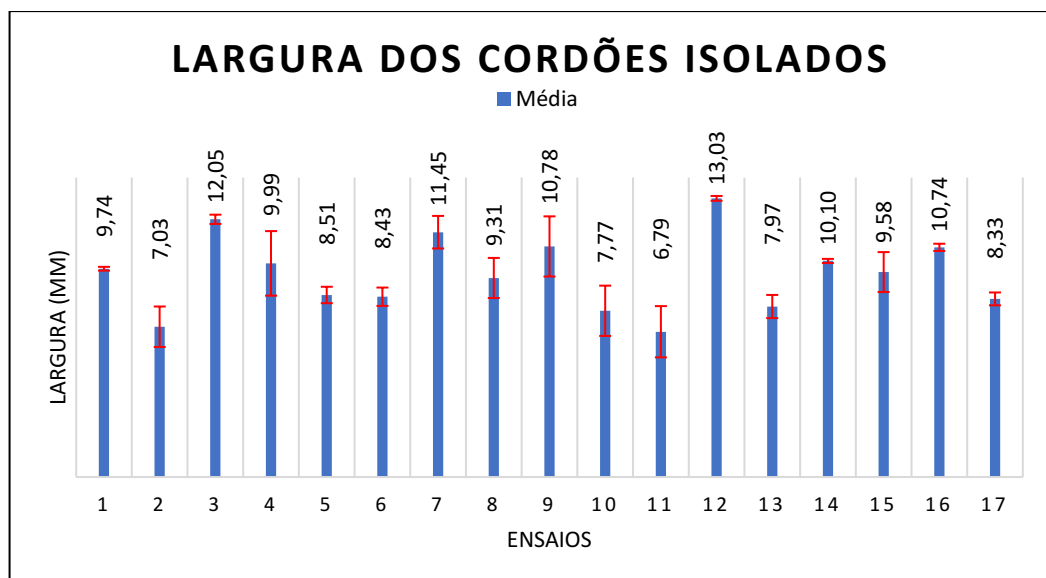
O Quadro 16 apresenta as medidas de largura obtidas a partir das seções transversais dos cordões isolados, enquanto a Figura 47 demonstra através de um gráfico as médias para cada cordão.

Quadro 16 - Largura dos cordões isolados (em mm).

Ensaio	Face 1	Face 2	Face 3	Média	Desvio Padrão
1	9,84	9,68	9,69	9,74	0,09
2	6,67	8,10	6,31	7,03	0,95
3	11,84	12,05	12,27	12,05	0,22
4	10,69	8,26	11,02	9,99	1,51
5	8,10	8,58	8,86	8,51	0,38
6	8,19	8,17	8,93	8,43	0,43
7	11,85	11,93	10,57	11,45	0,76
8	8,83	8,71	10,39	9,31	0,94
9	11,09	9,25	12,01	10,78	1,41
10	8,55	6,42	8,34	7,77	1,17
11	5,53	6,95	7,91	6,79	1,20
12	13,06	13,12	12,90	13,03	0,11
13	7,35	8,29	8,28	7,97	0,54
14	10,20	10,10	10,01	10,10	0,10
15	9,69	8,60	10,46	9,58	0,93
16	10,91	10,74	10,57	10,74	0,17
17	8,57	8,42	7,99	8,33	0,30

Fonte: autoria própria.

Figura 47 – Média das larguras dos cordões isolados (em mm).



Fonte: autoria própria.

É possível verificar que os cordões com maior e menor valor de largura medidos foram o 12 e 11, respectivamente. É interessante avaliar que o único parâmetro que variou entre esses dois ensaios foi a corrente nos níveis dos pontos axiais, ou seja, nos valores extremos.

Uma importante relação para a soldagem de revestimentos se dá entre os valores de altura e a largura do cordão, denominada R/L. Espera-se que essa relação apresente, para alturas satisfatórias, os menores valores possíveis, de modo que para uma dada altura se obtenha a maior largura possível. Uma maior largura de cordões promove economias de tempo e material devido ao maior preenchimento da área revestida com uma menor necessidade de passes de soldagem. O Quadro 17 apresenta os valores de R/L para os ensaios realizados, enquanto a Figura 48 demonstra esses valores de maneira gráfica.

Em seus trabalhos, Vergara (2015, 2017) obteve larguras de 10,78mm, 11,02mm e 12,50mm, valores em uma escala de grandeza semelhante à do presente trabalho. Contudo, as alturas obtidas foram de 2,32mm, 1,79mm e 1,21mm respectivamente, o que apresenta relações R/L de 0,22, 0,16 e 0,10. Apesar de perceber-se baixos valores de R/L, tais alturas não se apresentariam satisfatórias quando se toma, como base, a norma N-1707 (que prevê 3mm de altura).

Nas pesquisas de Silva (2015) observa-se um comportamento de maiores alturas (3,23mm, 4,25mm e 4,53mm) e menores larguras (10,36mm, 6,37mm e 4,06 respectivamente). Nesta condição, os valores da relação R/L foram de 0,31, 0,67 e 1,12 respectivamente.

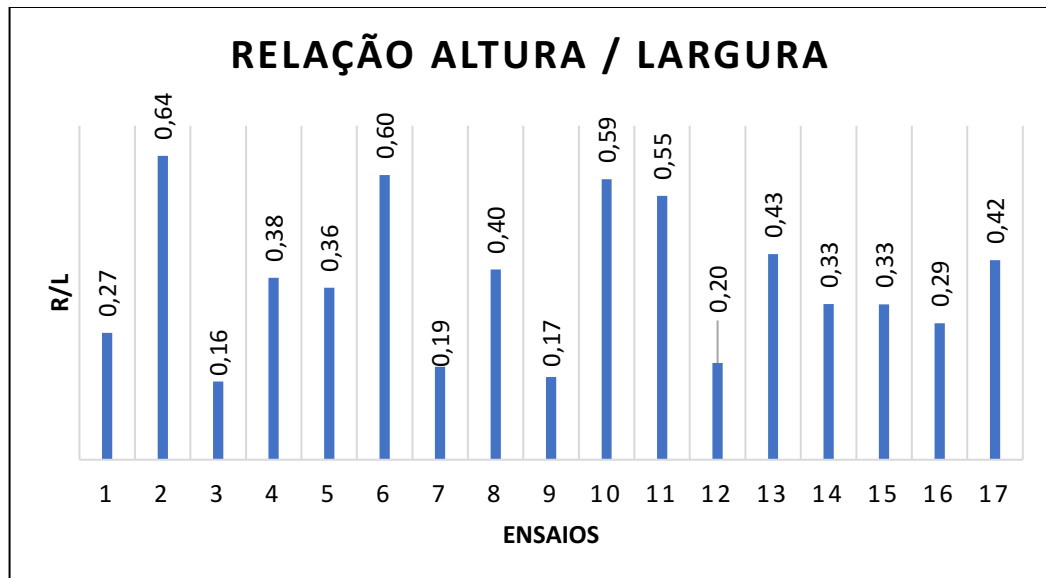
Quadro 17 - Relação altura/largura (R/L).

Ensaio	Altura (mm)	Largura (mm)	R/L
1	2,59	9,74	0,27
2	4,48	7,03	0,64
3	1,98	12,05	0,16
4	3,81	9,99	0,38
5	3,07	8,51	0,36
6	5,03	8,43	0,60
7	2,23	11,45	0,19
8	3,71	9,31	0,40
9	1,87	10,78	0,17
10	4,57	7,77	0,59
11	3,76	6,79	0,55
12	2,64	13,03	0,20
13	3,43	7,97	0,43
14	3,29	10,10	0,33
15	3,12	9,58	0,33
16	3,07	10,74	0,29

17	3,48	8,33	0,42
----	------	------	------

Fonte: autoria própria.

Figura 48 - Gráfico da relação entre a altura e largura, R/L.



Fonte: autoria própria.

A partir da ANOVA com um nível de confiabilidade de 95% apresentada no Quadro 18, foi observado que as variáveis VA e I apresentaram significância na relação com a largura. A variável DEP, juntamente com as interações entre as variáveis não apresentaram significância na correlação com as repostas de largura.

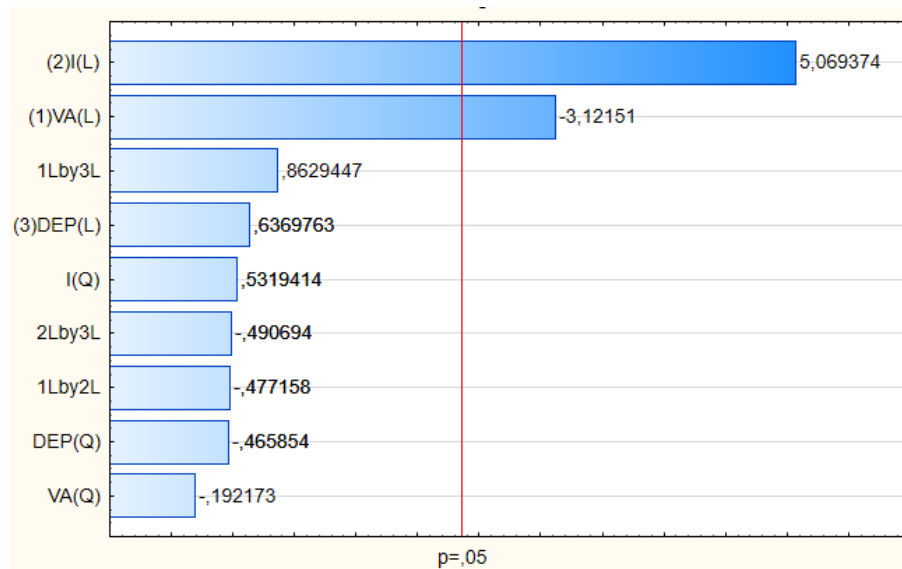
Quadro 18 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta largura, L.

Fator	SS	df	MS	F	p
VA (L)	10,63539	1	10,63539	9,74382	0,016808
VA (Q)	0,04031	1	0,04031	0,03693	0,853063
I (L)	28,05001	1	28,05001	25,69855	0,001448
I (Q)	0,30885	1	0,30885	0,28296	0,611225
DEP (L)	0,44286	1	0,44286	0,40574	0,544401
DEP (Q)	0,23688	1	0,23688	0,21702	0,655468
VA (L) by I (L)	0,24851	1	0,24851	0,22768	0,647787
VA (L) by DEP (L)	0,81281	1	0,81281	0,74467	0,416751
I (L) by DEP (L)	0,26281	1	0,26281	0,24078	0,638650
Error	7,64051	7	1,09150		
Total SS	48,91421	16			
R-sqr	0,8438				
MS Residual	1,091502				
Adj	0,64297				
Ftab	3,29				

Fonte: autoria própria.

A Figura 49 apresenta o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados para a resposta largura. Para tal situação, verificou-se a influência da corrente nos valores crescentes de largura, comportamento contrário e mais suavizado para a velocidade de alimentação.

Figura 49 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Largura ($p=0,05$).



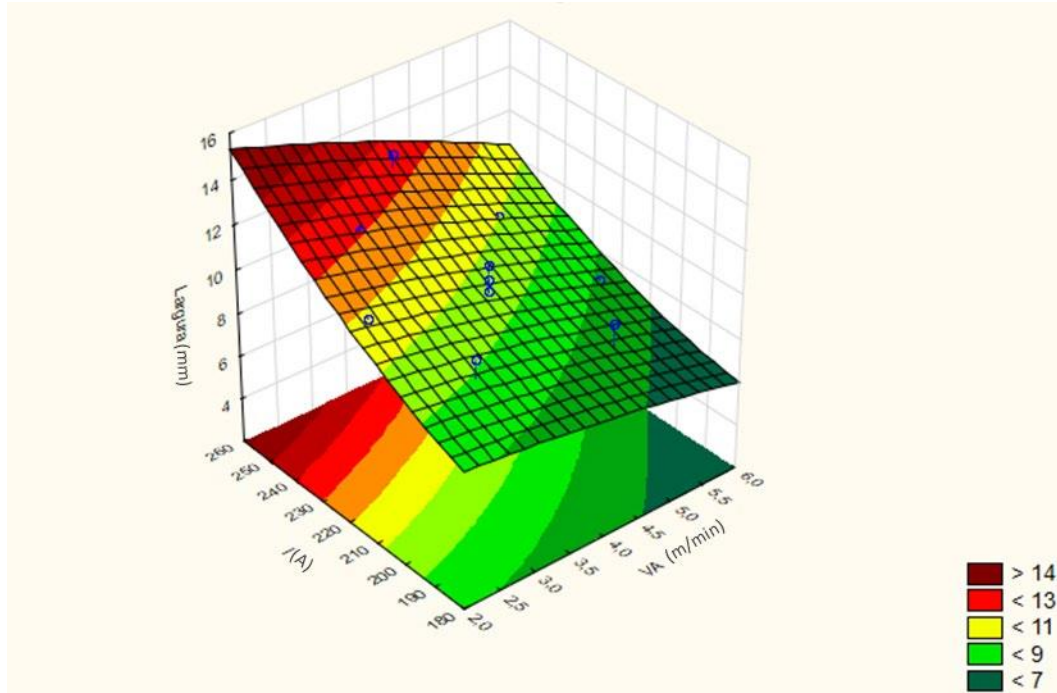
Fonte: autoria própria.

A superfície de resposta presente na Figura 50 demonstra a influência da corrente e da velocidade de alimentação sobre a largura. É possível perceber que para maiores valores de corrente, a tendência é que se obtenha maiores valores de largura. Essa condição pode ser dada pelo fato de que o aumento da corrente, ao fornecer maior energia de soldagem, promove o espalhamento cordão. DU *et al.* (2009) ressalta que o aumento da energia de soldagem leva a um acréscimo no aporte térmico fornecido para a formação da poça de fusão, o qual resulta no seu crescimento, tornando-a mais larga. Uma situação que demonstra esse comportamento se dá na análise dos cordões 11 e 12, que apresentaram respectivamente o menor e maior valor de largura entre os ensaios, variando entre si apenas os valores de corrente (-1,68 e +1,68, respectivamente). Uma vez que o aumento da tensão tende a promover cordões mais largos e planos, esperava-se verificar situação semelhante com o aumento da DEP.

Foi verificado que com o aumento da V_a , a largura tendeu a diminuir. Esse comportamento está em consonância com a literatura pesquisada (PADMANABAN, 2017; OLIVARES, 2018; SHAH, 2019). Segundo Spaniol (2020), ao aumentar a taxa de alimentação do arame, mais material com uma menor temperatura é introduzido na poça de fusão, levando

a uma redução da temperatura média do metal fundido. A consequência é um aumento na viscosidade e na tensão superficial, de modo que o material fundido não pode mais correr em largura, mas aumentar em altura.

Figura 50 - Superfície de resposta: influência de I e VA sobre a largura, fixando a DEP em 12,5mm.



Fonte: autoria própria.

4.2.3 Análise da Resposta: Molhabilidade

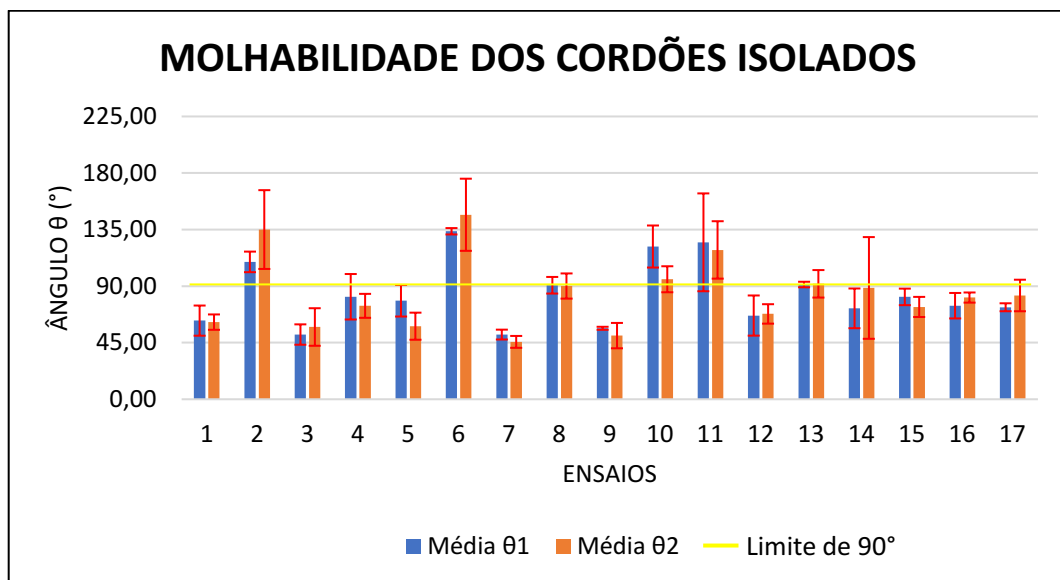
O Quadro 19 apresenta as medidas de molhabilidade obtidas a partir das seções transversais dos cordões isolados. Para cada seção, a molhabilidade foi medida na lateral esquerda e direita do cordão, denominando os ângulos θ_1 e θ_2 respectivamente. A Figura 51 demonstra através de um gráfico as médias dos dois ângulos para cada cordão. Foi verificado que a média total dos valores do θ_1 é igual a $83,60^\circ$, enquanto para o θ_2 a média é $83,47^\circ$. Desse modo, não se percebe diferença significativa entre qual dos dois ângulos adotar como resposta para o planejamento experimental.

Quadro 19 – Molhabilidade dos cordões isolados.

Ensaio	Ângulo θ_1					Ângulo θ_2				
	Face 1	Face 2	Face 3	Média θ_1	Desvio Padrão	Face 1	Face 2	Face 3	Média θ_2	Desvio Padrão
1	57,13	76,32	54,25	62,57	12,00	55	61,93	67,19	61,37	6,11
2	112,67	99,96	115,25	109,29	8,19	167,13	104,51	133,43	135,02	31,34
3	42,82	52,8	58,87	51,50	8,10	73,61	54,76	44,11	57,49	14,94
4	61,31	96,12	87,24	81,56	18,09	65,79	84,61	72,59	74,33	9,53
5	79,03	65,52	90,61	78,39	12,56	64,38	45,69	64,32	58,13	10,77
6	136,38	133,19	131,38	133,65	2,53	117,22	148,6	174,53	146,78	28,70
7	54,21	53,21	46,97	51,46	3,92	51,11	42,9	42,95	45,65	4,73
8	96,32	92,38	83,43	90,71	6,61	99,2	91,72	79,37	90,10	10,01
9	57,83	56,00	55,58	56,47	1,20	60,92	50,26	40,75	50,64	10,09
10	102,24	132,15	130,17	121,52	16,73	89,84	107,41	89,16	95,47	10,35
11	169,67	99,44	105,47	124,86	38,92	142,94	115,97	97,53	118,81	22,84
12	57,78	56,97	85,04	66,60	15,98	76,74	64,54	62,41	67,90	7,73
13	92,19	92,89	88,77	91,28	2,20	103,5	90,24	81,8	91,85	10,94
14	54,41	78,32	84,27	72,33	15,80	129,21	48,29	88,19	88,56	40,46
15	78,52	76,83	88,98	81,44	6,58	82,14	71,83	66,38	73,45	8,00
16	73,62	64,75	84,96	74,44	10,13	85,03	80,77	76,97	80,92	4,03
17	70,02	73,22	76,35	73,20	3,17	77,55	73,31	96,85	82,57	12,55
	Média total θ_1 :			83,60		Média total θ_2 :			83,47	

Fonte: autoria própria.

Figura 51 - Médias da molhabilidade dos cordões isolados.



Fonte: autoria própria.

A partir da ANOVA com um nível de confiabilidade de 95% apresentada no Quadro 20, foi observado que as variáveis VA e I apresentaram significância na relação com a molhabilidade. A variável DEP, juntamente com as interações entre as variáveis não apresentaram significância na correlação com as repostas de molhabilidade.

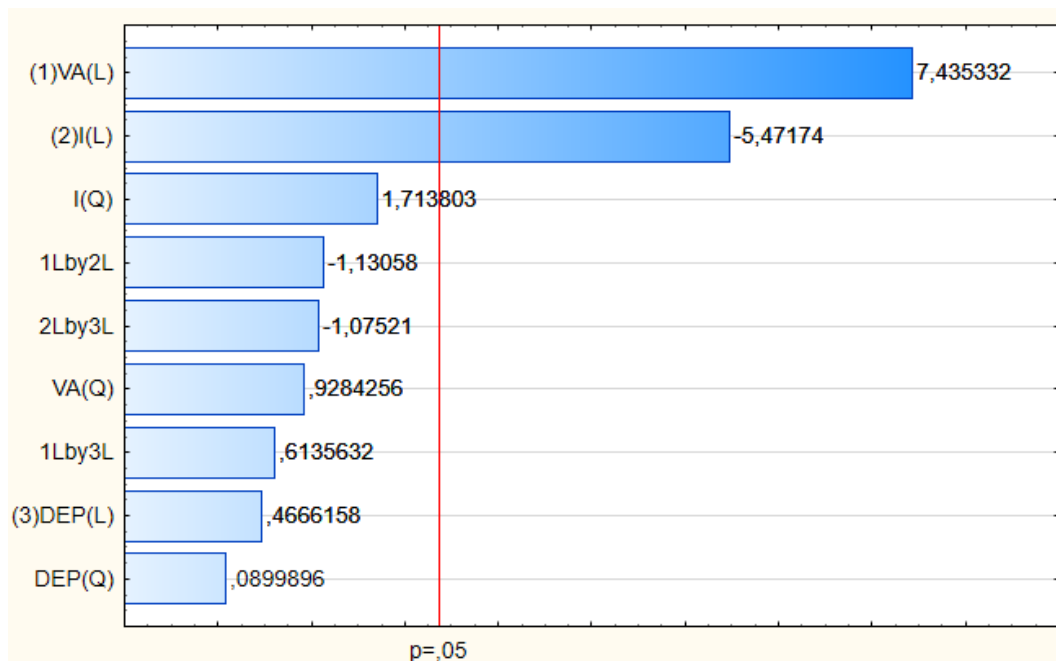
Quadro 20 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta molhabilidade.

Fator	SS	d f	MS	F	p
VA (L)	5770,45	1	5770,450	55,28417	0,000145
VA (Q)	89,97	1	89,971	0,86197	0,384084
I (L)	3125,07	1	3125,071	29,93994	0,000934
I (Q)	306,57	1	306,571	2,93712	0,130287
DEP (L)	22,73	1	22,726	0,21773	0,654949
DEP (Q)	0,85	1	0,845	0,00810	0,930816
VA (L) by I (L)	133,42	1	133,416	1,27820	0,295478
VA (L) by DEP (L)	39,29	1	39,294	0,37646	0,558906
I (L) by DEP (L)	120,67	1	120,668	1,15607	0,317940
Error	730,65	7	104,378		
Total SS	10300,56	1 6			
R-sqr	0,92907				
MS Residual	104,378				
Adj	0,83787				
Ftabelado	3,29				

Fonte: autoria própria.

A Figura 52 apresenta o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados para a resposta molhabilidade. Para tal situação, verificou-se a influência da velocidade de alimentação nos valores crescentes de molhabilidade, comportamento contrário para a corrente.

Figura 52 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Molhabilidade (p=0,05)

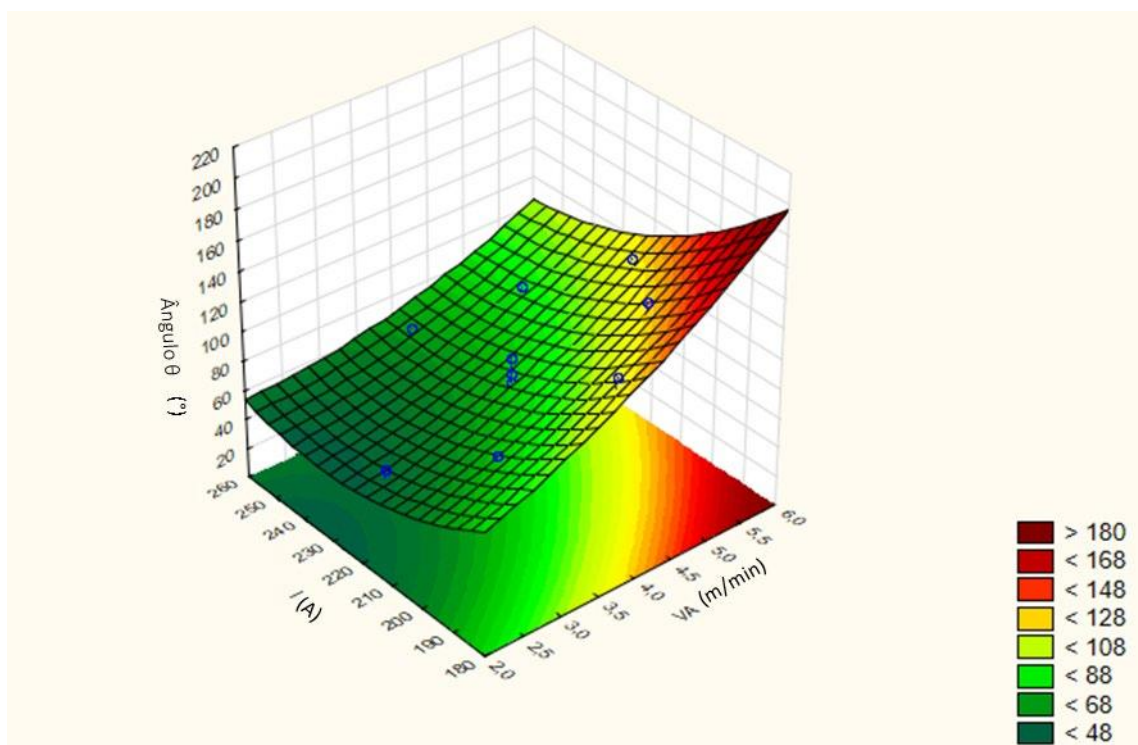


Fonte: autoria própria.

O gráfico de Pareto apresentou também que a influência dos parâmetros VA e I sobre a molhabilidade são quantitativamente semelhantes, apesar de qualitativamente apresentarem comportamentos contrários.

A molhabilidade é avaliada de maneira inversamente proporcional ao ângulo θ medido, logo, para baixos valores de θ se obtém alta molhabilidade. Analisando a superfície de resposta apresentada na Figura 53 foi verificado que a maior proporção da área em questão possui valores de θ abaixo de 90° . Adotou-se esse valor como limite de corte visando evitar problemas de falta de preenchimento nos passes de revestimento. Maiores valores de velocidade de alimentação apresentam a tendência de que se obtenha menores valores de θ , e conseqüentemente, maiores valores de molhabilidade. A corrente apresenta comportamento diretamente proporcional sobre a molhabilidade, onde maiores valores desta promovem menores valores de θ e conseqüentemente maiores valores de molhabilidade.

Figura 53 - Superfície de resposta: influência de VA e I sobre a molhabilidade, fixando a DEP em 12,5mm.



Fonte: autoria própria.

4.2.4 Análise da Resposta: Diluição

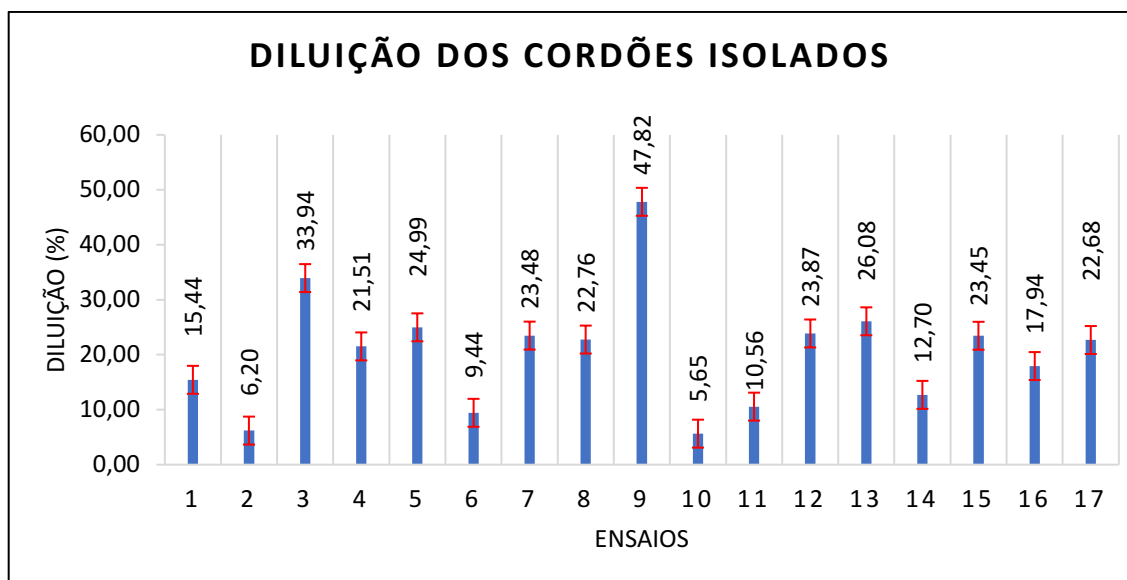
O Quadro 21 apresenta os valores de diluição calculados a partir das medidas das seções transversais dos cordões isolados, enquanto a Figura 54 demonstra através de um gráfico as médias de diluição para cada cordão. Os níveis de diluição são medidos em termos percentuais.

Quadro 21 – Diluição dos cordões isolados (%).

Ensaio	Face 1	Face 2	Face 3	Média	Desvio Padrão
1	15,71	15,43	15,16	15,44	0,27
2	5,66	7,30	5,65	6,20	0,95
3	32,54	35,47	33,82	33,94	1,47
4	21,44	24,77	18,33	21,51	3,22
5	24,21	25,19	25,56	24,99	0,70
6	9,41	10,75	8,15	9,44	1,30
7	24,01	24,61	21,82	23,48	1,47
8	21,82	20,60	25,86	22,76	2,75
9	52,70	54,26	36,50	47,82	9,83
10	7,13	3,16	6,65	5,65	2,17
11	11,18	12,72	7,77	10,56	2,54
12	24,08	24,91	22,62	23,87	1,16
13	27,98	23,83	26,44	26,08	2,10
14	12,82	14,36	10,91	12,70	1,73
15	22,91	27,86	19,59	23,45	4,16
16	19,09	20,42	14,31	17,94	3,21
17	29,39	13,27	25,37	22,68	8,39

Fonte: autoria própria.

Figura 54 - Médias de diluição dos cordões isolados (%).



Fonte: autoria própria.

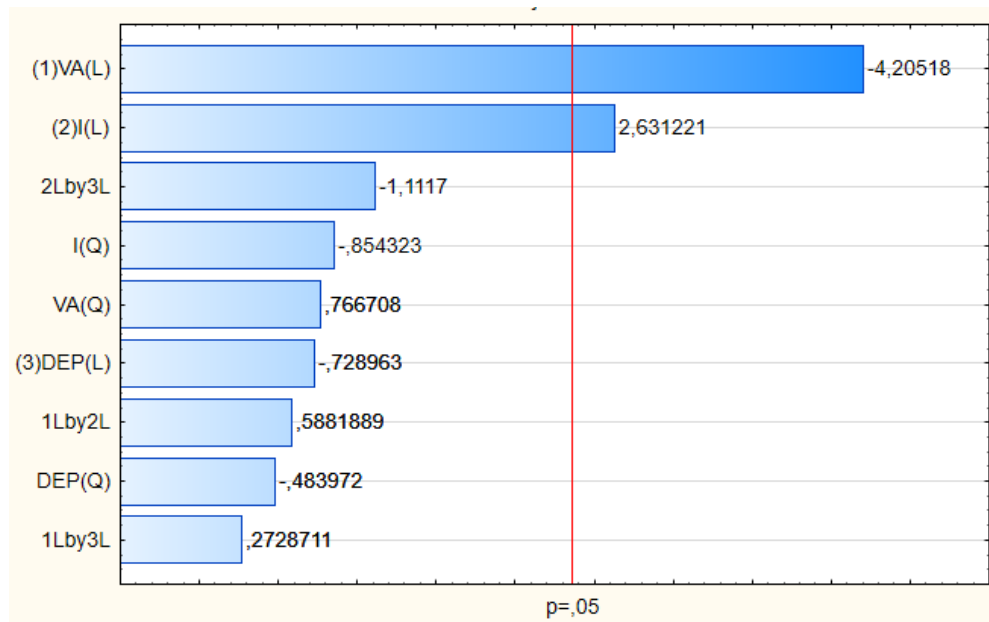
A partir da ANOVA com um nível de confiabilidade de 95% apresentada no Quadro 22, foi observado que as variáveis VA e I apresentaram significância na relação com a diluição. A variável DEP, juntamente com as interações entre as variáveis não apresentaram significância na correlação com as repostas de diluição.

Quadro 22 - Análise de variância (ANOVA) para a resposta diluição.

Fator	SS	df	MS	F	p
VA (L)	865,669	1	865,6690	17,68355	0,004010
VA (Q)	28,777	1	28,7768	0,58784	0,468319
I (L)	338,920	1	338,9198	6,92332	0,033853
I (Q)	35,729	1	35,7295	0,72987	0,421198
DEP (L)	26,013	1	26,0132	0,53139	0,489689
DEP (Q)	11,466	1	11,4663	0,23423	0,643179
VA (L) by I (L)	16,936	1	16,9362	0,34597	0,574883
VA (L) by DEP (L)	3,645	1	3,6450	0,07446	0,792827
I (L) by DEP (L)	60,500	1	60,5000	1,23587	0,302986
Error	342,673	7	48,9533		
Total SS	1757,269	16			
R-sqr	0,805				
MS Residual	48,95334				
Adj	0,55428				
Ftabelado	3,29				

Fonte: autoria própria.

A Figura 55 apresenta o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados para a resposta diluição. Para tal situação, verificou-se a influência da corrente nos valores crescentes de diluição, comportamento contrário e mais intenso para a velocidade de alimentação. O nível de diluição é um parâmetro de suma importância, pois está diretamente ligado com as propriedades esperadas dos revestimentos. É válido reafirmar que, para esse processo, espera-se obter baixos valores de diluição (WEMAN, 2012) de modo que, quanto menor a diluição, menor a variação na composição química do metal de solda, estando mais próximo das propriedades nominais do material depositado (WAINER et al., 1992).

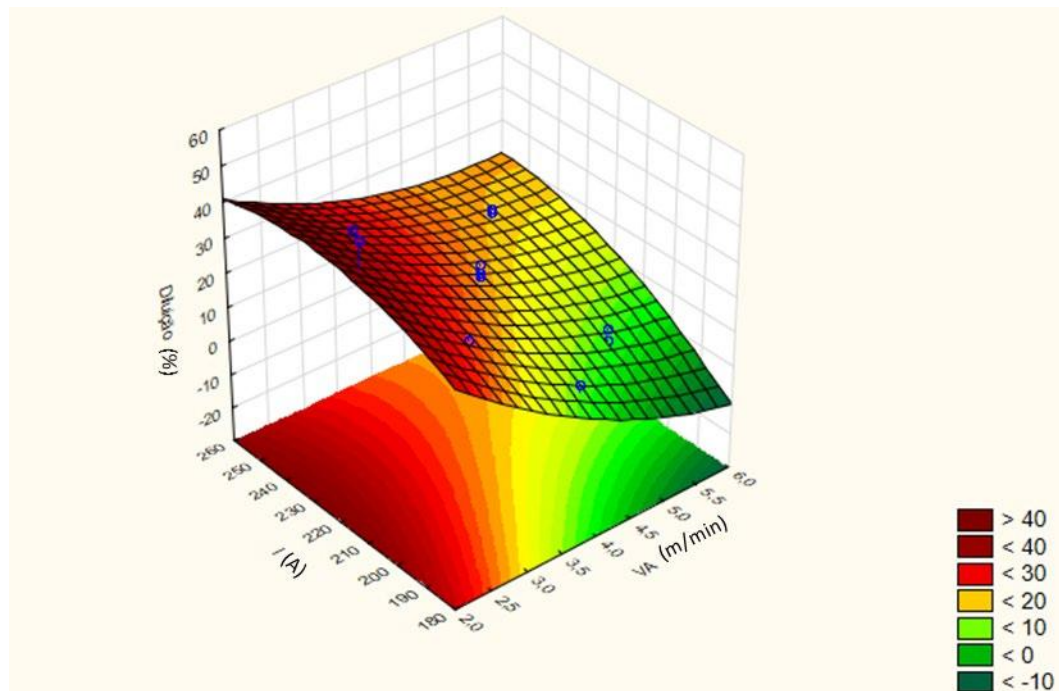
Figura 55 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Reposta: Diluição ($p=0,05$)

Fonte: autoria própria.

Analisando o gráfico de Pareto acima em conjunto com a superfície de resposta apresentada na Figura 56 percebe-se que a velocidade de alimentação foi o parâmetro de maior influência sobre a diluição, e que maiores valores de VA tendem a promover menores valores de diluição. Esse comportamento está em consonância com a literatura, de modo que com o aumento da velocidade de alimentação uma maior quantidade de material terá que ser fundida com a mesma energia de soldagem (SHANMUGAN; MURUGAN, 1999). Os cordões 10, 2 e 6 apresentaram os menores valores de diluição. Para estes cordões, a velocidade de alimentação esteve nos níveis mais altos do planejamento (+1,68; +1 e +1) e a corrente em valores intermediários, demonstrando a forte influência da velocidade de alimentação sobre a diluição.

Se tratando da corrente, foi verificado que quanto maior o seu valor, maior seriam os valores observados na diluição. Esse comportamento também foi verificado por Silva (2015) e pode ser justificado pelo fato de que maiores energias de soldagem podem promover uma maior penetração da poça de fusão, aumentando a parcela de substrato fundido e aumentando, conseqüentemente, a diluição.

Figura 56 - Superfície de resposta: influência de VA e I sobre a diluição, fixando a DEP em 12,5mm.



Fonte: autoria própria.

Vergara et al. (2015) experimentaram a deposição de cordões via GTAW-MAF com alimentação pulsada e constante, obtendo valor máximo da velocidade de alimentação em 2 m/min. Acima deste valor o arame impacta no substrato devido à energia do arco não ser suficiente para fundir o arame. A largura média verificada no cordão foi de 12,11, altura de 1,24 e diluição de 50,78.

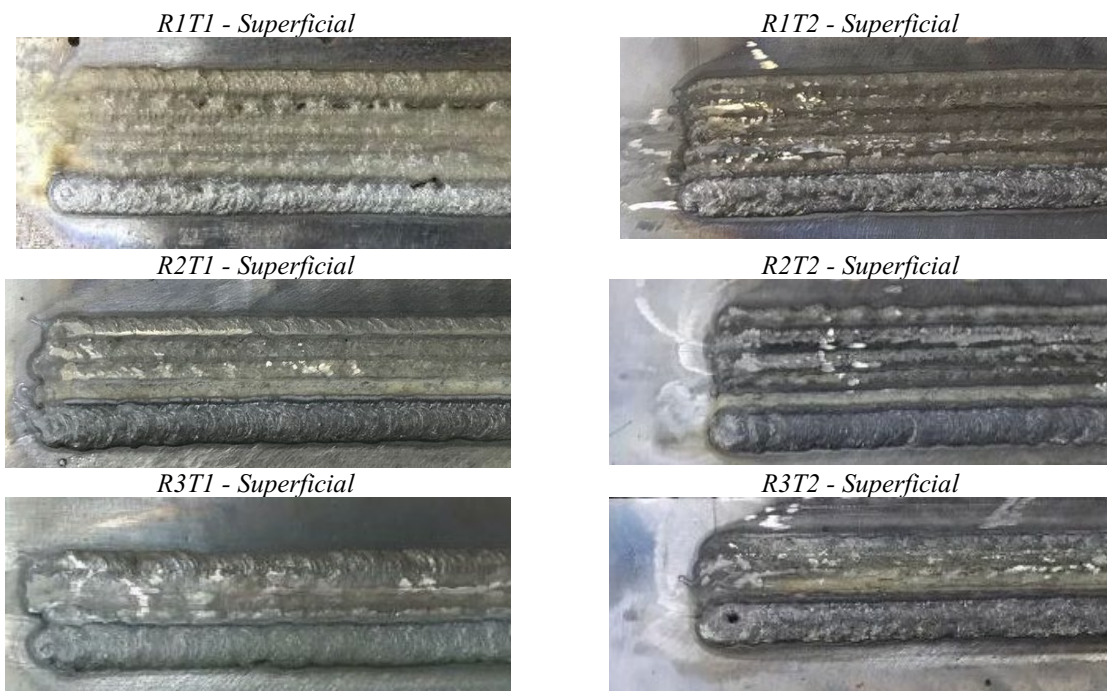
Em outra pesquisa, Vergara et al. (2017) avaliaram o efeito da utilização de corrente contínua pulsada em baixa frequência, alta frequência e constante para a deposição de cordões com GTAW-MAF. Os valores de diluição verificados foram 57% para baixa frequência, 59% para alta frequência e 41% para corrente contínua constante.

4.3 Caracterização dos revestimentos

4.3.1 Análise Macrográfica

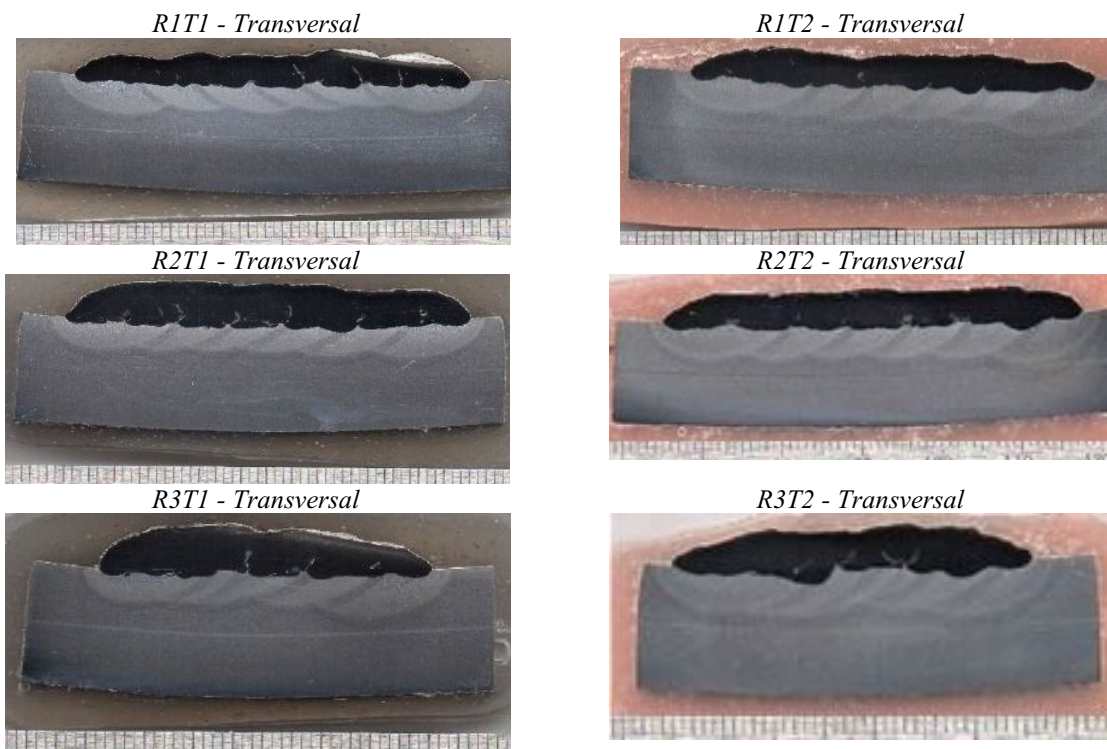
A Figura 57 apresenta as macrografias superficiais dos revestimentos enquanto a Figura 58 apresenta as macrografias transversais dos revestimentos.

Figura 57 – Macrografias superficiais dos revestimentos.



Fonte: autoria própria.

Figura 58 – Macrografias transversais dos revestimentos.

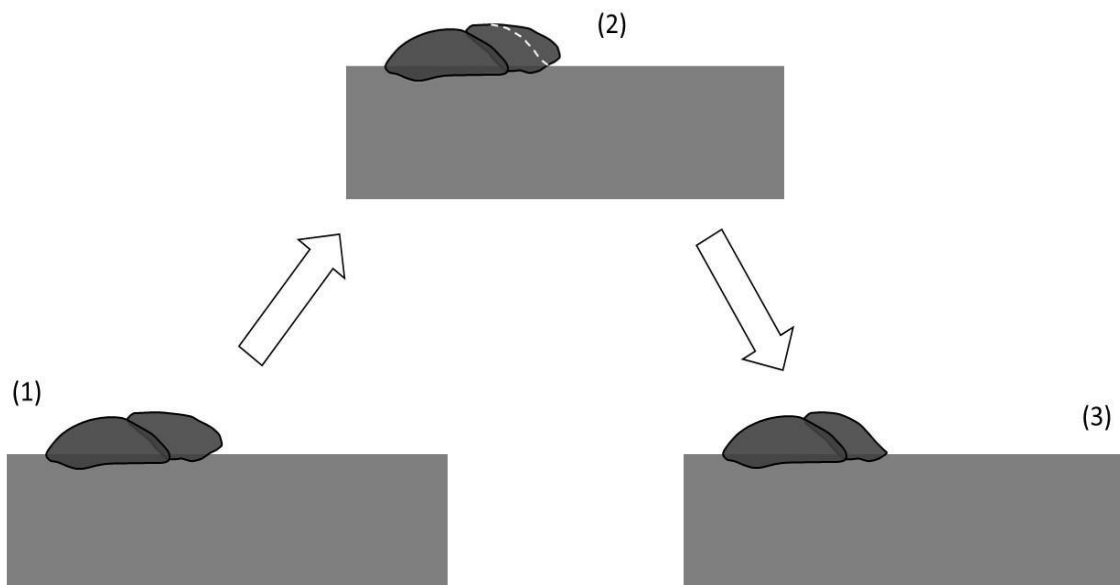


Fonte: autoria própria.

É possível verificar que os revestimentos R3T1 e R3T2 apresentaram uma largura visualmente menor em relação aos demais. Essa condição se deu pelo fato desse parâmetro ter

apresentado cordões com molhabilidades indesejadas, sendo necessário que se aplicasse um esmerilhamento manual para corrigir a geometria, evitar o aparecimento de vazios e melhorar a aderência entre os cordões. A Figura 59 apresenta como esse processo de esmerilhamento ocorreu.

Figura 59 - Segundo cordão com molhabilidade indesejada (1). A linha tracejada em (2) mostra uma molhabilidade desejável para o 2º cordão e a imagem (3) apresenta a nova molhabilidade cordão após usinagem (esmerilhamento).



Fonte: autoria própria.

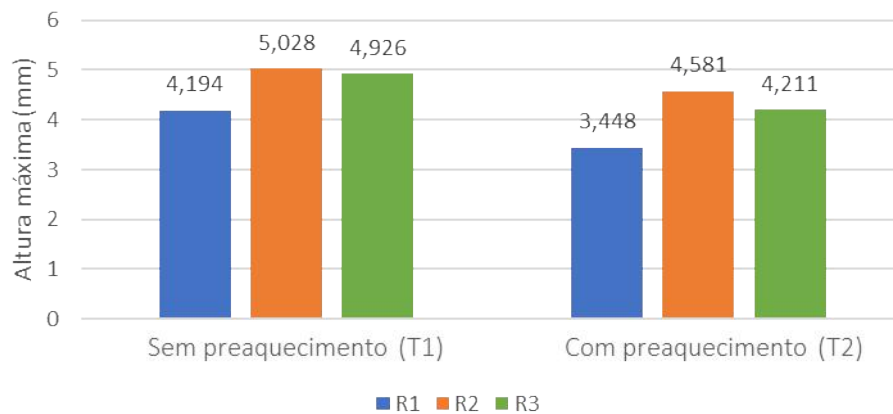
Analisando as seções superficiais é possível verificar uma falha de preenchimento no revestimento R1T1. Tal condição pode ter acontecido devido a junção de um parâmetro com baixa corrente e baixa velocidade de alimentação aliadas a dificuldade em se obter cordões com molhabilidade que permitisse o espalhamento completo dos cordões subsequentes. Essa condição foi notoriamente melhorada a partir da aplicação do preaquecimento no processo.

A partir das imagens obtidas das seções transversais dos revestimentos foi possível verificar a presença de falhas de preenchimento principalmente nos revestimentos realizados utilizando a Técnica I. A utilização do preaquecimento pode ter sido fundamental para minimizar tais falhas, sendo possível verificar uma significativa diminuição destas nos revestimentos R1T2 e R2T2. Tais falhas podem comprometer severamente a aplicabilidade de materiais revestidos, uma vez que a falta de preenchimento pode expor a superfície revestida quando submetida a condições de corrosão, sendo então um ponto de contato da atmosfera corrosiva até o substrato. Tal condição pode fragilizar silenciosamente o substrato e inviabilizar a utilização o material em questão.

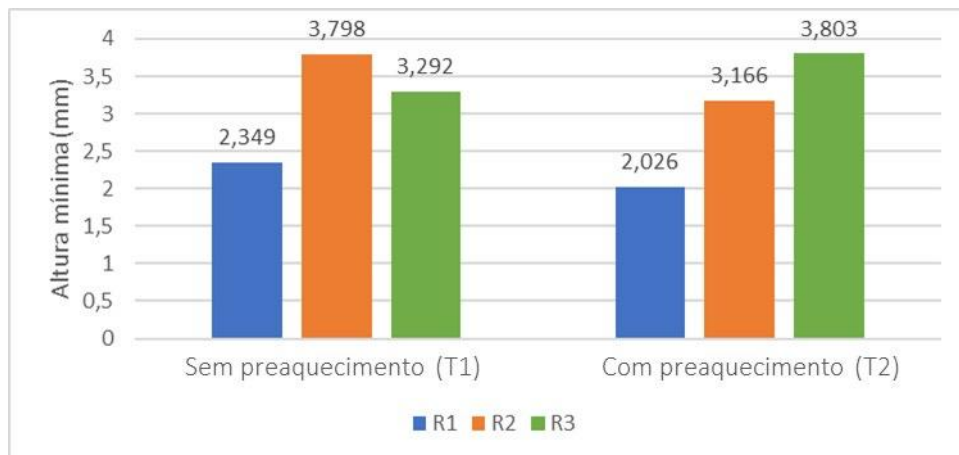
4.3.2 Altura, largura e diluição dos revestimentos

Se tratando da análise da altura máxima (Figura 60a), percebe-se que os revestimentos com os parâmetros do ensaio R1 apresentaram menores alturas (devido ao fato da corrente e da velocidade de alimentação utilizadas serem menores do que os parâmetros do ensaio R2) e ainda, que o uso do preaquecimento fez com que os valores das alturas máximas caíssem.

Figura 60 – (a) análise das alturas máximas e das (b) alturas mínimas dos revestimentos.



(a)



(b)

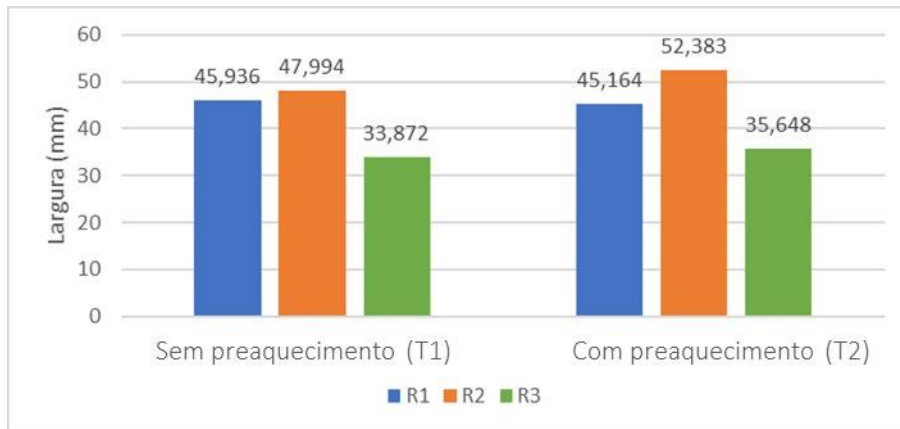
Fonte: autoria própria.

Com relação à altura mínima (Figura 60b), vê-se que ocorreram comportamentos semelhantes aos da análise anterior. Observa-se que, para ambas as técnicas de soldagem aplicadas, a utilização o parâmetro R2 permitiu a obtenção de alturas mínimas e máximas desejáveis (acima de 3mm). Essa condição reforça a importância da adequação dos parâmetros

de corrente e velocidade de alimentação no processo de revestimento por soldagem GTAW com arame frio.

Na Figura 61 nota-se que os revestimentos feitos com os parâmetros do ensaio 2 apresentaram maiores larguras em relação aos feitos com os do ensaio 1 devido ao aumento da corrente utilizada e que o revestimento R2T2 tem a maior largura pois o preaquecimento também influencia no aumento desse parâmetro geométrico.

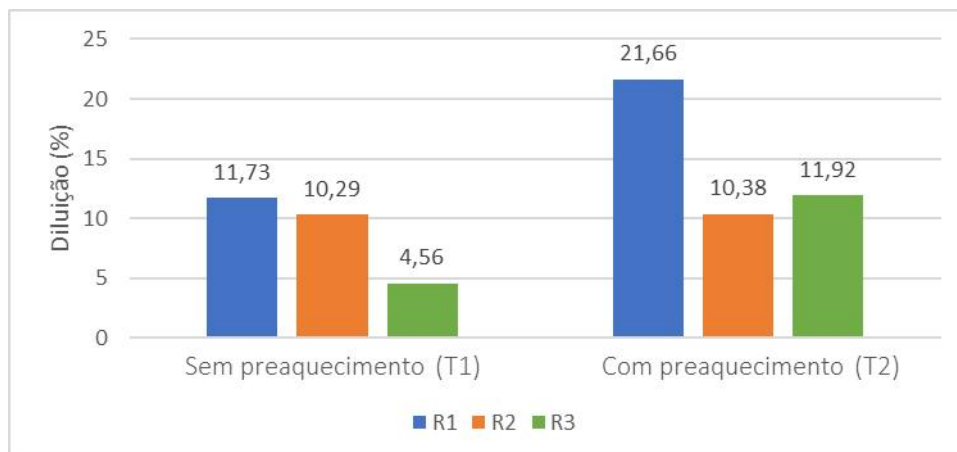
Figura 61 – Análise da largura.



Fonte: autoria própria.

E por fim, analisando os resultados de diluição obtidos (Figura 62), verifica-se um aumento um pouco maior nos revestimentos R1T2 e R3T2 devido ao preaquecimento (e uma menor velocidade de alimentação no caso de R1T2). O preaquecimento pode influenciar na dinâmica de fluxo de calor no substrato, aumentando os níveis de diluição verificados.

Figura 62 – Análise da diluição.



Fonte: autoria própria.

Apesar de os resultados de altura, largura e diluição estarem equilibrados entre si para as duas técnicas de soldagem aplicadas, o aparecimento de falhas de preenchimento observadas nas seções transversais dos revestimentos realizados utilizando a Técnica I inviabilizam a aplicação prática desses materiais. Para tanto, decidiu-se seguir com as demais caracterizações apenas para os revestimentos obtidos utilizando a Técnica II.

4.4 Análise de composição química dos revestimentos

O Quadro 23 apresenta a composição química dos revestimentos, trazendo os percentuais em massa dos elementos de liga como sendo verificados:

Quadro 23 – Composição química percentual em massa.

RxTy	%Cr	%Ni	%Mo	%Fe	Diluição (%)
R1T2	15,43	11,81	3,47	68,19	21,66
R2T2	16,11	12,11	3,49	67,18	10,38
R3T2	16,44	12,15	3,70	65,90	11,92

Fonte: autoria própria.

O processo R3T2 apresentou uma ligeira melhor eficiência de deposição quanto aos percentuais de elementos de liga presentes, uma vez que proporcionou um metal de solda com teores mais próximos daqueles observados na composição química nominal do aço AISI 317L. No sentido contrário, o R1T2 apresentou o maior decréscimo no teor dos elementos de liga analisados devido à alta diluição. Todavia, todos os revestimentos apresentaram composições semelhantes às do aço AISI 31L, de modo que a variação da composição química entre os revestimentos não foi significativa, comportamento esperado pelo fato de estar se utilizando o mesmo metal de adição.

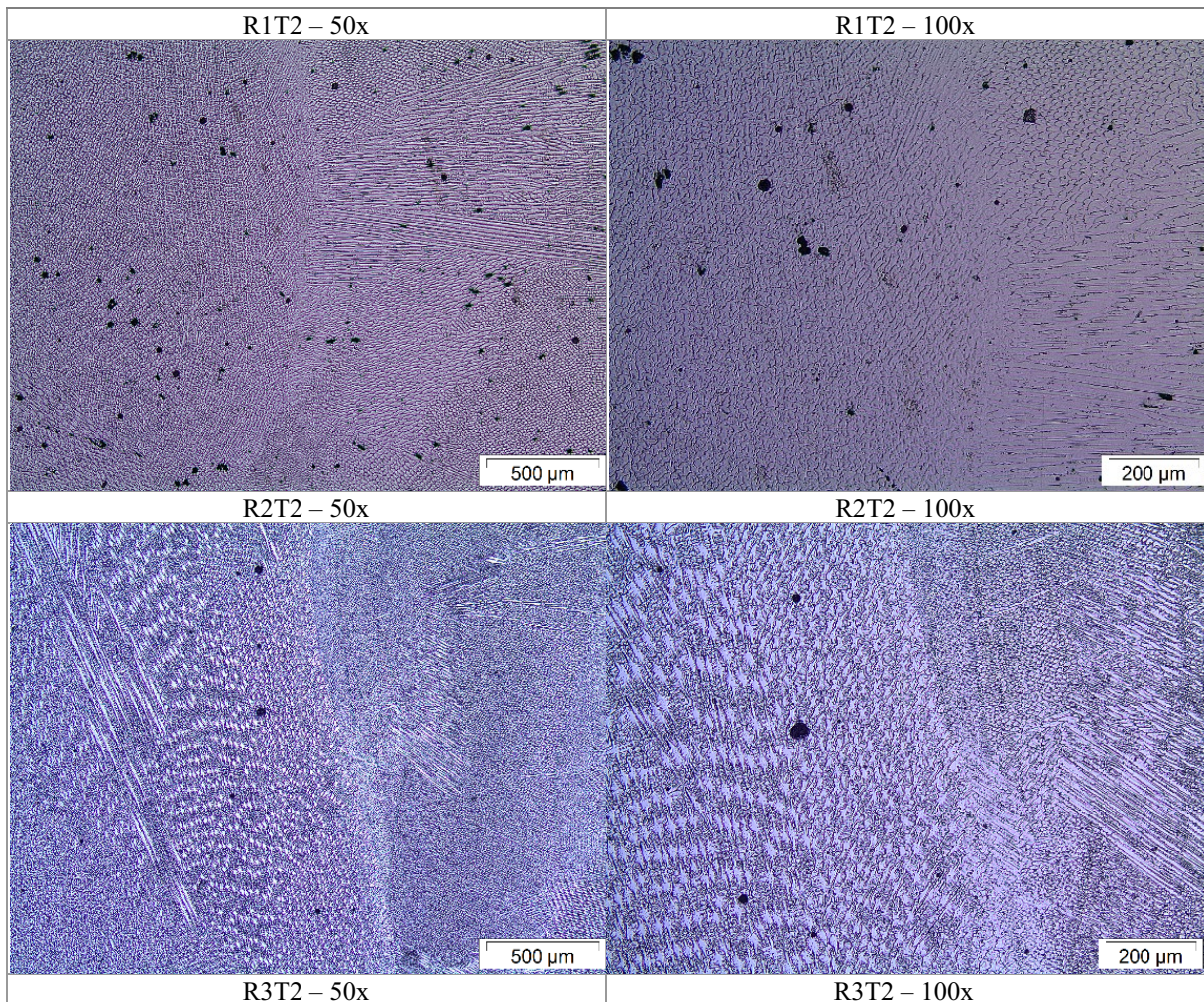
O percentual de ferro foi maior no revestimento com maior diluição (R1T2). Os teores do referido elemento nos revestimentos R1T2, R2T2 e R3T2 foram, respectivamente, iguais a: 68,187%, 67,182% e 65,903%. É válido ressaltar que maiores porcentagens de Fe no metal de solda podem conduzir à menor eficiência dos revestimentos devido ao aumento da susceptibilidade à corrosão.

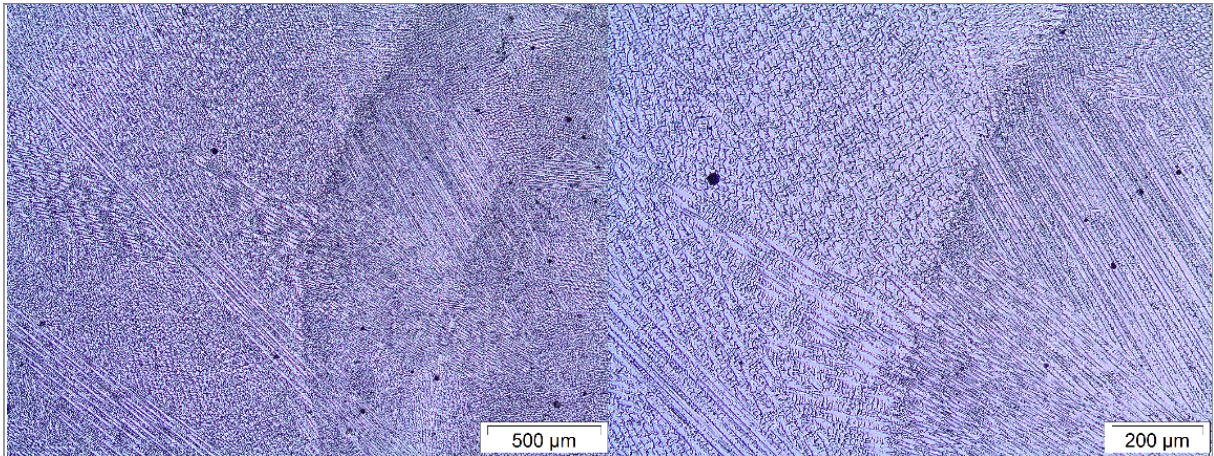
4.5 Microscopia Ótica e Eletrônica de Varredura

A Figura 63 apresenta imagens de microscopia ótica com aumentos de 50x e 100x para os três revestimentos. É possível perceber a presença de pontos escuros que podem se caracterizar como inclusões. Tais inclusões podem afetar negativamente a resistência a corrosão dos revestimentos, análise apresentada no tópico 4.6 deste trabalho.

Comparando as imagens dos três revestimentos na Figura 63, verifica-se que o R1T2 apresenta uma maior quantidade de inclusões na área analisada. Essa maior quantidade de inclusões pode ser influenciada pela alta diluição verificada no revestimento. Esse fenômeno corrobora com resultado apresentado na Figura 65, onde é possível verificar que a formação da camada de passivação pode estar sendo afetada pela maior presença de inclusões neste revestimento.

Figura 63 - Microscopia ótica dos revestimentos R1T2, R2 T2 e R3 T2. Aumentos de 50x e 100x.



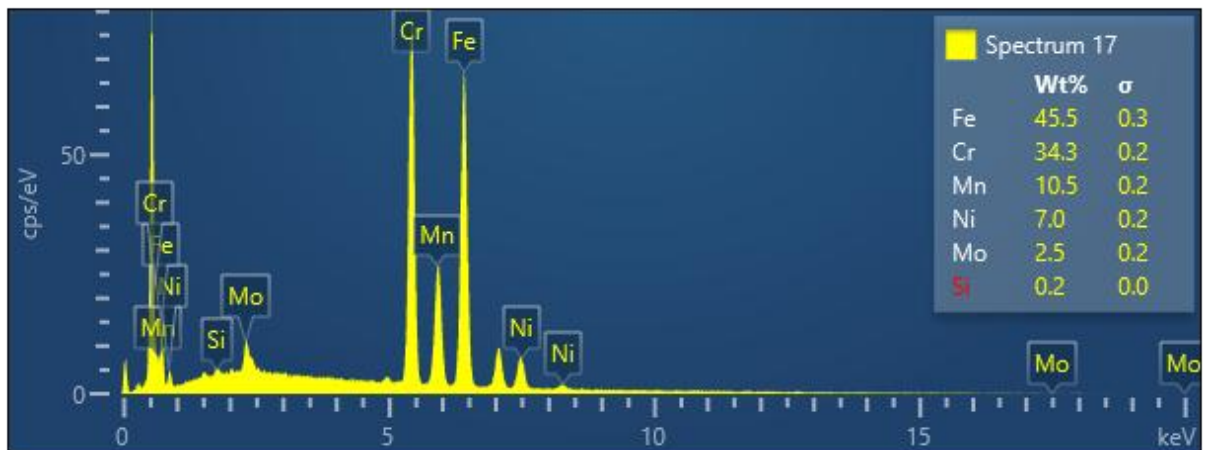
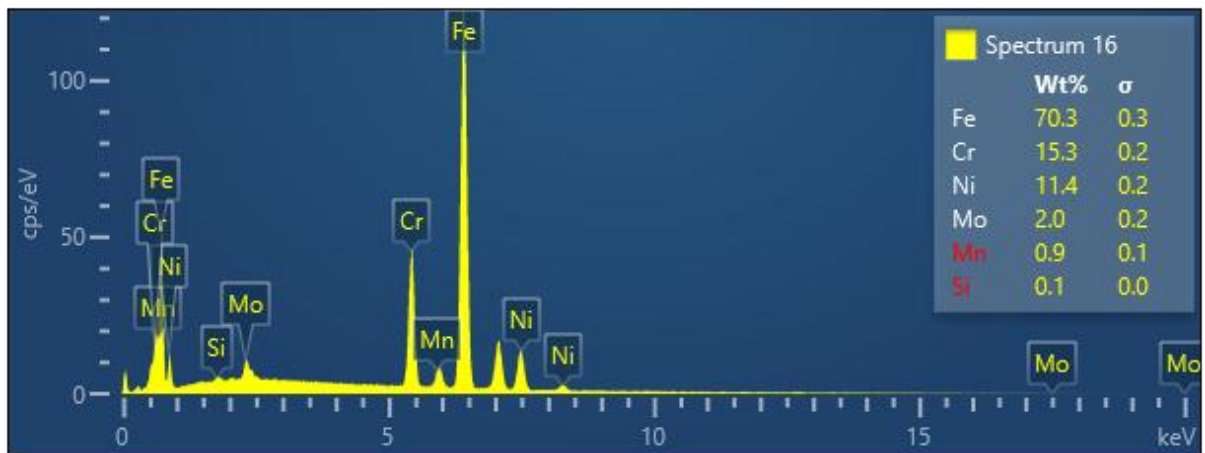
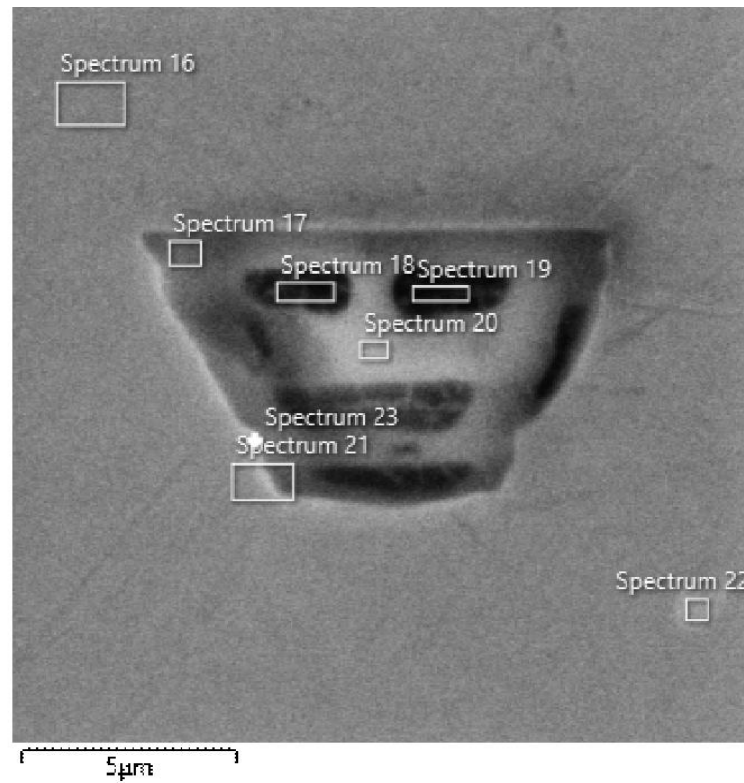


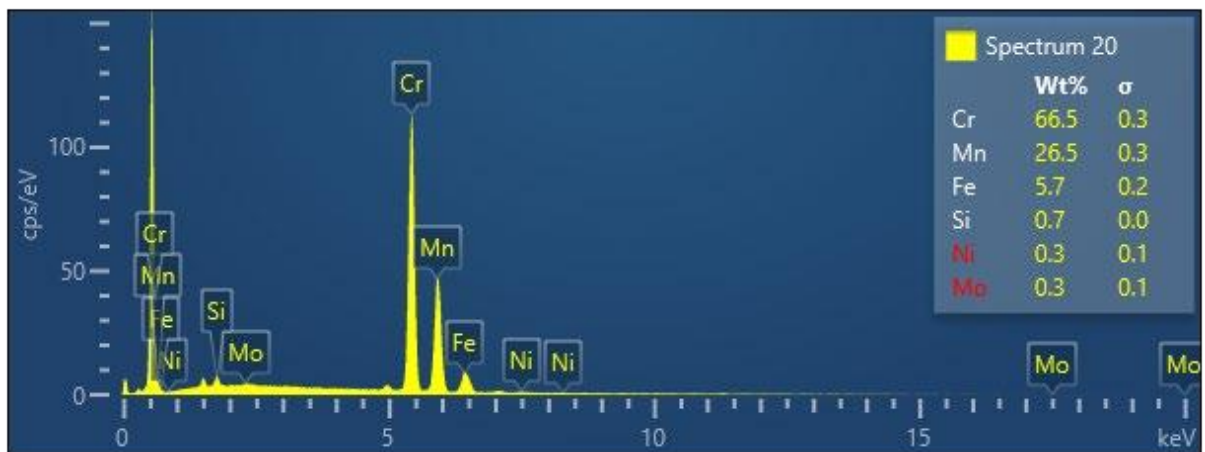
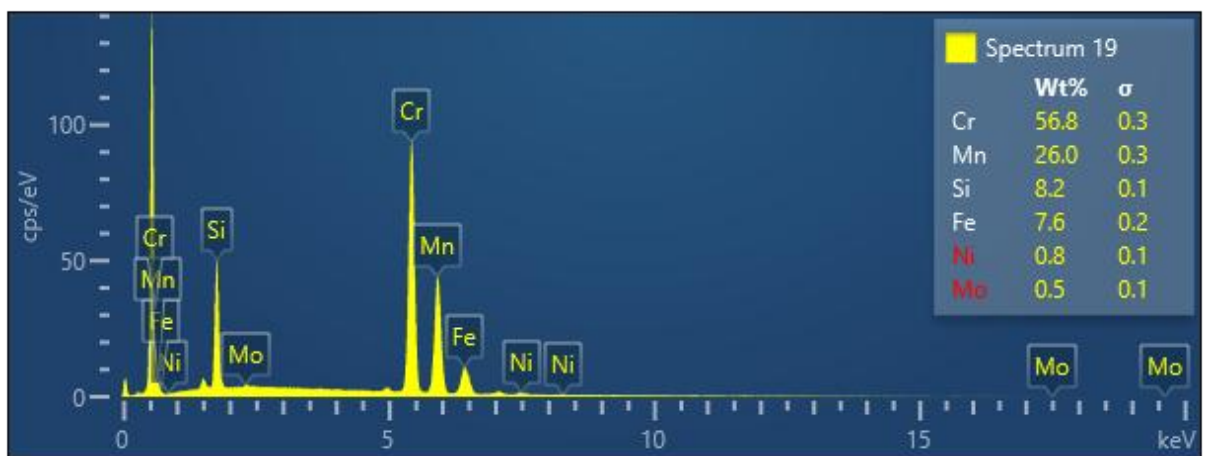
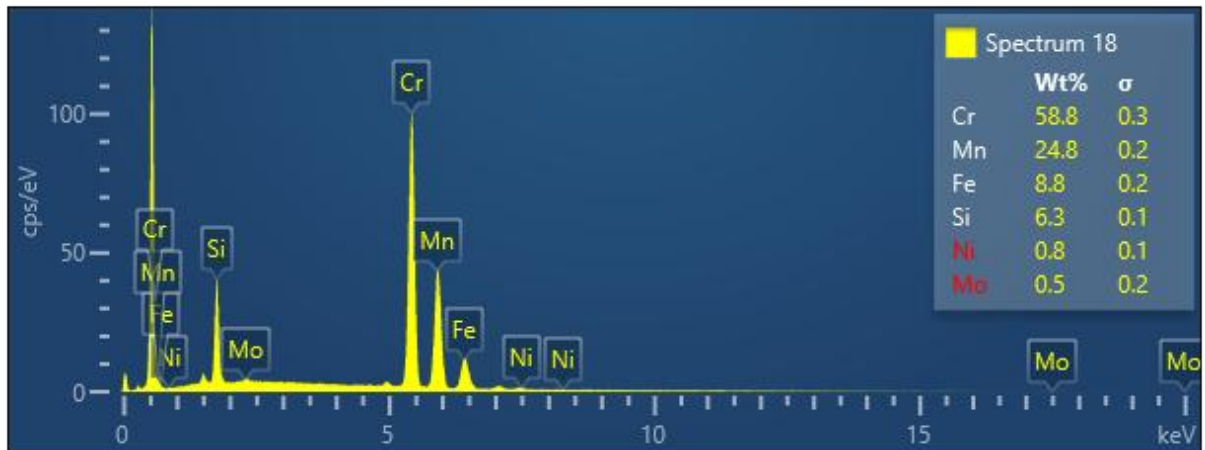
Fonte: autoria própria.

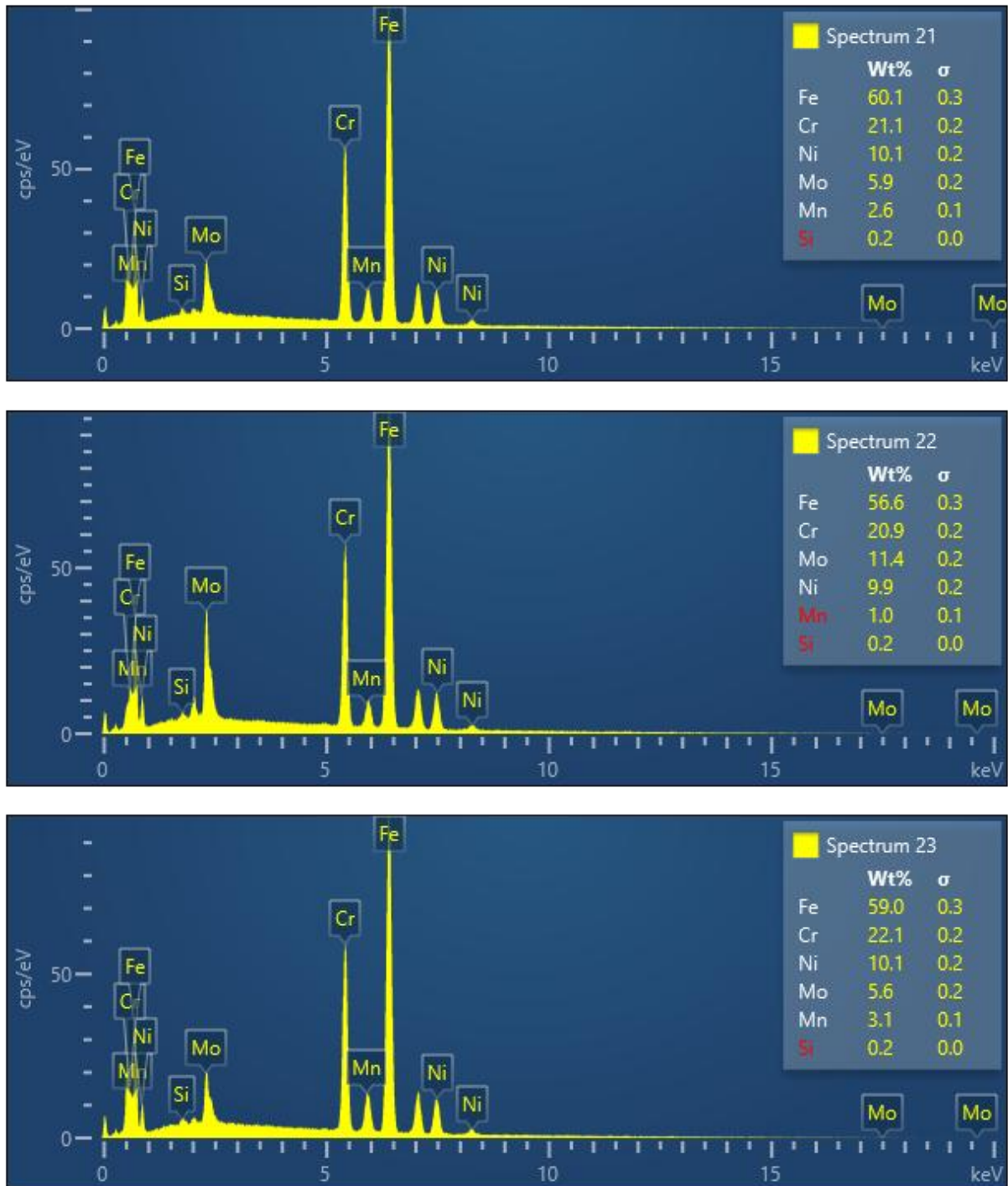
Apesar da diferença quantitativa de inclusões verificadas nos revestimentos, verificou-se através da análise em *MEV* (*microscopia eletrônica de varredura*) que a composição química dessas inclusões não variou significativamente entre os diferentes revestimentos.

A Figura 64 apresenta a análise de microscopia eletrônica de varredura para uma região de inclusão em R1T2. É possível verificar o gradual aumento do percentual de cromo e diminuição do percentual de ferro à medida em que se aproxima do interior das inclusões. Essa variação do percentual de cromo ao longo do revestimento pode promover o aparecimento de regiões catódicas (ricas em cromo) que podem ocasionar a diminuição da resistência a corrosão do material.

Figura 64 - Microscopia Eletrônica de Varredura em região de inclusão em R1T2.







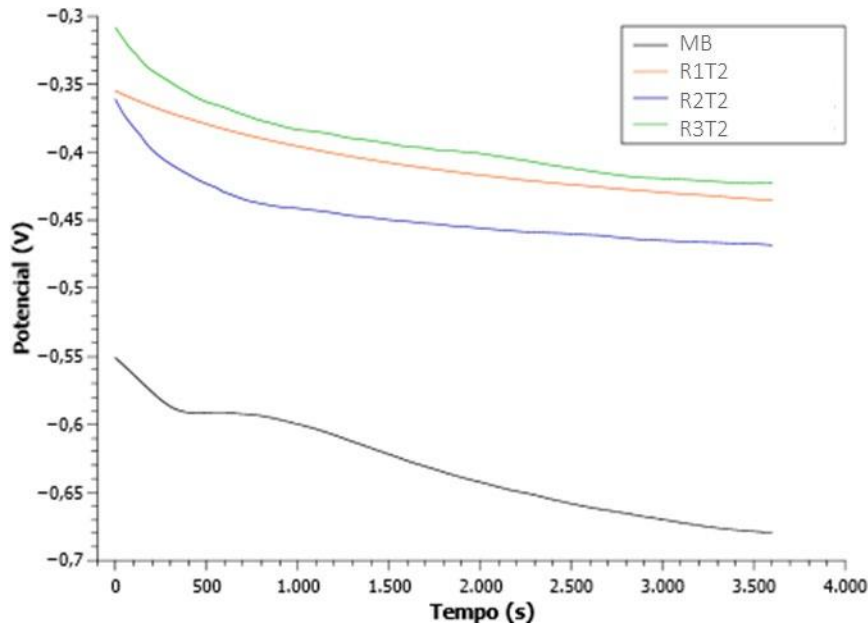
Fonte: autoria própria.

4.6 Ensaios de Polarização Potenciodinâmica e de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

O OCP permite avaliar a variação na tendência à oxidação na superfície do material, uma vez que é uma medida do potencial em função do tempo de exposição, sem aplicação de corrente. Os valores médios do OCP foram iguais a -0,67 V para o MB, -0,43 V para o R1T2,

-0,44 V para o R2T2 e -0,40 V para o R3T2. Portanto, dentre as 4 condições, o R3T2 apresentou o OCP mais nobre, enquanto o MB apresentou o potencial de circuito aberto mais ativo. As curvas características do MB e R1T2, R2T2 e R3T2 são apresentadas na Figura 65.

Figura 65 - Curvas de potencial de circuito aberto.



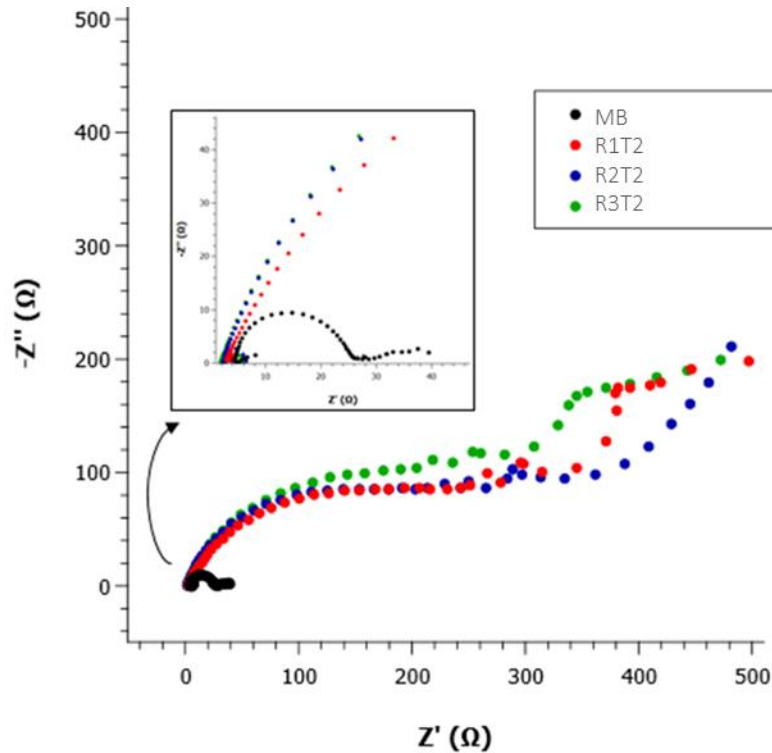
Fonte: autoria própria.

A Figura 65 mostra que o potencial elétrico observado para o metal base sem revestimento é mais negativo que aqueles observados para as amostras revestidas. Este é um bom indicativo de que o metal base é menos resistente à corrosão que os metais revestidos com a solda. Para estes, aquele que apresentou OCP mais positivo foi o R3T2. Apesar de apresentar a menor diluição entre os três processos, o R2T2 não apresentou o melhor resultado nesta análise. Todavia, esse ensaio avalia apenas a superfície em questão. A tendência de sofrer corrosão mais avaliada pelos valores de OCP se trata de uma tendência termodinâmica, ou seja, do quão fácil é a perda de elétrons do metal para o meio em termos de energia livre. Portanto, apesar de esta ser uma informação útil no entendimento de como o revestimento se comporta frente a processos oxidativos, a realização de outras técnicas como espectroscopia dielétrica (Espectroscopia de Impedância Eletroquímica) e Polarização Potenciodinâmica são necessárias na obtenção de informações cinéticas do processo de corrosão.

A Figura 66 apresenta os diagramas de Nyquist para os ensaios de EIE, os quais relacionam a parcela imaginária da impedância com a parcela real. A maior área sob as curvas dos revestimentos, quando comparadas com a curva referente ao metal de base - além da melhor

definição do semicírculo da curva do MB - indica o significativo aumento de resistência à corrosão promovido pelo processo de soldagem, fato este associado ao incremento na resistência à transferência de carga na interface metal-eletrólito (LIMA et al., 2020).

Figura 66 - Diagramas de Nyquist do metal de base e dos revestimentos.



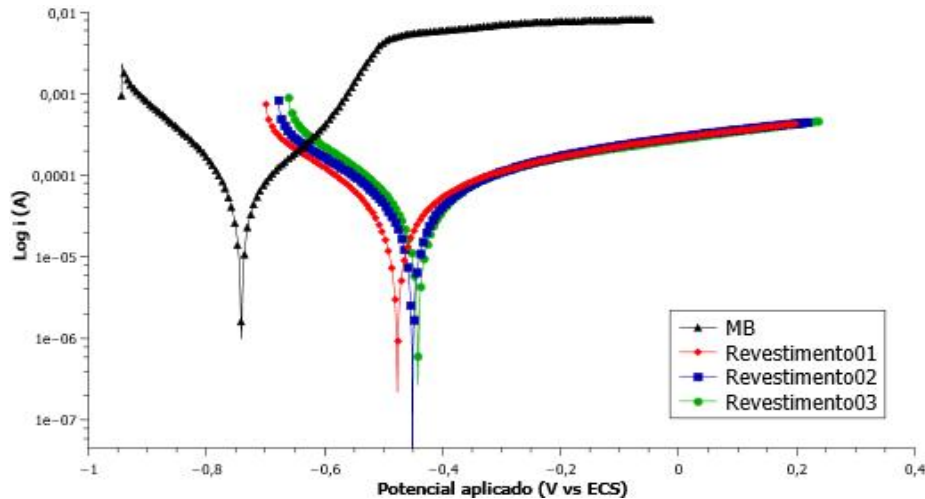
Fonte: autoria própria.

Também é possível verificar, ainda na Figura 66, que o R2T2 apresenta um comportamento de formação da camada de passivação mais estável em relação aos revestimentos R1T2 e R3T2. Conforme a Figura 66 apresenta, os arcos formados em R1T2 e R3T2 sugerem uma instabilidade na interface eletrodo/eletrólito, onde ocorreu a formação e dissolução de arcos que pode ser associado a formação e em sequência quebra do filme de passivação na superfície analisada. Tal instabilidade pode ser devido a presença de inclusões na região da solda (revestimento).

A Figura 67 apresenta as curvas obtidas a partir dos ensaios de polarização potenciodinâmica para o metal de base e os revestimentos. O potencial de corrosão apresenta-se mais à esquerda (valor mais negativo) para o metal de base, seguido do revestimento que apresentou maior diluição - R1T2. Por outro lado, no caso de R2T2 e R3T2, os potenciais de corrosão apresentam valores bastante próximos entre si. Através da extrapolação das retas de

Tafel, foi possível obter o potencial de corrosão (E_{corr}) e resistência à polarização (R_p). Tais resultados, bem como o OCP de cada condição, estão expostos na Quadro 24.

Figura 67 - Curvas de polarização potenciodinâmica do metal de base e dos revestimentos 01, 02 e 03.



Fonte: autoria própria.

Quadro 25 – Resultados dos ensaios de polarização potenciodinâmica.

Condição	OCP (V)	E_{corr} (V)	R_p (ohm)
MB	-0,67	-0,73	435
Revestimento01	-0,43	-0,51	1260
Revestimento02	-0,44	-0,46	1220
Revestimento03	-0,40	-0,47	1045

Fonte: autoria própria.

A partir do Quadro 25 é possível inferir que os revestimentos apresentaram R_p próximas entre si. Estes valores foram notadamente maiores do que aqueles visualizados para o metal de base. Neste contexto, a resistência à polarização foi 2,9 (ou 189,66%), 2,8 (ou 180,46%) e 2,4 (ou 140,23%) vezes maior nos revestimentos 01, 02 e 03, respectivamente, quando comparados ao MB.

Murugan e Parmar (1997) avaliaram a influência da diluição na resistência à corrosão de revestimentos obtidos a partir de aços 309L e 316L por soldagem MAG automatizada e sugeriram que valores de diluição entre 10% e 15% são recomendados, uma vez que valores de diluição muito baixos podem acarretar em pequena força de união entre revestimento e metal base, enquanto que valores muito altos induzem a altos percentuais de ferro no metal de solda, promovendo redução na resistência à corrosão dos revestimentos de aços inoxidáveis. Além disso, maiores percentuais de diluição podem ocasionar maior formação de precipitados, os quais, devido à segregação de elementos, empobrecem a matriz; caso isto ocorra, devido à formação de par galvânico, a matriz pode atuar como eletrodo de sacrifício, implicando na menor resistência à corrosão por pite (JIN; CHENG, 2011; SOUZA et al., 2020).

No presente estudo, o R1T2 possui diluição superior àquela sugerida pelos autores supracitados (21,66%) e também o maior percentual de ferro dentre os revestimentos analisados (68,187 %Fe). Tal revestimento teve o menor potencial de corrosão. Os demais revestimentos apresentaram percentuais de diluição dentro da faixa supramencionada - 10,38% e 11,93% para R2T2 e R3T2, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

- Corrente (I) e Velocidade de Alimentação (VA) foram variáveis que apresentaram influência estatística significativa em todas as respostas do planejamento experimental para deposição de cordões isolados, consolidando a importância amplamente discutida desses parâmetros na literatura de soldagem para o processo GTAW-MAF;
- A Distância Eletrodo/Peça (DEP) não apresentou influência estatística significativa em nenhuma das respostas na deposição de cordões isolados pelo processo GTAW-MF, podendo ser discutida a possibilidade de este ser um parâmetro fixado para a soldagem dos revestimentos;
- Conseguiu-se atingir o objetivo de elaborar uma técnica de soldagem para deposição de revestimento de aço 317L utilizando GTAW-MAF, de modo que se obtiveram revestimentos com características geométricas e de resistência a corrosão satisfatórias;
- A Técnica de soldagem II, aplicada no sentido de “empurrar” e com preaquecimento, se mostrou efetiva na minimização de falhas de preenchimento, aderência do metal de adição ao substrato e valores satisfatórios de diluição;
- Verificou-se que, para as técnicas de soldagem utilizando GTAW com arame frio aplicadas neste trabalho, os parâmetros que apresentaram os melhores resultados de diluição e resistência à corrosão consistiam na utilização de correntes de soldagem a partir de 220A e velocidades de alimentação de arame entre 4 e 5m/min;
- A aplicação de revestimento com a técnica utilizada neste trabalho apresentou valores de diluição que conferiram ao material composições químicas semelhantes às do metal de adição, além de elevações na resistência à corrosão de mais de 2x quando comparada à verificada no metal base;
- A presença de inclusões verificada no revestimento R1T2 pode ter sido responsável por prejudicar as propriedades de resistência à corrosão da amostra. Tais inclusões podem ter surgido devido ao menor valor de corrente utilizado nesse processo, não fornecendo energia suficiente para homogeneizar a estrutura;
- R2T2 demonstrou-se o melhor entre os revestimentos trabalhados. Este apresentou bons resultados de diluição, menor presença de inclusões e boa regularidade operacional na deposição dos cordões com baixa presença de discontinuidades. Nesta análise, a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação podem se

mostrar como parâmetros chaves no processo para diminuição da presença de inclusões e, conseqüentemente, melhora na resistência a corrosão dos revestimentos analisados.

- O revestimento R3T3, apesar de demonstrar resultados de resistência à corrosão preliminarmente satisfatórios, se demonstrou operacionalmente inviável. Mesmo com a utilização de preaquecimento, a deposição dos cordões não ocorreu de maneira regular e a molhabilidade alcançada favoreceu o aparecimento de descontinuidade entre cordões.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar soldagens com o processo GTAW com adição de arame quente e comparar com os resultados obtidos no corrente trabalho (GTAW-AF);
- Realizar soldagens com outros gases de proteção: Ar puro, Ar+N, Ar+He;
- Investigar a resistência à corrosão de revestimentos de aço inoxidável AISI 317L em outros meios agressivos e temperaturas.

REFERÊNCIAS

ALTIERI, Welder Michael. Estudo da relação microestrutura/propriedades mecânicas e tratamento térmico dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 316l e 317l soldados pelo processo GTAW, em termos de ferrita delta. *[S. l.]*, 2016.

ALVES, L. F. R. **Estudo comparativo da soldagem do aço inoxidável austenítico AISI-316L utilizando os processos de soldagem TIG, FCAW e MIG/MAG**. 2008. Universitário de Itajubá, *[S. l.]*, 2008.

AWS, B. American Welding Society. **Code for Arc and Gas Welding in Building Construction**, *[S. l.]*, 1990.

BAEK, Jong-hyun; JANG, Yun-chan; KIM, Ik-joong; YOO, Jung-soo; KIM, Cheol-man; KIM, Young-pyo. Influence of welding processes and weld configuration on fatigue failure of natural gas branch pipe. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, *[S. l.]*, v. 193, p. 104474, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104474>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016121001691>.

BARBEDO, Nancy Del Ducca. Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica. **Itajubá: UNIFEI**, *[S. l.]*, 2011.

CAVALCANTE, Nathália Escóssio; ANDRADE, Tathiane Caminha; PINHEIRO, Pedro Helton Magalhães; MIRANDA, Hélio Cordeiro De; MOTTA, Marcelo Ferreira; AGUIAR, Willys Machado. Estudo de procedimentos de soldagem MIG/MAG para aplicação de revestimentos de liga de níquel Inconel 625 em aço estrutural ASTM A387 Gr. 11. **Soldagem & Inspeção**, *[S. l.]*, v. 21, n. 1, p. 70–82, 2016.

DA SILVA, Marcos Mesquita; DA SILVA GONÇALVES, Geovanna Vitória; DA NÓBREGA, Venicius Romero Barbosa; RODRIGUES, Luiz Fernando Alves; BARROS, Jomar Meireles. Soldagem GTAW mecanizada com adição de arame frio. *[S. l.]*, 2019.

DAS BANIK, Sayantan; KUMAR, Suranjit; SINGH, Pawan Kumar; BHATTACHARYA, Sujay; MAHAPATRA, Manas Mohan. Prediction of distortions and residual stresses in narrow gap weld joints prepared by hot wire GTAW and its validation with experiments. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, *[S. l.]*, v. 193, p. 104477,

2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104477>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016121001721>.

DE LIMA, Daniela Bianchi Ponce Leon; PAREDES, Ramón Sigifredo Cortés; GOMES, Rogerio. Efeitos da energia de soldagem na microestrutura do aço inoxidável Superduplex Uns S32750. *[S. l.]*, 2011.

DE MELO, Raphael Henrique Falcão; COSTA, J.; SANTA, R. A. C.; MACIEL, Theophilo Moura. Efeito do processo de soldagem na microestrutura, microdureza e composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados por soldagem. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, *[S. l.]*, v. 7, n. 3, 2012.

DE SOUZA, Guttemberg Chagas; DA SILVA, Adriana Loureiro; MAIOR TAVARES, Sergio Souto; PARDAL, Juan Manuel; RIBEIRO FERREIRA, Miguel Luiz; CARDOTE FILHO, Ismael. Mechanical Properties and Corrosion Resistance Evaluation of a Superduplex Stainless Steel UNS S32760 Repaired by GTAW Process. **SOLDAGEM & INSPECAO**, *[S. l.]*, v. 19, n. 4, p. 302–313, 2014.

DEEPAK, J. R.; JEYA JEEVAHAN, J.; RAMACHANDRAN, D.; SAI SUHAS, S. V.; PRANEETHKUMAR REDDY, P. V. XRD investigation of GTAW, GMAW, LBW and AGTAW Corten A588 grade steel weldments. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.081>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321044369>.

DELONG, W. T. A. Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal. **Welding Journal, Welding Research Supplement**, *[S. l.]*, p. 273–286, 1974.

DO AMARAL, Cristiano Torres; CORREIA, Martineli Priscila; PEREIRA, Paulo Tibúrcio. Corrosão em estruturas metálicas: uma breve discussão acerca da prevenção em torres de telecomunicação. **e-xacta**, *[S. l.]*, v. 1, n. 1, 2008.

DOS SANTOS JR, A. G.; BIEHL, L. V; ANTONINI, L. M. Effect of chemical passivation treatment on pitting corrosion resistance of AISI 410 and 17–4 PH stainless steels. **Materials and Corrosion**, *[S. l.]*, v. 68, n. 8, p. 824–830, 2017.

DU, H.-Y., WEI, Y.-H., WANG, W.-X., LIN, W.-M., FAN, D. Numerical simulation of temperature and fluid in GTAW-arc under changing process conditions. **Journal of**

Materials Processing Technology. v. 209, n.8, p. 3752-3765, 2009.

ELIAS, Márcio de Souza; PARANHOS, Ronaldo. Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento inox austenítico sobre aço SAE 4130. **Soldagem & Inspeção**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 343–352, 2014.

FEDELE, R. A. Corrosão intergranular em juntas soldadas-Parte I. **Soldagem e Inspeção**, [S. l.], v. 6, p. 1–6, 2004.

FERNANDES, P. E. A. et Al. **Soldagem**. . São Paulo: SENAI – SP, 2013.

FERREIRA, Wilman Eduardo Italiano. Influência dos parâmetros de soldagem na sensitização de juntas soldadas em aço inoxidável austenítico aisi 316 soldadas pelo processo tig. **São Luís**, [S. l.], 2008.

FIRKA, Daniel. Statistical, technical and sociological dimensions of design of experiments. **The TQM Journal**, [S. l.], 2011.

GENEROSO, D.J.; DAMIN, K. V. .. **Aços Inoxidáveis Duplex Visão geral: da história à metalurgia física**. 2020.

GENTIL, Vicente. Corrosão, Livros Técnicos e Científicos Editora SA. **Quarta Edição, Rio de Janeiro, RJ**, [S. l.], 2003.

GOMES, Enedina Beatriz. Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi. **Universidade Federal de Itajuba**, [S. l.], v. 99, 2006.

GOMES, José Henrique de Freitas. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico**. 2010. Universidade Federal de Itajubá, [S. l.], 2010.

GUILHERME, Luis Henrique; ROVERE, Carlos Alberto Della; KURI, Sebastião Elias; OLIVEIRA, Marcelo Falcão De. Resistência à corrosão de junta dissimilar soldada pelo processo TIG composta pelos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 444. **Soldagem & Inspeção**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 42–50, 2014.

JUNIOR, J. A. A. G. et Al. Estudo da Corrosão em Aços Inoxidáveis AISI 316L e 444

Utilizados na Indústria Petroquímica. *In*: BRACO-XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO 2000, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.]

KANG, SeungGu; SHIN, Joonghan. Laser beam oscillation welding of aluminum alloy using the spatially modulated beam by diffractive optical element (DOE). **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 66, p. 387–396, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521002668>.

KOTARI, Sairam; PUNNA, Eshwaraiah; GANGADHAR REDDY, S. M.; VENUKUMAR, S. Mechanical and micro structural behaviour of flux coated GTAW and FSW joined AA6061 aluminium alloy. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 27, p. 1660–1667, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.562>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320323439>.

LANCASTER, John Frederick. **Metallurgy of welding**. [s.l.] : Elsevier, 1999.

LEITE, Pedro Henrique Rodrigues. Influência da variação invertida da tensão e corrente na eficiência térmica do processo de soldagem TIG. [S. l.], 2018.

LIMA, C. R. C.; BELÉM, M. J. X.; FALS, H. D. C.; ROVERE, C. A. Della. Wear and corrosion performance of Stellite 6® coatings applied by HVOF spraying and GTAW hotwire cladding. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 284, p. 116734, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116734>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013620301485>.

LIMA JÚNIOR, Diniz Ramos De. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW e SMAW** Universidade Federal de Pernambuco, , 2013.

LIPPOLD, John C.; KOTECKI, Damian J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. [s.l.: s.n.].

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. [s.l.] : Ed. da UFMG, 2005.

MIRANDA, Edvan Cordeiro De; SILVA, Cleiton Carvalho; MOTTA, Marcelo

Ferreira; MIRANDA, Hélio Cordeiro De; FARIAS, Jesualdo Pereira. Avaliação do Uso do tecimento sobre o nível de diluição e geometria do cordão de solda na soldagem TIG com alimentação automática de arame frio. **Soldagem & Inspeção**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 180–190, 2015.

MIRANDA, H. C. **Influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobre cabeça**. 1999. Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 1999.

MODENESI, Paulo J. Soldabilidade dos aços inoxidáveis. **São Paulo, Senai-SP**, [S. l.], p. 21–48, 2001.

MODENESI, Paulo J. Fluxo de calor em soldagem. **Belo Horizonte**, [S. l.], 2003.

MODENESI, Paulo J. A química da formação do cordão na soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 287–300, 2013.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. **Belo Horizonte: UFMG**, [S. l.], 2012.

MÜRI, Pedro; MARGARIT-MATTOS, Isabel Cristina Pereira. **Avaliação Crítica do Ensaio de Reativação Eletroquímica Potenciodinâmica Aplicado a Aços Inoxidáveis Austeníticos** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ, , 2011.

MURUGAN, N.; PARMAR, R. S. Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding. **Welding Journal-Including Welding Research Supplement**, [S. l.], v. 76, n. 10, p. 391s, 1997.

NETO, Francisco de Assis Souza; DA CUNHA, Marcelo César Dias; DOS SANTOS, Aureliano Xavier; MACIEL, Theophilo Moura; DOS SANTOS, Marco Antonio; DE SANTANA, Renato Alexandre Costa. Análise da resistência a corrosão de revestimentos a base da liga de níquel depositados por soldagem em aço API 5L Gr B. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 144–150, 2017.

NOURI, Meisam; ABDOLLAH-ZADEH, Amir; MALEK, F. Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding. **Journal of materials science & technology**, [S. l.], v. 23, n. 6, p. 817, 2007.

OLIVARES, Erick Alejandro González; DÍAZ, Victor Manuel Vergara. Estudo do

Processo TIG Hot-Wire com Material de Adição AISI-316L Analisando o Efeito do Sopro Magnético do Arco sobre a Diluição do Cordão de Solda. **Soldagem & Inspeção**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 330–341, 2016.

OLIVARES, E. A. G., DIAZ, V. M. V. **Study of the hot-wire TIG process with AISI-316L filler material, analysing the effect of magnetic arc blow on the dilution of the weld bead**. *Welding International*, Vol. 32, 2, pp. 139–148, 2018.

PADILHA, Angelo Fernando; GUEDES, L. C. P. P. São Paulo. **Acos inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades**. Hemus, , 1994.

PADMANABAN M. R. A.; NEELAKANDAN, B.; KANDASAMY, D. **A Study on process characteristics and performance of hot wire gas tungsten arc welding process for high temperature materials**. *Materials Research*, Vol. 20 (2017), 1, pp. 76–87.

PAIVA, G. J. M. **As Técnicas de Perda de Massa e Resistência Elétrica da Avaliação da Corrosão Naftalênica em Laboratórios e em Campos**. 2000. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2000.

PALANI, P. K.; MURUGAN, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 190, n. 1–3, p. 291–299, 2007.

PEIXOTO, Arildomá Lobato. Soldagem. Instituto Federal de Educação. **Ciência e Tecnologia Para, Belém**, [S. l.], 2012.

POLIDO, RAFAEL SAITO; GALLEGO, Juno. **Estudo da Microestrutura de Revestimento Duro Aplicado nos Equipamentos da Indústria Sucroalcooleira Sujeito ao Desgaste Abrasivo**. 2020.

RODRIGUES;, Maria Isabel; IEMMA, Antonio Francisco. **Experimental Design and Process Optimization**. 1 edition ed. Campinas - SP: CRC Press, 2014.

RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, T.; CRUZ-HERNÁNDEZ, V. L.; GARCÍA-RENTERÍA, M. A.; TORRES-GONZALEZ, R.; GARCÍA-VILLARREAL, S.; CURIEL-LÓPEZ, F. F.; FALCÓN-FRANCO, L. A. First assessment on the microstructure and mechanical properties of gtaw-gmaw hybrid welding of 6061-t6 AA. **Journal of**

Manufacturing Processes, [S. l.], v. 59, p. 658–667, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.069>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520306587>.

SABARÁ, Ely Wagner Ferreira. Caracterização Microestrutural e Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos utilizados em aplicações como Biomateriais. [S. l.], 2013.

SAHOO, Chinmaya Kumar; SONI, Lalit; MASANTA, Manoj. Evaluation of microstructure and mechanical properties of TiC/TiC-steel composite coating produced by gas tungsten arc (GTA) coating process. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 307, p. 17–27, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.056>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897216308106>.

SANDES, Soraia Simões; ALVARÃES, Camila Pereira; MENDES, Matheus Campolina; ARAÚJO, Leonardo Sales; SOUZA, Luis Felipe Guimarães De; JORGE, Jorge Carlos Ferreira. Avaliação de revestimentos de liga de níquel 625 depositados pelo processo eletroescória. **Soldagem & Inspeção**, [S. l.], v. 21, p. 417–427, 2017.

SATHISH, S.; KESAVARAJ, K.; GIRISHA, L.; DANIEL DAS, A.; JOHNSON, Pradeep; SUBBIAH, Ram. Parametric optimization of explosive welding process on nickel-titanium alloys. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.490>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321034155>.

SCHAEFFLER, Anton L. Constitution diagram for stainless steel weld metal. **Metal progress**, [S. l.], v. 56, n. 11, p. 680, 1949.

SENAI - ES. **Noções básicas de Processos de Soldagem e Corte - Mecânica** Vitória - ESSENAI / CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão), , 1996. Disponível em: <http://www.abraman.org.br/arquivos/73/73.pdf>.

SHAH, P., AGRAWAL, C. A review on twin tungsten inert gas welding process accompanied by hot wire pulsed power source. **Journal of Welding and Joining**, Vol. 37, 2, pp. 139–148, 2019.

SHANMUGAM, R.; MURUGAN, N. Effect of gas tungsten arc welding process

variables on dilution and bead geometry of Stellite 6 hardfaced valve seat rings. **Surface engineering**, [S. l.], v. 22, n. 5, p. 375–383, 2006.

SHREIR, L. L. **Corrosion. Vol 1. Seção 3.3 Stainless Steels** Butterworth–Oxford, , 1995.

SILVA, Marcos Mesquita. **Avaliação da compatibilidade metalúrgica e da resistência à corrosão de revestimentos da liga AWS ER NiCrMo-4 aplicados por soldagem SAW sobre o aço API 5L Gr B**. 2013. Universidade Federal de Campina Grande, [S. l.], 2013.

SPANIOL, E., UNGETHÜM, T., TRAUTMANN, M. et al. **Development of a novel TIG hot-wire process for wire and arc additive manufacturing**. *Weld World* 64, 1329–1340, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00871-w>

VERGARA, Victor; CORTES, John; ALVAREZ, Abdón. **Uma Contribuição ao Estudo do Processo TIG Cold Wire na Posição Plana, Horizontal e Sobrecabeça sob Novos Desenhos de Tocha e Metodologias de Alimentação de Arame**. *Soldagem & Inspeção*. 20. 275-286, 2015.

VERGARA, Victor; FLORES, Cristian; GONZALEZ, Erick; VIEIRA DA CUNHA, Tiago. **Comparative analysis between cold-wire and hot-wire in the TIG welding process**. 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF). Joinville, Santa Catarina, Brasil, 2017.

VERRAN, G. O.; MENDES, R. P. K.; VALENTINA, L. V. O. Dalla. **DOE applied to optimization of aluminum alloy die castings**. *Journal of Materials Processing Technology*, [S. l.], v. 200, n. 1, p. 120–125, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.084>.

VIOTO, Rodrigo Pivetta; ANTUNES, Renato Altobelli. **Estudo do Fenômeno de Sensitização do Aço Inoxidável Austenítico Estabilizado AISI 347**. **CECS-UFABC. Santo André**, [S. l.], 2016.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia**. [s.l.] : Editora Blucher, 1992.

WANG, Hui; LEI, Ting; RONG, Youmin; SHAO, Wenjun; HUANG, Yu. Arc length

stable method of GTAW based on adaptive Kalman filter. **Journal of Manufacturing Processes**, [S. l.], v. 63, p. 130–138, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612520300402>.

WANG, X. H.; SONG, S. L.; QU, S. Y.; ZOU, Z. D. Characterization of in situ synthesized TiC particle reinforced Fe-based composite coatings produced by multi-pass overlapping GTAW melting process. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 201, n. 12, p. 5899–5905, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897206013570>.

WEMAN, Klas. **Welding processes handbook**. [s.l.] : Elsevier, 2011.

WILLIAM, D. C. J.; CALLISTER, J. R. *Ciência e Engenharia de Materiais—Uma Introdução*, 5ª Edição. **Editora LTC—Livros Técnicos e Científicos, São Paulo**, [S. l.], 2002.

XU, Yanling; FANG, Gu; LV, Na; CHEN, Shanben; JIA ZOU, Ju. Computer vision technology for seam tracking in robotic GTAW and GMAW. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, [S. l.], v. 32, p. 25–36, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.09.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584514000775>.

YA-LONG, Li; TIAN-SHUN, Dong; GUO-LU, Li; HAI-DOU, Wang; BIN-GUO, Fu; XIAO-DONG, Zheng; XIU-KAI, Zhou. Microstructure and mechanical property of Ni-based thick coating remelted by gas tungsten arc. **Vacuum**, [S. l.], v. 155, p. 260–269, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.053>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X18306869>.

APÊNDICE A – VALORES AQUISITADOS DURANTE DEPOSIÇÃO DOS CORDÕES ISOLADOS

Ensaio	Corrente nominal (A)	Corrente média (A)	DEP (mm)	Tensão média (Vm)	Energia de soldagem (H_t)
1	200,0 A	198,0 A	10,0 mm	23,5V	155,10
2	200,0 A	199,0 A	10,0 mm	22,5V	149,25
3	240,0 A	237,0 A	10,0 mm	25,3V	199,87
4	240,0 A	238,0 A	10,0 mm	23,1V	183,26
5	200,0 A	198,0 A	15,0 mm	26,7V	176,22
6	200,0 A	197,0 A	15,0 mm	28,3V	185,84
7	240,0 A	236,0 A	15,0 mm	29,8V	234,43
8	240,0 A	237,0 A	15,0 mm	28,0V	221,20
9	220,0 A	217,0 A	12,5 mm	27,8V	201,09
10	220,0 A	218,0 A	12,5 mm	25,0V	181,67
11	186,4 A	184,0 A	12,5 mm	29,0V	177,87
12	253,6 A	250,0 A	12,5 mm	27,1V	225,83
13	220,0 A	219,0 A	8,3 mm	20,0V	146,00
14	220,0 A	217,0 A	16,7 mm	28,9V	209,04
15	220,0 A	218,0 A	12,5 mm	25,2V	183,12
16	220,0 A	218,0 A	12,5 mm	26,1V	189,66
17	220,0 A	218,0 A	12,5 mm	26,6V	193,29

Fonte – Autoria própria.