



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JEFFERSON SEGUNDO DE LIMA

**ANÁLISE E SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO DO AÇO AISI 316LSI UTILIZANDO A TÉCNICA DE CURTO
CIRCUITO CONTROLADO**

Recife
2023

JEFFERSON SEGUNDO DE LIMA

**ANÁLISE E SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO DO AÇO AISI 316LSI UTILIZANDO A TÉCNICA DE CURTO
CIRCUITO CONTROLADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Renato Alexandre Costa de Santana.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

L732a

Lima, Jefferson Segundo de.

Análise e seleção de parâmetros para manufatura aditiva por deposição a arco do aço AISI 316LSI utilizando a técnica de curto circuito controlado / Jefferson Segundo de Lima. – 2023.

124 f.: il., fig. e tab.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Renato Alexandre Costa de Santana.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2023.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Manufatura aditiva por deposição a arco. 3. AISI 316LSI. 4. Microestrutura. 5. Propriedades mecânicas. 6. Planejamento experimental. I. Santos, Tiago Felipe de Abreu (Orientador). II. Santana, Renato Alexandre Costa de (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2024-23

JEFFERSON SEGUNDO DE LIMA

**ANÁLISE E SELEÇÃO DE PARÂMETROS PARA MANUFATURA ADITIVA POR
DEPOSIÇÃO A ARCO DO AÇO AISI 316LSI UTILIZANDO A TÉCNICA DE CURTO
CIRCUITO CONTROLADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Aprovada em: 20/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Edwar Andres Torres Lopez (Examinador Externo)
Universidad de Antioquia

Prof. Dr. Marco Antonio dos Santos (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande

Dedico esta tese aos meus pais, José Dias de Lima e Maria Perpetua do Socorro S. Lima, que sempre me apoiaram nos estudos. E aos meus irmãos, Emerson Segundo e Pablo Segundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao autor da existência, aquele que permite que todas as coisas se concretizem, nosso único e verdadeiro Deus.

À minha família, por incentivar e colaborar, principalmente nos momentos de dificuldade.

Aos orientadores, Tiago Felipe de Abreu Santos, pela oportunidade e confiança no desenvolvimento deste trabalho, e, Renato Alexandre Costa de Santana, por compartilhar ensinamentos técnicos e pessoais, sendo uma referência de ser humano e profissional da educação.

A todos os membros do grupo LabSol, em especial Joyce Ingrid Venceslau de Souto, Júlio Feitosa da Silva Neto e Emerson Segundo de Lima, pelo auxílio e grande contribuição no desenvolvimento desde e de vários outros trabalhos.

A todos do grupo de pesquisa de tecnologia e metalurgia da soldagem e união de materiais (SOLDAMAT), que contribuíram para a realização desse trabalho.

Aos professores Marco Antônio dos Santos, Antônio Almeida da Silva, João Baptista da Costa Agra de Melo, Manasseis da Costa Agra Mello, Theophilo Moura Maciel, Walman Benício de Castro e Carlos José de Araújo, pelos ensinamentos, confiança e auxílios em laboratório, e todos outros professores que passaram pela minha trajetória e me motivaram a seguir a busca pelo conhecimento.

Aos meus amigos e colegas, pelas palavras amigas nas horas difíceis, pelo auxílio nos trabalhos e dificuldades, e, principalmente, por estarem comigo nesta caminhada, tornando-a mais fácil e agradável.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEM-UFPE).

A Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UAEM-UFCG), pelo investimento material, de máquinas e equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

“Não temas, Abrão, eu sou o teu escudo, e teu galardão será sobremodo grande.” (GÊNESIS, 15:1)

RESUMO

A Manufatura Aditiva por Deposição ao Arco (MADA) é um processo de fabricação baseado na criação de um componente camada a camada que se utiliza de uma técnica de deposição de metal por arco elétrico, sendo uma alternativa promissora e ainda pouco estudada para produção de componentes em aço inoxidável. Dentre as ligas de aço inoxidável austenítico, a liga AISI 316L-Si está entre as de maior interesse nos setores de transporte, saúde e na industrial de petróleo e gás, por conta de suas boas características mecânicas, biocompatibilidade e da alta resistência à corrosão. Este trabalho tem como objetivo, avaliar a influência de parâmetros de processo sobre a transferência metálica, microestrutura e propriedades mecânicas de depósitos isolados e de pré-formas metálicas de aço inoxidável austenítico 316LSi obtidas por MADA. Para esse fim, onze cordões de solda foram obtidos com diferentes parâmetros, conforme determinado por Planejamento Experimental (DOE) do tipo $2^3 + 3$ pontos centrais, e sete pré-formas, conforme DOE do tipo $2^2 + 3$. Dentre os parâmetros testados, a combinação de velocidade de deposição de $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ com a velocidade de alimentação de arame de $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ e vazão de gás de proteção de $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, forneceram melhor regularidade de transferência, com ausência de defeitos e uma pré-forma com propriedades mecânicas superiores.

Palavras-chave: manufatura aditiva por deposição a arco; AISI 316LSi; microestrutura; propriedades mecânicas; planejamento experimental.

ABSTRACT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is a manufacturing process based on the creation of a layer-by-layer component that uses an electric arc metal deposition technique, being a promising and still little studied alternative for producing components in stainless steel. Among the austenitic stainless steel alloys, the AISI 316L-Si alloy is among those with the greatest interest in the transport, health and oil and gas industrial sectors, due to its good mechanical characteristics, biocompatibility and high resistance to corrosion. This work aims to evaluate the influence of process parameters on metallic transfer, microstructure and mechanical in strands and metallic preforms of austenitic stainless steel 316L-Si obtained by WAAM. For this purpose, eleven weld beads were obtained with different parameters, as determined by design of experiment (DOE) of the type $2^3 + 3$ central points, and seven preforms, according to DOE of type $2^2 + 3$ central points. Among the parameters tested, the combination of a deposition speed of $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ with a wire feed speed of $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ and a shielding gas flow of $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ provided better transfer reliability, and a preform with no defects and better mechanical properties.

Keywords: wire arc additive manufacturing; AISI 316LSi; microstructure; mechanical properties; design of experiment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação de DOE para compreensão dos efeitos dos fatores sobre pré-formas obtidas por MADA: a) esquematização da altura em pré-formas; b) Curvas de interação de fatores sobre a resposta de Altura total; c) esquematização do efeito escada (S_z) e d) Curvas de interação de fatores sobre S_z	35
Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa.	37
Figura 3 – Esquematização do processo de MA por GMAW	38
Figura 4 – Fixação da chapa substrato na mesa de trabalho	40
Figura 5 – Interface do software SAT	41
Figura 6 – Desenho esquemático representante da retirada das amostras a partir do depósito.....	44
Figura 7 – Desenho esquemático da geometria do cordão de solda, quanto ao reforço (R), largura (L) e do ângulo de molhamento (θ) do depósito	44
Figura 8 – Pontos definidos manualmente para identificar as áreas de a) reforço do MD e de b) penetração no metal de base.....	45
Figura 9 – Desenho esquemático da matriz 5x5 de pontos indentados para microdureza Vickers	46
Figura 10 – Curva tensão x tempo de uma deposição GMAW com CCC em a) 30 s e b) 0,25 s	47
Figura 11 – Desenho esquemático representante da retirada das amostras a partir de pré-forma.....	48
Figura 12 - Esquematização das características geométricas em pré-formas obtidas por MADA	49
Figura 13 – Ilustração da posição das três séries de indentações, distâncias entre indentações de 0,5 mm e distância lateral de 0,5 mm entre as séries.	50
Figura 14 - Representação esquemática da a) posição de retirada dos corpos de prova e b) dimensões do corpo de prova de tração.....	51
Figura 15 – Aspecto superficial das deposições obtidas por GMAW-CCC.....	53
Figura 16 – Macrografia dos cordões depositados.....	54
Figura 17 – Diagramas de Pareto de efeitos associados ao aspecto geométrico de Reforço.....	56

Figura 18 – Diagramas de Pareto de efeitos associados ao aspecto geométrico de Largura.....	57
Figura 19 – Diagramas de Pareto de efeitos associados ao aspecto geométrico de Diluição.	57
Figura 20 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados ao Reforço dos depósitos.....	59
Figura 21 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados a Largura dos depósitos.....	60
Figura 22 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados a Largura dos depósitos.....	60
Figura 23 – Gráfico de superfície de resposta do reforço (R).	61
Figura 24 – Gráfico de superfície de resposta da largura (L).....	62
Figura 25 – Gráficos de superfície de resposta da diluição (D).	63
Figura 26 – Diagrama de Pareto de efeitos associados a dureza da região de depósito.	67
Figura 27 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados a dureza dos depósitos.	68
Figura 28 – Gráficos de superfície de resposta de dureza (HV).	69
Figura 29 – A morfologia macroscópica e a forma de onda de tensão dos cordões depositados referentes aos experimentos 1 a 3 (a-c), 4 a 6 (d-f), 7 a 9 (g-i), e 10 a 11 (j-k).	71
Figura 30 – Diagrama de Pareto de efeitos associados ao IVcc dos depósitos.....	74
Figura 31 – Valores Previstos vs. Valores Observados do modelo associado ao IVcc.	75
Figura 32 – Gráfico de superfície de resposta de IVcc.	76
Figura 33 – Pré-formas de AISI 316L-Si obtidas por MADA utilizando a técnica de C-CC.....	78
Figura 34 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Altura total (A_T) das pré-formas obtidas por MADA	82
Figura 35 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA	83
Figura 36 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Largura total (L_T) das pré-formas obtidas por MADA	83

Figura 37 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA	84
Figura 38 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas obtidas por MADA	84
Figura 39 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Altura total (A_T) das pré-formas obtidas por MADA.....	87
Figura 40 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA	88
Figura 41 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Largura total (L_T) das pré-formas obtidas por MADA.....	88
Figura 42 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA.....	89
Figura 43 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas obtidas por MADA.....	89
Figura 44 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Altura total (A_T) das pré-formas.....	90
Figura 45 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas .	91
Figura 46 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Largura total (L_T) das pré-formas ..	91
Figura 47 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas .	92
Figura 48 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas	92
Figura 49 – Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 1 de MA de 316L-Si	94
Figura 50 – Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 2 de MA de 316L-Si	94
Figura 51 – Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 3 de MA de 316L-Si	95
Figura 52 – Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 4 de MA de 316L-Si	95

Figura 53 – Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal das pré-formas 5, 6 e 7 de MA de 316L-Si.....	96
Figura 54 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à dureza média das pré-formas obtidas por MADA	98
Figura 55 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à dureza média das pré-formas obtidas por MADA.....	99
Figura 56 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à dureza média das pré-formas	100
Figura 57 – Microestrutura do 316L-Si obtido por MADA em diferentes zonas: (a) pré-forma 2 na zona III; (b) pré-forma 3 na zona III; (c) pré-forma 2 na zona II; (d) pré-forma 3 na zona II; (e) pré-forma 2 na zona I; (f) pré-forma 3 na zona I.	102
Figura 58 – Microestrutura em x500 da camada intermediária (zona II): (a) Pré-forma 2 e (b) Pré-forma 3.	104
Figura 59 – (a) Macro morfologia da pré-forma obtida por GMAW-CCC, (b) Morfologia da pré-forma com as extremidades descartadas, (c) Corte transversal da pré-forma obtida.....	105
Figura 60 – Curvas de tensão-deformação de engenharia dos espécimes de tração amostra 0° e 90°.	107
Figura 61 – Histograma de propriedades mecânicas de tensão das amostras retiradas a 0° e 90°.	107
Figura 62 – Análise fractografica via MEV: (a) amostra 0° 30x, (b) amostra 0° 500x, (c) amostra 0° 2000x, (d) amostra 90° 30x, (e) amostra 90° 500x, (f) amostra 90° 2000x.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as fontes de energia utilizadas para fabricação de componentes metálicos	24
Tabela 2 – Principais modos de transferência metálica que ocorrem no processo GMAW.....	28
Tabela 3 – Composição química nominal do metal de adição ER316LSi.....	39
Tabela 4 – Variáveis e níveis extraídos da revisão bibliográfica.....	42
Tabela 5 – Matriz do planejamento fatorial $2^3 + 3$ com níveis reais e codificados para execução dos depósitos	42
Tabela 6 – Matriz do planejamento fatorial $2^2 + 3$ com níveis reais e codificados para execução das pré-formas	43
Tabela 7 – Matriz do planejamento fatorial com níveis reais para os parâmetros geométricos dos depósitos	55
Tabela 8 – Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis resposta do aspecto geométrico e diluição	56
Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta R.....	58
Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta L	58
Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta D.....	59
Tabela 12 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta de diluição	64
Tabela 13 – Matriz do planejamento fatorial com níveis reais para os valores médios de dureza nos depósitos.	65
Tabela 14 – Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável resposta de dureza.	66
Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para a dureza.	67
Tabela 16 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta de diluição	70
Tabela 17 – Matriz do planejamento fatorial com níveis reais para os valores de IVcc.	72
Tabela 18 – Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável resposta de IVcc.	73
Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) para o IVcc.....	75

Tabela 20 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta de diluição	77
Tabela 21 – Vistas lateral e frontal das diferentes pré-formas obtidas por MADA	79
Tabela 22 – Características geométricas das pré-formas conforme planejamento experimental.....	81
Tabela 23 – Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis resposta do aspecto geométrico.....	81
Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) para Altura total (A_T) das pré-formas obtidas por MADA	85
Tabela 25 – Análise de variância (ANOVA) para Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA	85
Tabela 26 – Análise de variância (ANOVA) para Largura total (L_T) das pré-formas obtidas por MADA	86
Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) para Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA	86
Tabela 28 – Análise de variância (ANOVA) para Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas obtidas por MADA	86
Tabela 29 – Dureza média das pré-formas obtidas por MADA conforme planejamento experimental.....	96
Tabela 30 – Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta relacionadas à dureza média das pré-formas obtidas por MADA	97
Tabela 31 – Análise de variância (ANOVA) para dureza média das pré-formas obtidas por MADA.....	98
Tabela 32 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta da dureza média.	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A	Totalmente Austenítico
AF	Austenita como primeira fase e Ferrita como secundária
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCC	Curto-Circuito Controlado
CCTH	história térmica cíclica composta
CMT-P	Modo de transferência CMT pulsado
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
DEF	Deformação sob tração
DOE	Design Of Experiment
EBM	Fusão por feixe de elétrons
FN	Ferrite Number
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
INTM	Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais
LBW	<i>Laser Beam Welding</i>
LE	Limite de escoamento
LRT	Limite de resistência à tração
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Ótica
PBT	Leito de pó
TWI	<i>The Welding Institute</i>
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>
SGFR	Vazão do gás de proteção (L·min ⁻¹)
SLM	Fusão Seletiva a Laser

LISTA DE SIMBOLOS

V_a	Velocidade de alimentação do arame ($m \cdot min^{-1}$)
V_s	Velocidade de deslocamento da tocha ($mm \cdot min^{-1}$)
IV_{cc}	Índice de regularidade do arco
σ_{tcc}	Desvio padrão da média do tempo de curto-circuito
σ_{tab}	Desvio padrão da média do tempo de arco aberto
t_{cc}	Média do tempo de curto-circuito
t_{ab}	Média do tempo de arco aberto
R	Reforço (mm)
L	Largura (mm)
D	Diluição (%)
θ	Ângulo de molhamento dos cordões ($^{\circ}$)
A_T	Altura total (mm)
A_{Ef}	Altura eficaz (mm)
L_T	Largura total (mm)
L_{Ef}	Largura eficaz (mm)
Sz	Rugosidade/rejeito (mm)
δ	Ferrita
γ	Austenita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral	22
1.1.2	Objetivos Específicos	23
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	MANUFATURA ADITIVA DE METAIS.....	24
2.2	PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO POR GMAW	25
2.2.1	Modos de transferência metálica	26
2.2.2	Curto-circuito controlado – CCC	28
2.3	AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	30
2.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	EXECUÇÃO DOS DEPÓSITOS AO ARCO	38
3.1.1	Material do substrato	38
3.1.2	Material de depósito	39
3.1.3	Máquina e fixação	39
3.1.4	Aquisição de dados	40
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	41
3.2.1	Planejamento 2³ + 3 de depósitos	42
3.2.2	Planejamento 2² + 3 de pré-formas	43
3.3	ANÁLISES E AVALIAÇÃO DOS DEPÓSITOS ISOLADOS	43
3.3.1	Macrografia	43
3.3.2	Ensaio de microdureza vickers	45
3.3.3	Determinação do Índice de regularidade	46
3.4	AVALIAÇÃO DAS PRÉ-FORMAS	48
3.4.1	Análise geométrica	48
3.4.2	Análise microestrutural	49
3.4.3	Ensaio de microdureza vickers	50
3.5	TESTE E FABRICAÇÃO DE PEÇAS	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS DEPÓSITOS.....	53

4.1.1	Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial	55
4.1.2	Influência dos parâmetros sobre a diluição e sobre os fatores geométricos das deposições.....	61
4.1.3	Teste de Curvatura	64
4.2	ANÁLISE DE DUREZA NOS DEPÓSITOS.....	65
4.2.1	Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial	66
4.2.2	Influência dos parâmetros sobre a dureza	68
4.2.3	Teste de Curvatura	70
4.3	ANÁLISE DE REGULARIDADE DO ARCO DOS DEPÓSITOS.....	71
4.3.1	Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial	73
4.3.2	Influência dos parâmetros sobre o IVcc	76
4.3.3	Teste de Curvatura	77
4.4	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS PRÉ-FORMAS.....	77
4.4.1	Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial	81
4.4.2	Influência dos parâmetros sobre os fatores geométricos das pré-formas	90
4.4.3	Teste de Curvatura	93
4.5	MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DAS PRÉ-FORMAS	93
4.5.1	Perfis de Microdureza	93
4.5.2	Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial	97
4.5.3	Influência dos parâmetros sobre a dureza	99
4.5.4	Teste de Curvatura	100
4.5.5	Microestrutura	101
4.6	PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PRÉ-FORMA FINAL.....	104
4.6.1	Resistência à Tração	105
4.6.2	Fractografia.....	109
5	CONCLUSÕES	111
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
	REFERÊNCIAS.....	113
	APÊNDICE A – TESTE E FABRICAÇÃO DE REDUÇÃO CONCÊNTRICA.	123
	APÊNDICE B – TESTE E FABRICAÇÃO DE FLANGE.....	124

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos de maior qualidade e durabilidade atrelados à redução de consumo e preservação do meio ambiente, faz com que a Manufatura Aditiva (MA) se destaque por suas características de flexibilidade de produção e pela rapidez e economia de material. O processo MA, ou impressão 3D (ZHANG *et al.*, 2018), consiste na produção de uma forma (peça) desejada através sobreposições de camadas de determinado material. Constitui-se em um processo de construção de objetos tridimensionais sólidos a partir da deposição de camadas, oposto à manufatura subtrativa, considerada uma das tecnologias de fabricação mais inovadoras do século XXI pois integra as principais tecnologias mundiais, ou seja, a modelagem digital, usinagem, processamento de materiais e engenharia metalúrgica (SHAH *et al.*, 2023). Essa tecnologia é tida como capaz de revolucionar processos produtivos e de alterar estratégias de produção atualmente empregadas. Uma publicação da revista *Economist* traz a MA como a tecnologia de produção do futuro, chamando-a de terceira Revolução Industrial, por ser altamente provável que a MA traga impactos significativos no futuro próximo (HUANG *et al.*, 2012).

O desenvolvimento dos primeiros testes e processos de MA para metais se deu a partir dos anos 1980 e 1990 em laboratórios de universidades e de P&D em indústrias (MILEWSKI, 2017). Essa evolução tem sido demonstrada e adotada pelas indústrias atualmente (DEBROY *et al.*, 2018a). Seu uso para fabricação de peças metálicas traz consigo a flexibilidade, a facilidade e a rapidez na produção de peças com geometrias complexas e com características próprias. Outra vantagem a ser destacada refere-se ao tempo de comercialização do produto final, que pode ser diminuído significativamente devido à redução ou até eliminação de etapas, como usinagem e montagem das peças (TOWNSEND *et al.*, 2016), assim como a eliminação de moldes (ZHANG *et al.*, 2018). O processo de manufatura aditiva de peças metálicas pode ser desenvolvido a partir de pó ou arame, utilizando no primeiro caso uma fonte de energia a laser, feixe de elétrons ou arco-plasma, o segundo utiliza normalmente uma fonte de energia de arco-plasma.

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) se utiliza de um arco elétrico como fonte de calor para possibilitar a fusão do material e promover a sua deposição para formar peças metálicas (SILVA, 2020). Este processo se constitui em uma técnica promissora e vem sendo utilizada visando eficiência energética e ao

mesmo tempo agregando a customização que a manufatura aditiva promete. O processo MADA consiste, portanto, na fabricação de pré-formas metálicas a partir da deposição de multicamadas de metais fundidos sobre um substrato. O controle adequado dos parâmetros para a deposição dessas camadas, pode proporcionar peças com boas propriedades mecânicas, uniformidade e bom acabamento.

O aço inoxidável austenítico é um dos materiais preferidos para produção de peças por MA (AL-MAMUN *et al.*, 2020; TARASOV *et al.*, 2019), devido sua boa soldabilidade, alta resistência à corrosão, resistência mecânica e amplo uso em alimentos, tratamento médico, móveis, indústria, energia nuclear e outros campos (ABE; WATANABE, 2008; JAVIDI; HAGHSHENAS; SHARIAT, 2020; KUMAR; SINGH; SINGH UPPAL, 2022). Embora as tecnologias de sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering* - SLS) e fusão por feixe (*electron beam melting* - EBM) para fabricação de aço inoxidável austenítico estejam maduras e tenham boas propriedades mecânicas, elas apresentam alto custo e baixas taxas de deposição, o que não é adequado para a fabricação de componentes em larga escala. Comparado com SLS e EBM, o MADA é mais adequado para a fabricação de peças em grande escala (BUCHANAN; GARDNER, 2019) devido principalmente à sua elevada taxa de deposição (WONG; HERNANDEZ, 2012).

No entanto, a elevada taxa de deposição da MADA é acompanhada por elevado aporte térmico, o que pode ocasionar acúmulo de calor, causando problemas na deposição das camadas (SILVA, 2020). À medida que as camadas vão sendo depositadas, o acúmulo de calor passa a ser mais significativo (YANG; WANG; ZHANG, 2017). E esse acúmulo de calor pode apresentar vários impactos na geometria da camada depositada, como o aumento na largura, ou uma oxidação excessiva, além de alterações metalúrgicas indesejáveis que podem prejudicar as suas propriedades mecânicas (WU *et al.*, 2017). Por isso, estudos que proponham um aperfeiçoamento e um melhor controle das variáveis do processo são estratégicos para produção de peças com desempenho mecânico superior e com nível de precisão geométrico desejado. Para isso é necessário um conhecimento suficiente do processo, que envolve fenômenos multidisciplinares complexos, para realizar um controle preciso das variáveis e conseqüentemente do processo de produção (LI; SU; ZHU, 2022).

A fim de controlar e estabelecer os valores das variáveis adequadas do processo, tem-se aplicado técnicas de planejamento e análise de efeitos para

conseguir fabricar depósitos e pré-formas metálicas com boa aparência, melhor acabamento superficial e com propriedades mecânicas e microestruturais superiores (BELHADJ *et al.*, 2022; HUSSEIN *et al.*, 2021; NAVARRO *et al.*, 2022).

Portanto, revelar a influência dos parâmetros na deposição e encontrar as melhores condições, dentro de um faixa de parâmetros do processo, torna-se necessário. Nesse contexto, uma relação entre os objetivos da pesquisa e os parâmetros de entrada deve ser estabelecida através da construção de modelos estatísticos utilizando métodos de planejamento experimental, como o método fatorial completo, o método ortogonal e a metodologia de superfície de resposta (RSM) (ZHANG *et al.*, 2023b). Os métodos de superfície de resposta (RSM) são úteis para analisar problemas em que várias variáveis independentes influenciam uma variável ou resposta dependente (SHAHIAND; PANDEY, 2006), com baixo custo experimental e alta confiabilidade, sendo usado por pesquisadores na área de MADA, por exemplo, para estudar e otimizar as relações entre os parâmetros do processo de deposição e a estabilidade geométrica da pré-forma, ao se desenvolver modelos matemáticos a partir de dados experimentais (CHEN *et al.*, 2022; FARIAS; DA CRUZ PAYÃO FILHO; MORAES E OLIVEIRA, 2021; KUMAR; RANJAN SAHU; MANDAL, 2022; XIAO *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2023a).

Neste sentido, a proposição de uma modelagem matemática obtida via análise de resultados por planejamento experimental que possibilite a otimização da fabricação de pré-formas metálicas por MADA, controlando e garantindo a utilização de melhores valores de variáveis do processo de deposição a arco, surge como uma alternativa, ainda pouca estudada, para a obtenção de peças de aço inoxidável de geometria especial com boa qualidade microestrutural, bom aspecto visual e propriedades mecânicas melhoradas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estabelecer os melhores parâmetros para obtenção de pré-formas de aço inoxidável austenítico 316LSi por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco utilizando o processo GMAW por Curto-Circuito Controlado.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros do processo sobre as características geométricas, microestruturais e propriedades mecânicas das pré-formas;
- Correlacionar a microestrutura com as propriedades mecânicas resultantes nas pré-formas produzidas;
- Gerar modelos matemáticos via planejamento experimental e para estabelecer os melhores valores de parâmetros para produção de peças em aço inoxidável 316LSi por MADA.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Este capítulo 1 compreende a introdução, e os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

O Capítulo 2 corresponde à fundamentação teórica, apresentando os conceitos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa, abordando conceitos que envolvem o contexto desta tese e realiza uma revisão bibliográfica sobre o tema.

O Capítulo 3 abrange a metodologia utilizada na elaboração deste trabalho, com um foco especial na explicação dos procedimentos, testes e ferramentas de análise empregadas.

Já o Capítulo 4 se dedica à análise, discussão e desenvolvimento dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 compreende as conclusões, bem como uma exposição crítica da relevância e qualidade dos resultados alcançados, incluindo sugestões para direções futuras de pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA DE METAIS

A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia de deposição 3D que propicia rapidamente a transformação de modelos digitais em estruturas (AL-MAMUN *et al.*, 2020). Existem diferentes formas de se classificar os processos MA. Para os metais o mais comum é separar de acordo com a fonte de energia, que pode ser o laser, feixe de elétrons ou arco elétrico (DEBROY *et al.*, 2018b).

A tecnologia MA é utilizada para diversas aplicações, na indústria aeroespacial, indústria automotiva, e até mesmo para fabricação de implantes dentários (DEBROY *et al.*, 2018b; MILEWSKI, 2017).

As pesquisas de MA estavam se concentrando principalmente nas técnicas que utilizam leito de pó (PBT), como a fusão por feixe de elétrons (EBM) e a fusão seletiva a laser (SLM) (RON *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2017). Contudo estas técnicas são consideradas relativamente caras, em razão do alto custo de aquisição do pó e ao seu procedimento de manuseio, e também devido ao alto consumo de energia do processo (RON *et al.*, 2019). Por este motivo a técnica MADA tem se destacado, por apresentar diversas vantagens do ponto de vista econômico e devido às limitações inerentes as técnicas PBT, como a baixa velocidade de digitalização da fonte de energia, baixa taxa de deposição, e restrição das dimensões do produto produzido. Outro fator que torna a técnica MADA uma alternativa bem atraente, é a possibilidade de fabricação de peças de tamanho médio-grande e com uma maior taxa de deposição (ARASAPPAN *et al.*, 2020; LEON; AGHION, 2017; RON *et al.*, 2019). Singh, Sharma e Rathod (2021) ao compararem todas as fontes de energia utilizadas pelas técnicas mais populares de MA relataram que a técnica MADA é que oferece maior taxa de deposição e fabricação econômica dos metais de adição, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre as fontes de energia utilizadas para fabricação de componentes metálicos

Características	Raio Laser	Feixe de elétron	Arco Elétrico
Fonte de energia	Fóton	Elétron	Íon metálico
Fonte de calor	Onda eletromagnética	Energia cinética	Arco elétrico

Densidade de potência	$10^6 - 10^7 \text{ W / cm}^2$	$10^7 - 10^8 \text{ W / cm}^2$	$10^2 - 10^6 \text{ W / cm}^2$
Eficiência	Fraca (2–5%)	Bom (15-20%)	Excelente (> 80%)
Vácuo	Não requerido	Obrigatório	Não requerido
Velocidade de deposição	2 g / min	10 g / min	50 - 130 g / min

Fonte: (SINGH, S.; SHARMA, S. Kumar; RATHOD, 2021).

A técnica MADA surgiu pela primeira vez em 1925. Desde esta época várias pesquisas e inovações foram direcionadas para esta nova técnica. Entretanto esta técnica ainda é pouco comercializada industrialmente em todo o mundo em todo o seu potencial (WU *et al.*, 2019b). Estudos tem sido realizados com o objetivo de demonstrar a importância atual do MADA e seu potencial para aplicação em indústrias aeroespacial, marítima, de petróleo e de turbinas a gás. As indústrias aeroespaciais já utilizam esta técnica para fabricação de componentes e estruturas aeronáuticos.

As fontes de energia utilizadas para a produção de peças pela MADA são as mesmas utilizadas para os processos de soldagem correspondentes. As três mais utilizadas relatadas na literatura são: Por Arco Plasma (PA - *Plasma Arc*), Ao Arco Elétrico com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (GTA - *Gas Tungsten Arc*) e ao Arco Elétrico com Proteção Gasosa (GMA - *Gas Metal Arc*).

2.2 PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO POR GMAW

O processo *Gas Metal Arc Welding* – GMAW (nomenclatura usada pela *American Welding Society*), também conhecido como MIG/MAG, é o processo de soldagem mais usado nas indústrias devido a sua versatilidade e suas vantagens específicas como taxa de deposição, baixo custo, operação simples e fácil automação (WANG; WU; GAO, 2016).

De acordo com Scotti e Ponomarev (2014), o processo de GMAW se baseia em uma fonte de energia que gera e estabelece um arco elétrico entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e o substrado. A proteção da região do arco onde ocorre a fusão é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (MIG – *Metal Inert Gas*), ou ativo ou ainda uma mistura entre eles (MAG – *Metal Active Gas*). O processo GMAW pode ser aplicado de duas maneiras: automática, quando o deslocamento da tocha que conduz o arco é realizado por meio de uma

máquina, ou semiautomática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo soldador (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

As principais vantagens do processo GMAW são a relativamente elevada taxa de fusão do arame-eletrodo, a possibilidade de variar o modo em que a transferência metálica ocorre, o que permite fazer a deposição em diferentes posições, e a portabilidade da tocha, de baixa massa e fácil de manusear. Entre as dificuldades é possível citar uma alta emissão de calor e luz, a relativa dificuldade de manuseio do equipamento (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

O modo de transferência metálica, ou seja, o modo como o metal fundido se transfere da ponta do eletrodo até a poça de fusão, é um dos pontos mais importantes no processo de soldagem por GMAW. Esse modo de transferência afeta diretamente vários fatores durante a deposição de metal, como a estabilidade do arco elétrico, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, a aplicabilidade do processo em algumas posições de deposição, além dos níveis de respingos gerados durante o processo (MODENESI, 2011).

2.2.1 Modos de transferência metálica

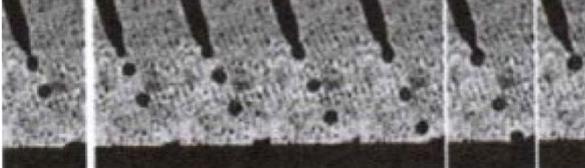
O modo de transferência nada mais é do que o comportamento característico da gota durante sua transferência da ponta do eletrodo até a poça de fusão. Os modos de transferência são divididos em dois grupos: por contato e por voo livre. No primeiro há o contato da gota com a poça de fusão antes dela se destacar. Já no segundo grupo, a gota destaca-se antes de entrar em contato com a poça de fusão (SCOTTI; PONOMAREV, 2014). Dentro desses grupos temos três principais modos de transferência:

- **Curto-Circuito:** Este modo de transferência se enquadra no primeiro grupo, por contato. Nele a ponta do eletrodo é formada por uma gota de metal líquido em crescimento, que atinge periodicamente a poça de fusão. Quando isso acontece ocasiona um curto-circuito elétrico e a extinção momentânea do arco. Esse modo de transferência geralmente ocorre em correntes e tensões de soldagens mais baixas. Sendo assim, o calor transferido a peça é reduzido, tornando esse modo de transferência aplicável para chapas finas e para soldagem fora da posição plana (SCOTTI; PONOMAREV, 2014);

- Globular: Este modo de transferência se enquadra no segundo grupo, por voo livre. Nesse modo a gota permanece no eletrodo à medida que vai crescendo. Quando ela se torna grande o suficiente, ela se destaca do arame-eletrodo antes de tocar a poça de fusão. A principal força responsável por esse destacamento é a força gravitacional. Este modo ocorre quando se utilizam tensões moderadas a altas e correntes baixas. As gotas se transferem de maneira irregular e em frequência muito baixa. Devido a força gravitacional ser a dominante neste tipo de transferência, a soldagem é aplicada apenas na posição plana. Estas desvantagens fazem com que este modo de transferência seja pouco desejado e aplicado na soldagem por GMAW, com raras exceções, como a soldagem de alumínio em chapas finas (SCOTTI; PONOMAREV, 2014);
- Goticular: Este modo de transferência também se enquadra no segundo grupo, por voo livre. Também é conhecida como spray. Nesse modo, pequenas gotas são transferidas de forma sequencial, em alta frequência. Este modo ocorre com altas correntes e tensões elevadas. Por isso esse modo não é aplicado a chapas finas e fora da posição plana. As principais aplicações são a união e o enchimento de chanfros em chapas mais espessas. Esse modo apresenta alta taxa de deposição, solda com bom aspecto superficial e não gera respingos. Uma condição crucial para a ocorrência desse modo de transferência é que a corrente de soldagem ultrapasse um valor denominado de corrente de transição. Até a corrente atingir o valor de transição, o tamanho das gotas se reduz lentamente e a frequência aumenta, também lentamente. Quando a corrente de transição é superada, o tempo de formação da gota diminui significativamente, ocasionando um aumento súbito na frequência de transferência das gotas. Isso ocorre pela mudança do fenômeno que governa o modo de transferência, onde a principal força deixa de ser a gravitacional e se torna a eletromagnética, o que impede que as gotas atinjam grandes dimensões (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Na Tabela 2 são apresentadas as forças governantes nos principais modos de transferências e ilustração da forma de deposição.

Tabela 2 - Principais modos de transferência metálica que ocorrem no processo GMAW

MODO DE TRANSFERÊNCIA	ILUSTRAÇÃO DA FORMA DE DEPOSIÇÃO	FORÇAS E FEITOS GOVERNANTES
Curto-Circuito		Tensão superficial e efeito <i>Pinch</i>
Globular		Gravitacional
Goticular (Spray)		Força eletromagnética

Fonte: Adaptado de SCOTTI e PONOMAREV, 2014

Desde sua criação o processo GMAW vem sofrendo várias inovações tecnológicas. São vários novos processos que visam um maior controle da transferência metálica. Entre essas inovações pode-se destacar os processos de GMAW pulsado, GMAW com corrente alternada e GMAW com curto-circuito controlado. No processo pulsado a corrente varia em dois níveis, a corrente de base e a corrente de pulso. A corrente de base tem como objetivo manter o arco aberto com baixa energia, enquanto a corrente de pulso tem como meta formar a gota na ponta do arame e atuar em seu destacamento. Esse processo tem como objetivo reunir as melhores características das transferências por curto-circuito e goticular em um só processo, ou seja, obter transferência estável e regular, com baixo nível de respingos, bom acabamento, a um valor de corrente baixa. Enquanto isso, os processos de curto-circuito controlado buscam características como estabilidade térmica e diminuição de respingos (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

2.2.2 Curto-circuito controlado – CCC

Para otimizar a transferência metálica pelo controle da forma de corrente, especialmente para o modo curto-circuito, inicialmente previsto em experimentos realizados por (ARAI *et al.*, 1983), pesquisas vêm sendo realizadas nas últimas décadas para aumentar a estabilidade do processo, a partir de métodos

computacionais (CADIOU *et al.*, 2020) e experimentais (CHEN *et al.*, 2019; DE MENESES; GOMES; SCOTTI, 2014; ERA; UEYAMA; HIRATA, 2009; REZENDE *et al.*, 2010a; TRUPPEL *et al.*, 2019; YUAN *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2023a). Vários fabricantes de equipamentos desenvolveram diferentes patentes, cada um com seu método de controle de transferência. Um desses métodos é o *Cold Metal Transfer* (CMT), da empresa Fronius. Nesse processo há um controle da forma da onda da corrente, da velocidade e do sentido de avanço do arame. O processo acaba sendo muito mais estável que GMAW convencional (DUTRA, 2013)

No mercado atual é possível encontrar diferentes processos que permitam estabelecer o mecanismo de transferência metálica por curto-circuito controlado. Estes processos permitem a adequação do formato de onda da corrente de deposição durante a aplicação, utilizando sistemas de controle eletrônicos e/ou mecânicos, como por exemplo, indutores em série, para realizar o monitoramento e controle durante o processo de transferência por curto-circuito, em resposta às oscilações impostas pelas condições associadas à aplicação (COSTA *et al.*, 2012; SELVI; VISHVAKSENAN; RAJASEKAR, 2018) .

Dentre estes modos controlados de curto-circuito, pode-se destacar o STT (*Surface Tension Transfer*), o CCC (*Controlled Short-Circuit*) e o CMT (*Cold Metal Transfer*). O modo CMT, tecnologia da Fronius, se enquadra de maneira híbrida às categorias dos últimos dois modos citados, de forma que o controle da transferência metálica é feito pela corrente e pela alimentação dinâmica de arame, reduzindo sensivelmente o aporte térmico da operação e sem a produção de respingos (TRUPPEL *et al.*, 2019). Já no modo CCC, desenvolvido pela empresa IMC® em colaboração com o grupo LABSOLDA, a transferência metálica acontece com o controle dinâmico do nível da corrente elétrica, com quedas de diminuição e pulsos de crescimento dos valores de corrente, em função do monitoramento da taxa de variação da resistência, determinada indiretamente pela medição da mudança da tensão por unidade de tempo, promovendo uma acomodação e destacamento suave do metal transferido para poça de fusão, diminuindo a tendência de formação de respingos. O que ganhou notoriedade para aplicações em soldagens de raiz.

A técnica de CCC, assim como os outros modos controlados de transferência de metal citados anteriormente, desperta um interesse crescente na MADA. Estes não diferem do processo GMAW apenas pelo tipo de método de desprendimento de gotas, resultando em um controle preciso da deposição de material e um baixo aporte

térmico, mas também porque oferecem alta estabilidade de arco e transferência de material sem respingos, resultando em peças de melhor qualidade (CADIOU *et al.*, 2020). Esse mecanismo permite resolver os problemas típicos da MADA para sua variedade de ligas metálicas, como porosidade, crescimento de grão e trincas a quente, a depender de sua sensibilidade ao aporte térmico, induzida por suas propriedades físico-químicas (ZHANG *et al.*, 2023a; ZHOU; LONG; MARK, 2007).

2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis são aços de alta liga, geralmente contendo cromo, níquel e molibdênio em sua composição química. Estes elementos de liga, em particular o cromo, conferem uma excelente resistência à corrosão quando comparados com os aços carbono convencionais. O cromo é um metal menos nobre nas séries eletroquímicas, ou seja, em princípio o cromo é menos resistente à corrosão que o ferro. Assim, uma liga de Fe e Cr deveria ser mais facilmente corroída ou oxidada do que o ferro puro, o que, de fato pode ocorrer em situações que a liga esteja ativa. Entretanto, em contato com o ar atmosférico ou outro meio oxidante, existe a tendência de se formar rapidamente uma camada de óxido de cromo na superfície destas ligas. Esta camada de óxido se torna uma barreira invisível, contínua, aderente, impermeável e praticamente insolúvel em numerosos reagentes. Nestas condições, a liga é considerada como passiva, pois o metal sob a camada de óxido está protegido contra o ataque de diversos meios corrosivos, particularmente aqueles oxidantes. Para que a película de óxido seja efetiva, o teor mínimo de cromo no aço deve estar entre 10 e 12%. Assim, deve-se tomar cuidado para não reduzir localmente o teor de cromo dos aços inoxidáveis durante o processamento (MODENESI, 2001).

Os aços inoxidáveis são classificados, segundo a sua microestrutura, em: Aços inoxidáveis martensíticos; Aços inoxidáveis ferríticos; Aços inoxidáveis austeníticos. Existem outras variantes destes grupos, como, por exemplo, os aços inoxidáveis duplex (que possuem 50% de ferrita e 50% de austenita) e os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação. As diversas microestruturas dos aços são função da quantidade dos elementos de liga presentes.

Os aços inoxidáveis auteníticos apresentam uma combinação favorável de propriedades, tais como resistência à corrosão e à oxidação, resistência mecânica a quente, trabalhabilidade e soldabilidade. Os aços inoxidáveis austeníticos formam o

maior grupo de aços inoxidáveis em uso, representando cerca de 65 a 70% do total produzido (MODENESI, 2001). Estas ligas possuem cromo e níquel para assegurar e estabilizar a estrutura austenítica na temperatura ambiente e abaixo dela. São classificados na série AISI 2XX, ligas estabilizadas ao manganês e/ou nitrogênio, ou AISI 3XX, ligas estabilizadas ao níquel (CHAWLA, 1995).

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e são paramagnéticos. Possuem teores de cromo entre 16 a 26% e de níquel de 7 a 22%. O níquel está presente nesses aços para austenitização, aumentando a sua resistência mecânica e acelerando a formação da camada protetora de óxido de cromo (GENTIL, 2007).

Encontram aplicação na indústria química, alimentícia, petroquímica e em diversas outras aplicações em que boa resistência a corrosão e facilidade de limpeza são necessárias. Apesar dos aços inoxidáveis austeníticos apresentarem boa soldabilidade em relação aos outros aços inoxidáveis, eles não estão totalmente isentos de problemas de origem metalúrgica durante a soldagem, como a sensitização e o trincamento a quente.

Entre os aços inoxidáveis austeníticos o 316 é um dos que tem maior número de aplicações na indústria metalmeccânica, ficando atrás apenas dos aços 304 e 304L. No entanto, apesar de ser também uma liga da série 18Cr-8Ni, o 316 se difere do 304 devido a adição de 2 a 3% de Mo que confere maior resistência à corrosão, principalmente por pites (JAVIDI; HAGHSHENAS; SHARIAT, 2020; TARASOV *et al.*, 2019).

O aço inoxidável austenítico é um dos materiais populares usados em MA (AL-MAMUN *et al.*, 2020; TARASOV *et al.*, 2019), por sua boa soldabilidade, alta resistência à corrosão, resistência mecânica e amplo uso em alimentos, tratamento médico, móveis, indústria, energia nuclear e outros campos (ABE; WATANABE, 2008; JAVIDI; HAGHSHENAS; SHARIAT, 2020; KUMAR; SINGH; SINGH UPPAL, 2022). Embora as tecnologias de sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering - SLS*) e fusão por feixe (*electron beam melting - EBM*) para fabricação de aço inoxidável austenítico estejam maduras e tenham boas propriedades mecânicas, elas apresentam alto custo e baixas taxas de deposição, o que não é adequado para a fabricação de componentes em larga escala. Comparado com SLS e EBM, o WAAM é mais adequado para a fabricação de peças em grande escala (BUCHANAN;

GARDNER, 2019) devido à sua elevada taxa de deposição (WONG; HERNANDEZ, 2012).

2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Devido aos excelentes resultados obtidos no desenvolvimento tecnológico e industrial, as ferramentas estatísticas são cada vez mais utilizadas para obter uma otimização dos processos industriais e, quando combinadas ao *Desing Of Experimental* (DOE), tornam-se ferramentas indispensáveis no estabelecimento do controle estatístico dos processos. O DOE representa um conjunto de testes estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, a fim de determinar a influência de várias variáveis nos resultados de um sistema ou processo (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

A Estatística que vem sendo cada vez mais utilizada em trabalhos científicos, substituindo a prática do empirismo, possui diversas técnicas que podem auxiliar obtenção e análise de resultados satisfatórios. A metodologia do planejamento experimental, associada à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo (GEORGE; HUNTER; HUNTER, 2005). Essa técnica busca, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo (MONTGOMERY, 2007).

Entre as várias vantagens da utilização do Planejamento Experimental no gerenciamento de uma pesquisa, podem ser citadas à redução do número de experimentos, diminuindo o tempo de preparo e economizando material, análise simultânea dos fatores, possibilitando determinar o efeito de cada fator de entrada sobre os fatores dependentes ou resposta, e a possibilidade de calcular e avaliar o erro experimental (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

Entretanto, para obter melhores resultados utilizando-se a técnica do Planejamento Experimental, é necessário entender seu funcionamento e selecionar um tipo de delineamento adequado para o trabalho, visto a existência de diferentes configurações, com o objetivo de reduzir ao máximo os custos, obtendo-se um resultado satisfatório e estatisticamente robusto.

Existem diferentes tipos de planejamentos fatoriais, cada um com características específicas. Entre os principais tipos de planejamento fatorial experimental, pode-se destacar:

- O Planejamento Fatorial 2^k : Este é o tipo mais simples de planejamento fatorial, onde k representa o número de fatores. Cada fator pode ter dois níveis (geralmente denominados 'baixo' e 'alto'), resultando em um experimento 2^k . Exemplo: Um experimento 2^2 avalia dois fatores, cada um com dois níveis, resultando em um total de quatro combinações.
- O Planejamento Fatorial 2^k pode ser com Réplicas: Ele inclui a inclusão de réplicas (repetições) de cada combinação dos níveis de fatores. Essas réplicas ajudam a reduzir a variabilidade e aumentar a confiabilidade dos resultados, tornando-o mais robusto.
- Planejamento Fatorial com Composto Central: Que além dos níveis baixo e alto dos fatores, ele inclui pontos no centro do espaço de design. Isso é usado para investigar tanto os efeitos principais quanto as interações entre os fatores, bem como para otimizar a resposta em relação aos fatores.
- O Planejamento Fatorial Completo: é um tipo de planejamento experimental que envolve a avaliação de todas as combinações possíveis de níveis de fatores. Isso permite a análise de todos os efeitos principais e interações entre os fatores. É usado quando se deseja obter informações detalhadas sobre como os fatores afetam a variável de resposta, mas pode ser dispendioso em termos de recursos e tempo, especialmente com um grande número de fatores. Os planejamentos fatoriais completos podem ser de: Primeira Ordem, em que apenas os níveis baixo e alto dos fatores são incluídos, permitindo a avaliação dos efeitos principais; E de Segunda Ordem que inclui pontos axiais, além dos níveis baixo e alto dos fatores, prever a necessidade da definição de níveis $-\alpha$, $+\alpha$ para obtenção de um modelo quadrático, caso o linear não apresente boa correlação. Isso permite a avaliação de interações de segunda ordem entre os fatores, além dos efeitos principais.

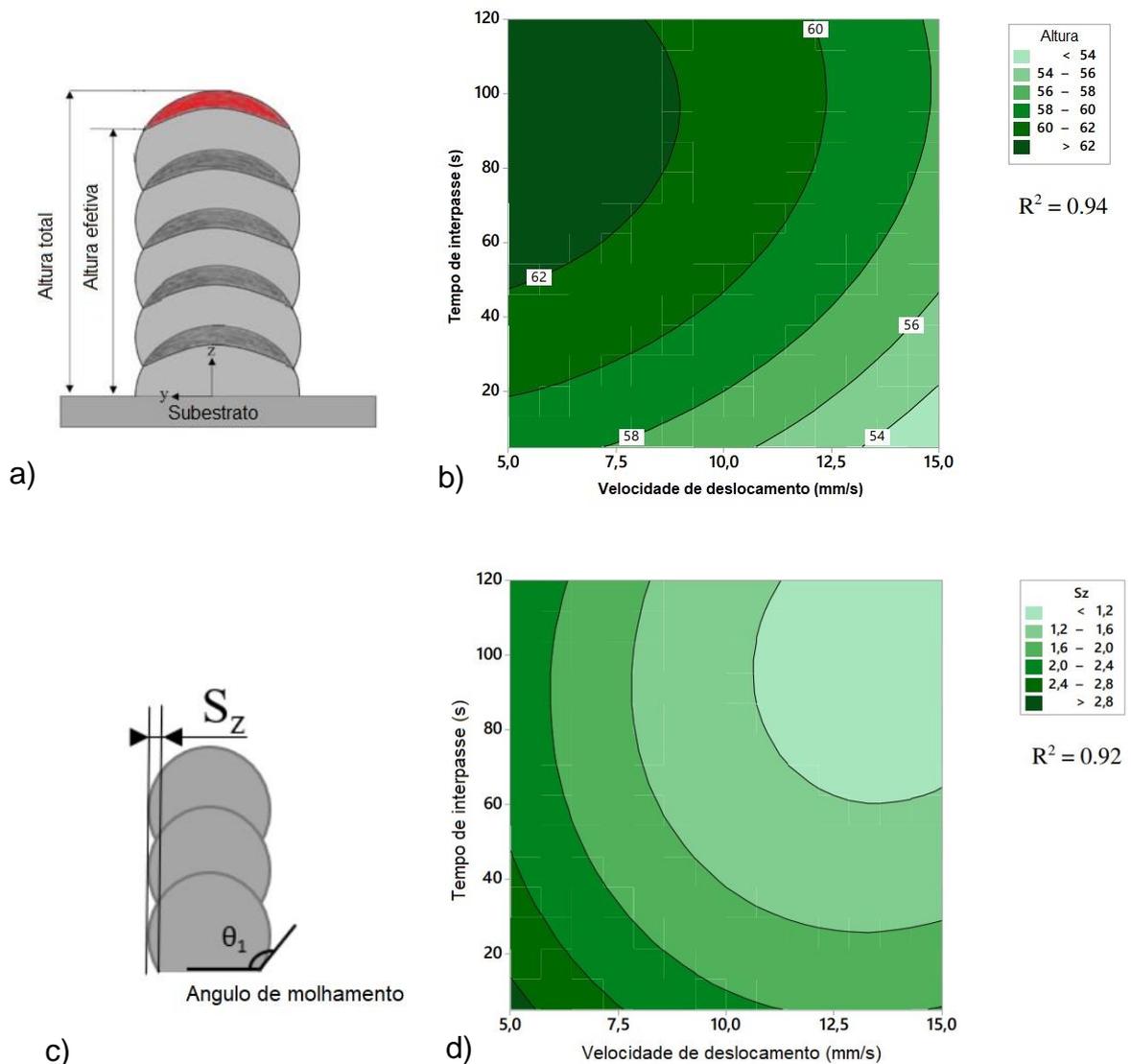
- O Planejamento Fatorial Fracionado é uma abordagem que envolve a seleção de um subconjunto das combinações possíveis de níveis de fatores em vez de testar todas as combinações. É usado quando um experimento completo é muito complexo ou dispendioso.
- O Plackett-Burman é um tipo específico de planejamento fatorial fracionário projetado para identificar os fatores mais influentes em um experimento. Ele é usado para fazer uma triagem inicial de um grande número de fatores, avaliando apenas os efeitos principais, mas não inclui interações de ordem superior.

Para efetuar tais análises estatísticas, gerar superfícies de resposta e obter cálculos de erros de forma quase automática, vários pesquisadores fazem do uso de softwares específicos, tais como o *Statistica*® e o *Minitab*®.

Pesquisadores da área de metalurgia, se utilizam do Delineamento Experimental, ou Planejamento Experimental, para conseguirem usar menor número de corpos de prova na obtenção de uma análise rápida e eficaz como os efeitos de parâmetros de processo nas propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas e depósitos metálicos (YOGANANDH *et al.*, 2013, DA SILVA *et al.*, 2016, MELO *et al.*, 2013, LOTFI & NOUROUZI, 2014). Em recentes estudos, alguns autores vêm utilizando essa técnica na MADA.

Belhadj *et al.*, (2022)., fizeram uso do DOE para otimizar parâmetros de processo e analisar dos efeitos dos fatores de entrada (parâmetros) sobre as características geométricas de pré-formas metálicas obtidas por MADA. Na Figura 1, é possível observar as curvas de interação e esquematização das respostas analisadas via DOE.

Figura 1 - Aplicação de DOE para compreensão dos efeitos dos fatores sobre pré-formas obtidas por MADA: a) esquematização da altura em pré-formas; b) Curvas de interação de fatores sobre a resposta de Altura total; c) esquematização do efeito escada (S_z) e d) Curvas de interação de fatores sobre S_z .



Fonte: Adaptado de BELHADJ *et al.*, (2022)

Neste estudo, o projeto de experimento permitiu investigar a influência dos parâmetros de velocidade de descolamento da tocha e tempo de interpassagem no MADA na qualidade da superfície e as dimensões de pré-formas, especificamente o efeito escada e altura total nas pré-formas. Ao analisar as curvas da Figura 1, infere-se que ao diminuir o tempo entre passes, a geometria apresenta uma característica não homogênea e ocorre um fenômeno de efeito escada, obtendo menos alturas de pré-forma. Aumentando a velocidade de deslocamento da tocha, o ângulo de molhamento e a quantidade de sobremetal para usinagem diminuem (BELHADJ *et al.*, 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

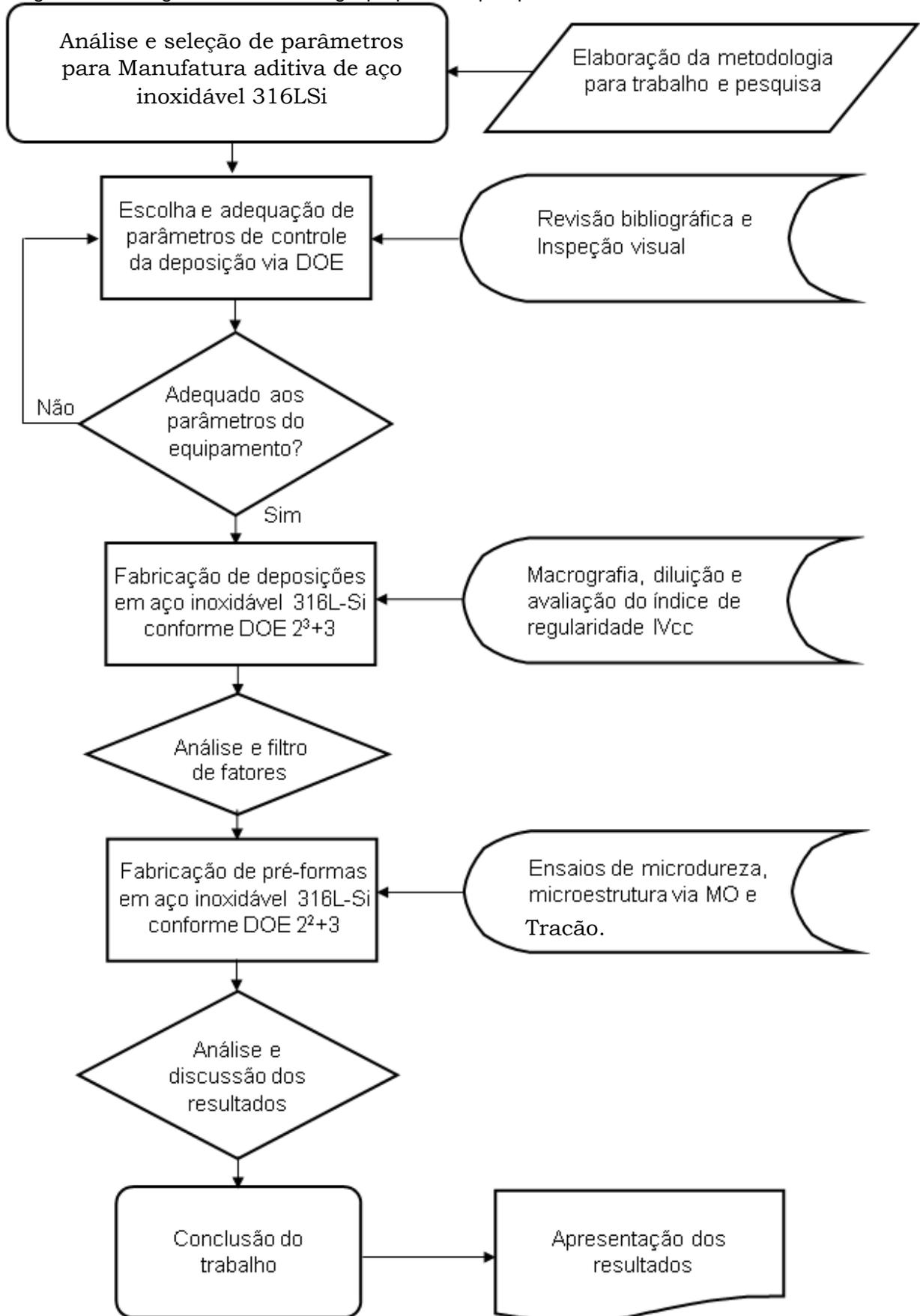
Neste capítulo, serão abordados os materiais utilizados na pesquisa, bem como a metodologia aplicada para alcançar os objetivos propostos. O capítulo divide-se em: Caracterização da pesquisa, onde será explanada a área de interesse do trabalho e fluxograma expondo à organização desta pesquisa; Execução dos depósitos ao arco, abordando o material do substrato, material de deposição e maquinário utilizado; Planejamento experimental, com os parâmetros e níveis utilizados no durante a deposição ao arco e manufatura aditiva, por fim, a Metodologia de ensaios empregados no presente estudo.

Os parâmetros de estudo foram determinados em função do seu nível de influência sobre as características microestruturais e propriedades mecânicas de pré-formas metálicas obtidas por manufatura aditiva, de acordo com revisão bibliográfica dos principais trabalhos na área utilizando-se a liga 316LSi, com níveis determinados em relação ao planejamento experimental e adequação do maquinário para deposição a arco.

Logo após a definição dos parâmetros e níveis de processo, assim como da possível técnica adequada de planejamento, foram conduzidas as deposições pelo processo GMAW, conforme DOE. Sendo confirmada posteriormente a significância da técnica estatística, com relação à verificação dos efeitos dos fatores independentes (parâmetros de processo), sobre os fatores dependentes (diluição, composição química, resistência corrosão, etc). Em seguida foram elaborados perfis de microdureza e realizadas análises microscópicas dos depósitos com intuito de fornecer meios para análise e justificativa dos resultados observados, e da influência dos parâmetros na produção de pré-formas de aço inoxidável 316L-Si.

O desenvolvimento deste trabalho se deu pela execução da metodologia exposta em fluxograma, observado na Figura 2. Servindo como apoio no entendimento, para interessados neste trabalho, do processo fabricação e análise das pré-formas manufaturadas por completo.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia proposta na pesquisa



Fonte: O Autor (2023).

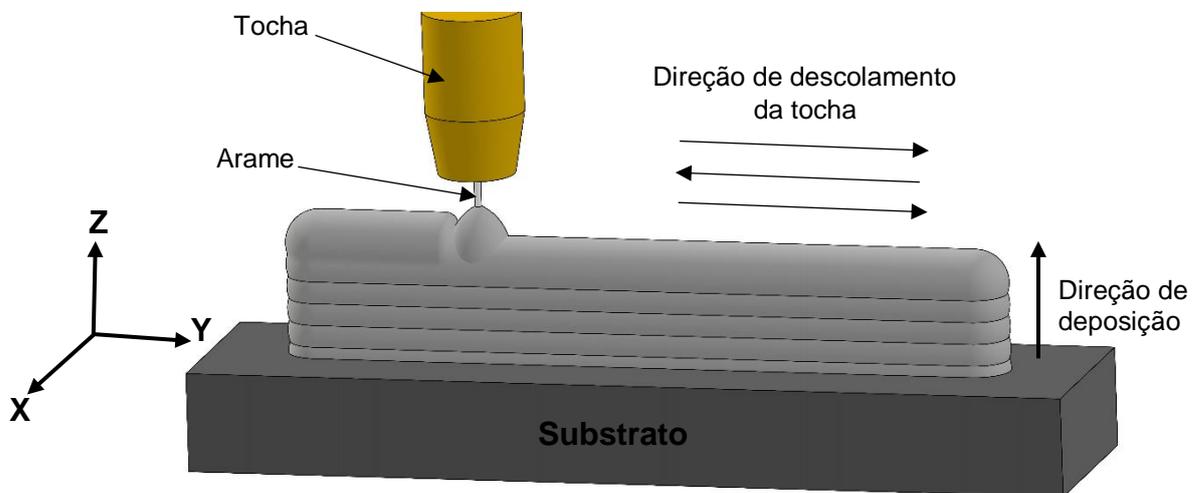
3.1 EXECUÇÃO DOS DEPÓSITOS AO ARCO

O processo utilizado para obtenção das pré-formas foi o GMA com corrente pulsada e com argônio comercialmente puro (99,98%Ar) como gás de proteção. O modo de transferência metálica foi por Curto Circuito Controlado (CCC).

Os depósitos foram executados variando-se a velocidade de deslocamento da tocha, a velocidade de alimentação do arame, e a vazão do gás de proteção, mantendo fixa a corrente de pico em 250 A e a corrente de base em 50 A, utilizou-se uma distância bico-contato peça (DBCP) de 12 mm, uma temperatura interpasse de $\pm 110^\circ\text{C}$, com trajetória de impressão em Zig Zag.

A Figura 3 apresenta uma esquematização de como foram elaborados os depósitos.

Figura 3 - Esquematização do processo de MA por GMAW



Fonte: O Autor (2023).

3.1.1 Material do substrato

Para a deposição das pré-formas foram utilizadas chapas de aço de baixo teor de carbono ABNT 1010 com diferentes espessuras como substrato. A variação das espessuras das chapas teve como objetivo avaliar a influência dessa variável sobre possíveis distorções durante a deposição ao arco elétrico, de acordo com o aporte térmico. As deposições isoladas foram realizadas sobre um substrato, com 3/16" (4,76 mm) de espessura. Já para as deposições múltiplas para a fabricação das pré-formas,

que necessitava de maior espessura de substrato, devido maior aporte térmico, foram realizadas em chapas de aço ABNT 1010 com dimensões de 18x40x160 mm.

3.1.2 Material de depósito

O material utilizado para a deposição foi o arame de aço inoxidável austenítico (AISI 316L-Si) com diâmetro nominal de $\varnothing 1,2$ mm. A Tabela 3 mostra a composição química nominal do arame, conforme previsto na norma AWS A5.9 e medida por fluorescência de raios-X (XRF).

Tabela 3 – Composição química nominal do metal de adição ER316LSi

	C%	Cr%	Ni%	Mo%	Mn%	Si%	Cr_{eq}/Ni_{eq}*	FN
AWS	0.03 Max.	18.0 - 20.0	11.0 - 14.0	2.0 - 3.0	1.0 - 2.5	0.65 - 1.0	Variado	5-8**
XRF	0.02	18.04	12.11	2.67	2.20	0.96	1.62	5

*Calculado com base no WRC 1992.

** Intervalo FN estimado fornecido pelo fabricante do fio de enchimento (ER316Si/316L Si®).

3.1.3 Máquina e fixação

A fonte eletrônica utilizada foi da IMC, modelo Digiplus A7, em conjunto com o alimentador de arame modelo IMC STA 20-D. Já o sistema de deslocamento da tocha, em dois eixos, foi utilizado o Tartílope V1, com deslocamento em Y e Z. Equipamentos localizados no Laboratório de Soldagem (LabSol), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Para a produção das pré-formas finais por MADA foi utilizado uma mesa CNC com três eixos de movimentação, adaptando com uma tocha automatizada e implementando sensoriamento e insolamento elétrico contra descargas indesejáveis, mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Fixação da chapa substrato na mesa de trabalho

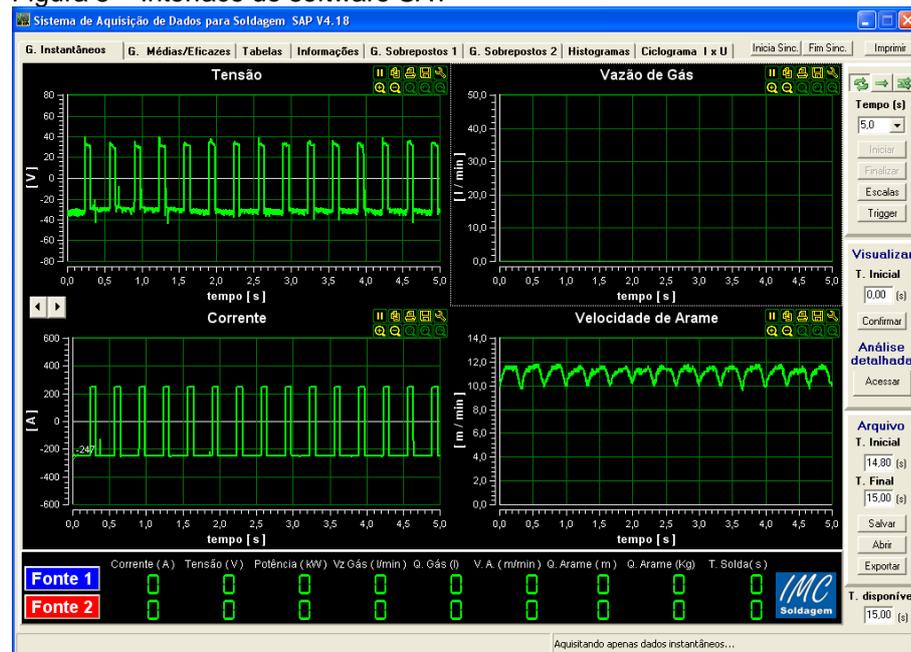


Fonte: O Autor (2023).

3.1.4 Aquisição de dados

A aquisição dos dados da variação dos sinais de tensão e corrente elétrica ao longo do tempo, durante as deposições, foi feita utilizando-se um aquisitor de dados modelo SAT da IMC Soldagem, acoplado junto à fonte de soldagem. A interface de software da SAT é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Interface do software SAT



Fonte: SAT, (2018)

Os valores de tensão e corrente foram armazenados em arquivos texto .txt, numa taxa de 5000 Hz. A avaliação da integridade das deposições foi realizada através da análise do aspecto superficial do cordão e dos oscilogramas de corrente e tensão obtidos pelo sistema de aquisição de dados, cujos dados alimentaram os cálculos do índice de regularidade do arco.

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi utilizado o planejamento do tipo fatorial completo com pontos centrais, composto com 3 fatores, 2 níveis e 3 pontos centrais, perfazendo 11 rodadas. Através da revisão bibliográfica, foram definidas as variáveis independentes para o estudo da MADA, conforme a Tabela 4, sendo elas: Velocidade de deslocamento da tocha (V_s), velocidade de alimentação do arame (V_a) e Vazão do gás de proteção (SGFR).

Os níveis e variáveis de controle selecionados para montagem do planejamento experimental, e conseqüentemente a confecção dos depósitos foram extraídos da atual literatura técnica de estudo da manufatura aditiva de ligas de aço inoxidável (CHEN *et al.*, 2021; RAMALHO *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2020b; WANG;

XUE; WANG, 2019; ZHONG *et al.*, 2021), em função e adequação aos valores suportados pelo maquinário disponível e modo de transferência metálica.

Tabela 4 – Variáveis e níveis extraídos da revisão bibliográfica

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Níveis		
			-1	0	+1
Vazão do gás de proteção	SGFR	L·min ⁻¹	16	18	20
Velocidade de deslocamento da tocha	V _s	mm·min ⁻¹	200	250	300
Velocidade alimentação do arame	V _a	m·min ⁻¹	4	5	6

Fonte: O Autor (2023).

3.2.1 Planejamento 2³ + 3 de depósitos

Para análise das deposições isoladas foi utilizado o planejamento do tipo fatorial completo com pontos centrais, composto com 3 fatores independentes, 2 níveis e 3 pontos centrais, perfazendo 11 rodadas, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz do planejamento fatorial 2³ + 3 com níveis reais e codificados para execução dos depósitos

Amostra	SGFR (L·min ⁻¹)	V _s (mm·min ⁻¹)	V _a (m·min ⁻¹)
1	16 (-1)	200 (-1)	4 (-1)
2	16 (-1)	200 (-1)	6 (+1)
3	16 (-1)	300 (+1)	4 (-1)
4	16 (-1)	300 (+1)	6 (+1)
5	20 (+1)	200 (-1)	4 (-1)
6	20 (+1)	200 (-1)	6 (+1)
7	20 (+1)	300 (+1)	4 (-1)
8	20 (+1)	300 (+1)	6 (+1)
9	18 (0)	250 (0)	5 (0)
10	18 (0)	250 (0)	5 (0)
11	18 (0)	250 (0)	5 (0)

Fonte: O Autor (2023).

Os fatores dependentes mensurados para o estudo da deposição foram: Características geométricas (reforço e largura), diluição, dureza e estabilidade do arco.

3.2.2 Planejamento $2^2 + 3$ de pré-formas

Para análise da MA das pré-formas, com cinco deposições, foi utilizado o planejamento do tipo fatorial completo com pontos centrais, composto com 2 fatores independentes, 2 níveis e 3 pontos centrais, perfazendo 7 rodadas, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz do planejamento fatorial $2^2 + 3$ com níveis reais e codificados para execução das pré-formas

Amostra	V_s (mm·min ⁻¹)	V_a (m·min ⁻¹)
1	200 (-1)	4 (-1)
2	200 (-1)	6 (+1)
3	300 (+1)	4 (-1)
4	300 (+1)	6 (+1)
5	250 (0)	5 (0)
6	250 (0)	5 (0)
7	250 (0)	5 (0)

Fonte: O Autor (2023).

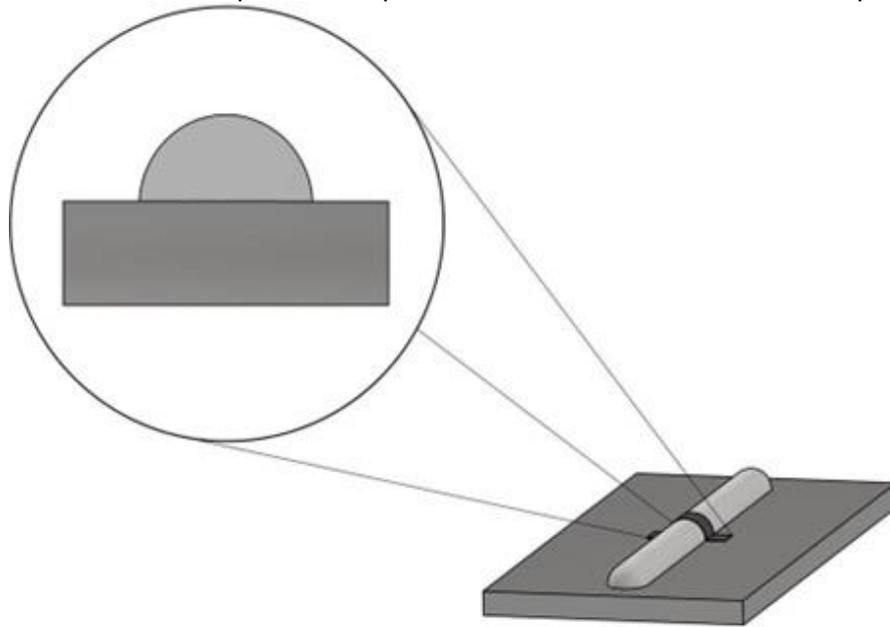
Os fatores dependentes mensurados para o estudo da deposição foram: características geométricas (altura e largura da pré-forma), microdureza e transferência metálica.

3.3 ANÁLISES E AVALIAÇÃO DOS DEPÓSITOS ISOLADOS

3.3.1 Macrografia

Para as análises metalográficas as amostras foram retiradas da seção transversal média dos depósitos, conforme apresentado na Figura 6. As amostras foram embutidas a quente em baquelite e, em seguida, lixadas em uma poltriz metalográfica, utilizando lixas d'água de granulometrias iguais a 100, 220, 320, 400 e 600. Após o lixamento, as amostras foram lavadas em água corrente, banhadas em álcool isopropílico, secadas com o auxílio de um secador e devidamente identificadas.

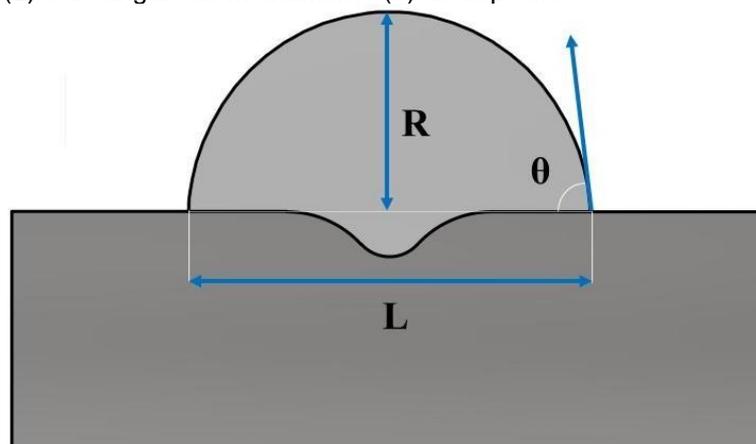
Figura 6 – Desenho esquemático representante da retirada das amostras a partir do depósito



Fonte: O Autor (2023).

Foram retiradas fotografias digitais, no microscópio modelo KET-300 da fabricante Kontrol, numa ampliação de 10x, do aspecto macroscópico dos depósitos, para que se pudessem avaliar as suas principais características em função da combinação dos diferentes parâmetros em seus níveis adotados. Através do tratamento dessas imagens, utilizando o software *Image J*, foi possível realizar as mensurações de reforço (R), largura (L), razão $R \cdot L^{-1}$ e ângulo de molhamento dos cordões (θ), conforme ilustrado na Figura 7.

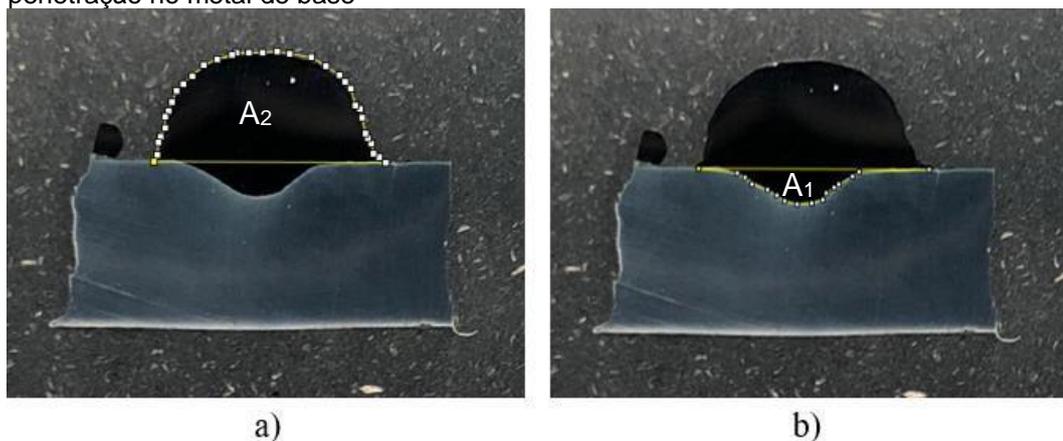
Figura 7 – Desenho esquemático da geometria do cordão de solda, quanto ao reforço (R), largura (L) e do ângulo de molhamento (θ) do depósito



Fonte: O Autor (2023).

Com a mesma ferramenta computacional, conseguiu-se estipular as áreas de reforço do Metal de Depósito (MD) e a penetração no substrato, de cada depósito. Neste caso, ao invés de aproximar ambas as áreas com um formato elíptico, utilizou-se seleções manualmente pontuais, conforme demonstrado na Figura 8, que melhor descrevem a geometria do depósito de solda (Filho et. al, 2009). Ademais, as amostras foram atacadas com Nital 3% por 50 s para melhor evidenciar a zona de ligação entre o metal depositado e o substrato.

Figura 8 – Pontos definidos manualmente para identificar as áreas de a) reforço do MD e de b) penetração no metal de base



Fonte: O Autor (2023).

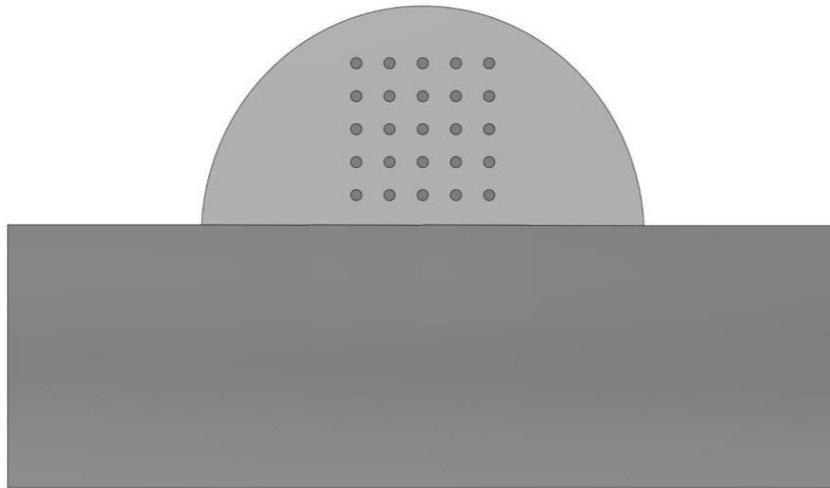
O cálculo da diluição para os depósitos isolados foi realizado conforme ilustra a Figura 8 e utilizando a Equação 1.

$$D(\%) = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times 100 \quad (1)$$

3.3.2 Ensaio de microdureza vickers

O ensaio de microdureza dos depósitos foram realizados em um microdurômetro digital, modelo Future-Tech FM-700, da marca MICROHARDNESS TESTER, utilizado-se uma carga de 300 gf durante um tempo de 15 s; o espaçamento entre as indentações foi de 0,5 mm e dispostas conforme uma matriz 5x5, como indica a Figura 9.

Figura 9 – Desenho esquemático da matriz 5x5 de pontos indentados para microdureza Vickers



Fonte: O Autor (2023).

3.3.3 Determinação do Índice de regularidade

Na soldagem por curto circuito, uma das formas de mensurar a estabilidade de um arco elétrico é por meio da análise dos sinais de aquisição, tais como corrente e tensão elétrica ao longo do tempo de transferência metálica. Nesse sentido, este estudo utilizou-se do “Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito (IV_{CC})” como critério para quantificar a estabilidade de transferência por curto-circuito controlado no processo de manufatura aditiva baseado em GMAW.

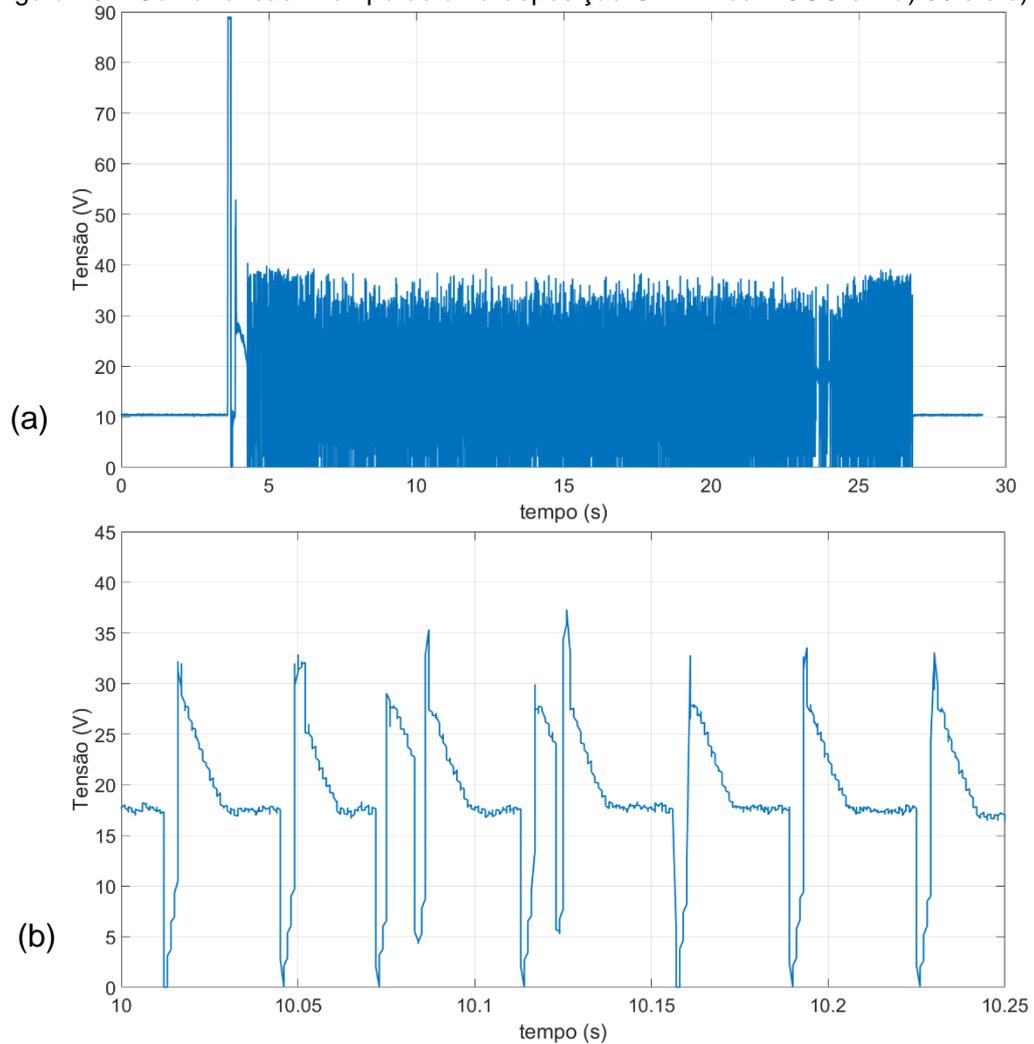
Este critério se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e com arco aberto (REZENDE *et al.*, 2010). Ele é determinado através dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito (t_{cc}) e de arco aberto (t_{ab}), como mostra a Equação 2.

$$IV_{CC} = \frac{\sigma_{t_{cc}}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}} \quad (2)$$

Onde: $\sigma_{t_{cc}}$ = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; $\sigma_{t_{ab}}$ = desvio padrão da média do tempo de arco aberto, t_{cc} = média do tempo de curto-circuito; t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

Para quantificação do IV_{cc} , utilizou-se um programa dedicado desenvolvido no MATLAB, pelo qual se calcula numericamente os valores e respectivos desvios padrões da Equação 2. Para utilizá-lo, deve-se inserir os dados referentes aos sinais adquiridos durante a deposição metálica, como os níveis de tensão, visualizados na Figura 10.

Figura 10 – Curva tensão x tempo de uma deposição GMAW com CCC em a) 30 s e b) 0,25 s



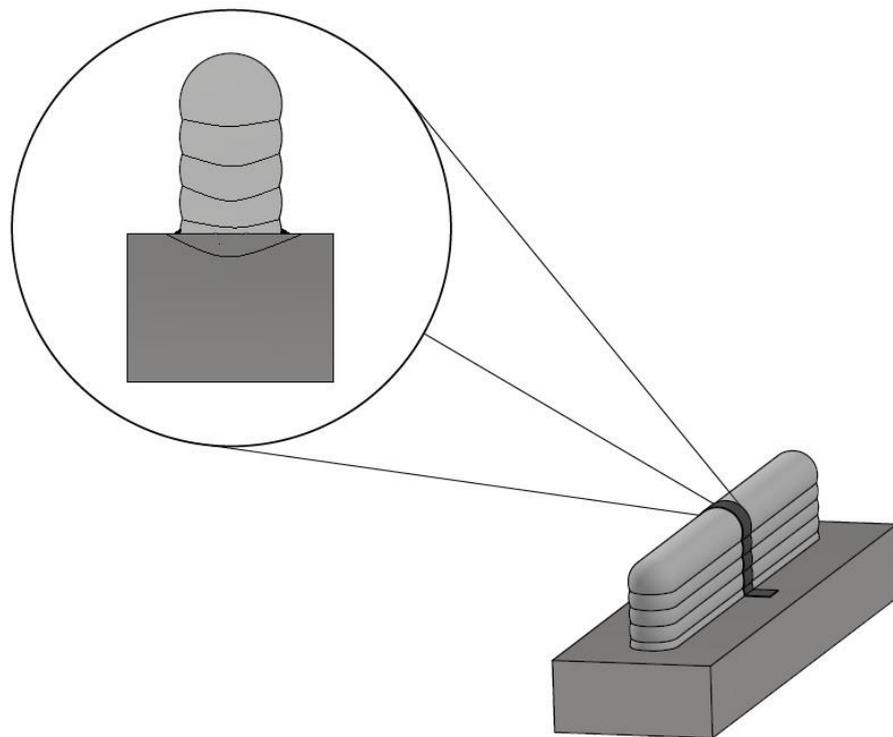
Fonte: O Autor (2023).

Destaca-se que cada tempo foi calculado com os valores tomados no trecho efetivo de deposição. Então, a partir da Figura 10, por exemplo, o intervalo de tempo tomado para a análise do IV_{cc} foi de 5,5 a 28 s, para que os trechos de início e fim do depósito, que contêm muitas irregularidades de arco elétrico, não influenciassem os resultados.

3.4 AVALIAÇÃO DAS PRÉ-FORMAS

A preparação foi realizada em amostras retiradas da seção transversal média das deposições, esquematicamente visualizada na Figura 11. Realizado o corte, as amostras foram embutidas a frio em resina acrílica e, em seguida, lixadas em uma poltriz metalográfica, utilizando lixas d'água de granulometrias iguais a 100, 220, 320, 400 e 600. Após o lixamento, as amostras foram limpas com álcool etílico e algodão embebido em água, a fim de retirar qualquer impureza decorrente do lixamento.

Figura 11 – Desenho esquemático representante da retirada das amostras a partir de pré-forma

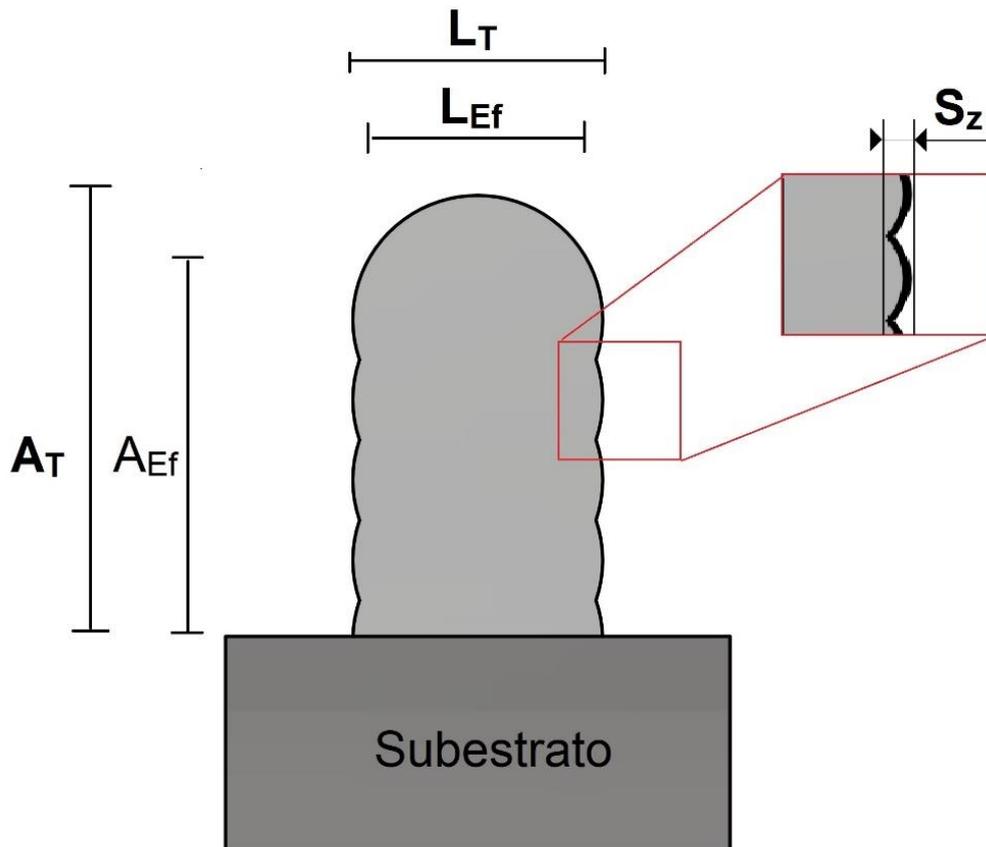


Fonte: O Autor (2023).

3.4.1 Análise geométrica

A Figura 12 apresenta a esquematização medida das variáveis respostas relacionadas às características geométricas das pré-formas metálicas obtidas por MADA, tais como: Altura total (A_T), Altura eficaz (A_{Ef}), Largura total (L_T), Largura eficaz (L_{Ef}) e rugosidade/rejeito (S_z).

Figura 12 - Esquemática das características geométricas em pré-formas obtidas por MADA



Fonte: O Autor (2023).

3.4.2 Análise microestrutural

A análise microestrutural foi realizada via Microscopia Ótica (MO) utilizando um microscópio modelo BX-51 da Olympus. A preparação da amostra seguiu, primeiramente, os procedimentos padrões de metalografia, ou seja, as amostras foram cortadas, embutidas a frio em resina acrílica e então, lixadas nas politrizes mecânicas com as lixas de granulometria 220, 400, 600, 800, 1200 e 2200 sequencialmente, sempre utilizando álcool etílico absoluto para a lubrificação, até que as superfícies estivessem livres de riscos, fato que foi constatado com a visualização em microscópio ótico a cada sequência de polimento com pasta de diamante de granulometria de 1 μm e o acabamento final foi feito com sílica coloidal 0,4 μm .

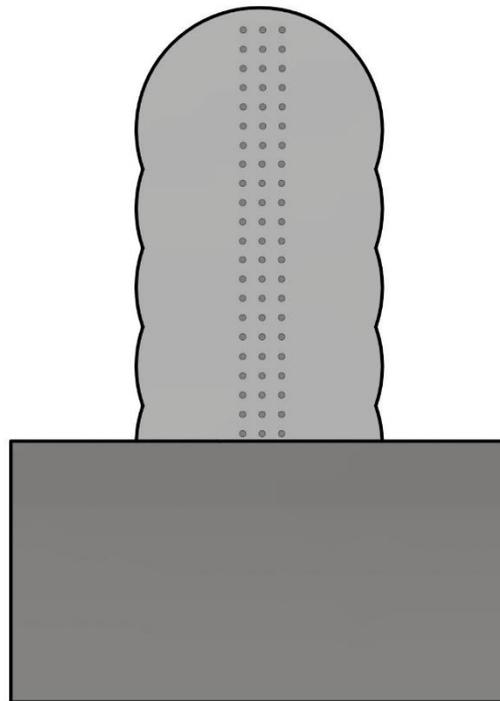
As amostras polidas foram limpas com álcool etílico e algodão embebido em água, a fim de retirar qualquer impureza decorrente do polimento.

O ataque eletrolítico das amostras foi realizado utilizando-se uma solução ácida composta de ácido oxálico + água destilada ($C_2H_2O_4 + H_2O - 1:10$), expostas ao ataque durante 50 segundos sob uma tensão de 2 V, limpas em água corrente e seco em secador de bancada.

3.4.3 Ensaio de microdureza vickers

O ensaio de microdureza foi realizado em um microdurômetro digital, modelo Future-Tech FM-700, da marca MICROHARDNESS TESTER. As medições foram realizadas na seção transversal do corpo de prova, com a média de três séries de indentações, separadas por uma distância lateral de 0,5 mm. O sentido das indentações foi do último cordão depositado até o substrato, como representado na Figura 13. Para tanto, foi utilizada uma carga de 200 gramasforça (gf), por 15 segundos, com espaçamento entre as impressões de 0,5 mm, para três séries de indentações.

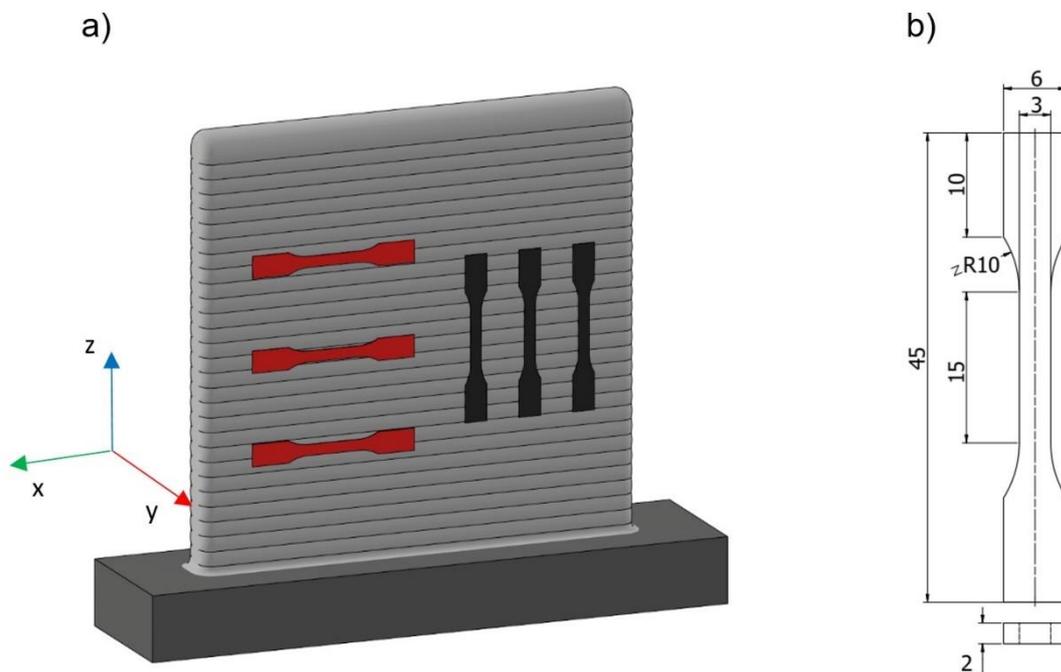
Figura 13 – Ilustração da posição das três séries de indentações, distâncias entre indentações de 0,5 mm e distância lateral de 0,5 mm entre as séries.



Fonte: O Autor (2023).

Para a produção da pré-forma final, foi usado um substrato com 10 mm de espessura, para evitar distorções geométricas durante a deposição de metal. Já a temperatura interpassa foi mantida em torno de 110 °C durante a deposição do total de 30 camadas, com a trajetória de deposição em Zig Zag. Para determinar a resistência à tração da pré-forma, foi utilizada uma máquina de ensaios universal Instron, modelo 5582. As dimensões dos corpos de prova e os procedimentos para ensaios de tração foram de acordo com ASTM E8M (ASTM, 2010), com uma taxa de deslocamento de 1 mm·min⁻¹ até a falha. Já para a análise de fratura por tração das amostras horizontais (*amostras 0°*) e verticais (*amostras 90°*) foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A posição de retirada e dimensões dos corpos de prova de tração estão apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Representação esquemática da a) posição de retirada dos corpos de prova e b) dimensões do corpo de prova de tração



Fonte: O Autor (2023).

3.5 TESTE E FABRICAÇÃO DE PEÇAS

Para a validação e teste de funcionalidade dos parâmetros selecionados neste trabalho, foram produzidas duas peças de diferentes geometrias por MADA. Em razão das excelentes características e propriedades do aço ER316LSi, como alta resistência

a corrosão e boa resistência mecânica, foram propostas peças que possuam aplicações plausíveis para a indústria de Petróleo & Gás.

Maiores detalhes dos resultados da fabricação das peças são apresentados no 'Apêndice A – Teste e construção de redução concêntrica' e 'Apêndice B – Teste e construção de flange'.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE MACROESTRUTURAL DOS DEPÓSITOS

Inicialmente, foi realizada a inspeção visual das onze deposições com os diferentes parâmetros a fim de verificar a presença de defeitos superficiais, uma vez que estes podem influenciar nos resultados de ensaios posteriores. A Figura 15 representa o panorama geral de todas as deposições, no qual se observa a vista superior das deposições..

Figura 15 – Aspecto superficial das deposições obtidas por GMAW-CCC.



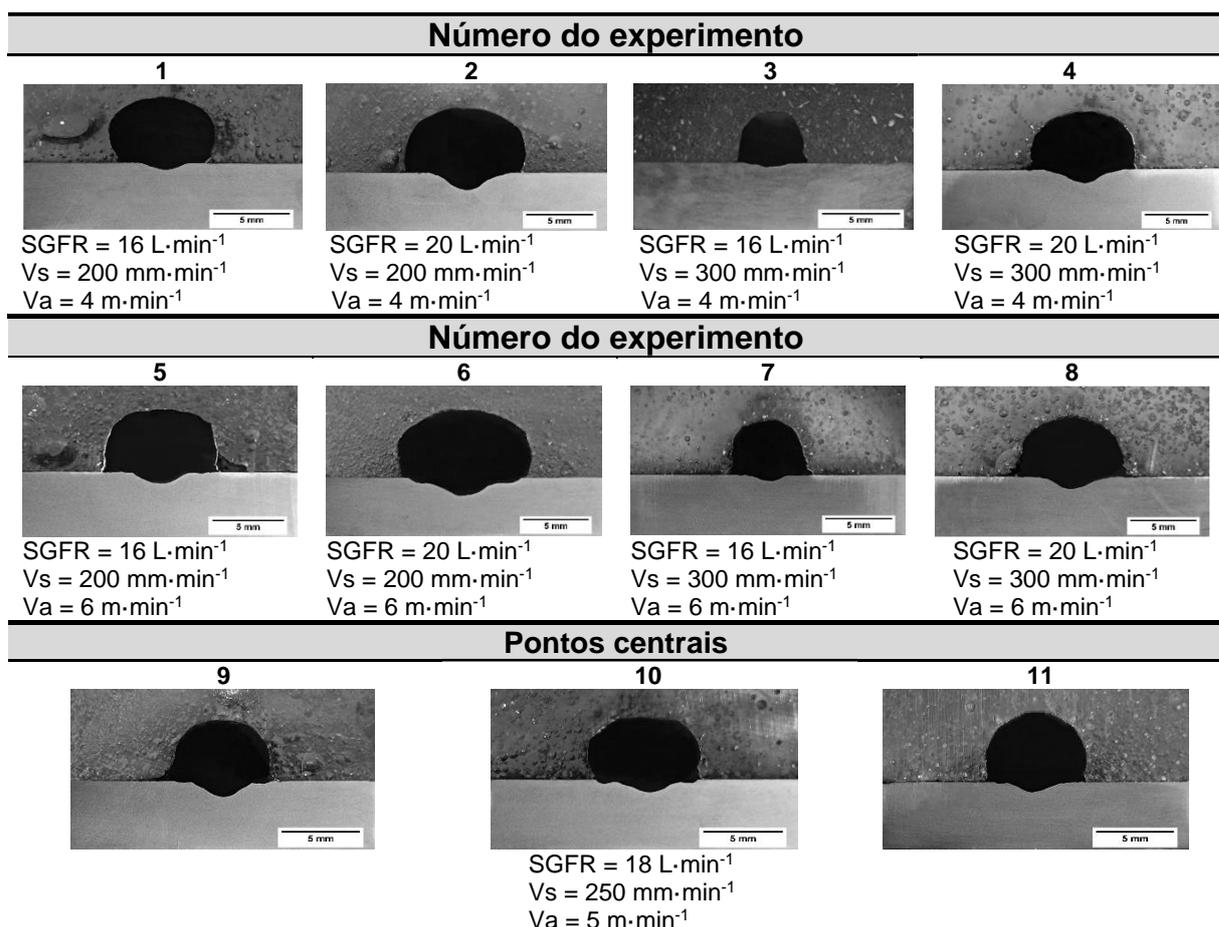
Fonte: O Autor (2023).

Pela inspeção visual, verifica-se uma boa qualidade e aparência visual dos depósitos, sem ocorrência de distorções da chapa do substrato, ausência de defeitos superficiais como porosidades, furos, mordeduras, rechupe, falta de penetração e trincas. Quanto à produção de respingos, pode-se observar pela Figura 15, através da avaliação dos 11 depósitos pode-se verificar também que não houve de salpicos, fato que comprova a hipótese de que o controle de corrente aplicado ao processo

de soldagem GMAW com Curto-Circuito conduz à redução ou até mesmo à eliminação dos respingos (FOGLIATTO, 2013).

A Figura 16 mostra as seções transversais dos cordões depositados para os diferentes níveis de SGFR, V_s e V_a . Preliminarmente, já é possível observar diferenças notáveis para as respostas de L, R e D dos depósitos, que foram categoricamente avaliadas, bem como as demais respostas de interesse, pelo pós-processamento das macrografias.

Figura 16 - Macrografia dos cordões depositados



Fonte O: Autor (2023)

A partir da análise das macrografias e do resultado da avaliação dimensional das características geométricas dos depósitos, foi realizado o tratamento dos dados através de algumas técnicas estatísticas. A Tabela 7 mostra o planejamento experimental fatorial completo de segunda ordem com os três parâmetros de processo controláveis e os valores obtidos para as quatro características geométricas dos depósitos de acordo com as medições realizadas após os experimentos.

Tabela 7 – Matriz do planejamento fatorial com níveis reais para os parâmetros geométricos dos depósitos

Exp.	FATORES INDEPENDENTES			VARIÁVEIS RESPOSTA							
	SGFR (L·min ⁻¹)	V _s (mm·min ⁻¹)	V _a (m·min ⁻¹)	V _M (V)	I _M (A)	H _i (kJ·min ⁻¹)	R (mm)	L (mm)	R·L ⁻¹	θ (°)	D (%)
1	16 (-1)	200 (-1)	4 (-1)	20,9	107	503,17	4,41	5,58	0,79	128,60	2,78
2	16 (-1)	200 (-1)	6 (+1)	21,3	150	718,87	5,52	9,14	0,60	94,74	8,24
3	16 (-1)	300 (+1)	4 (-1)	18,2	103	281,19	3,60	5,59	0,64	108,24	4,15
4	16 (-1)	300 (+1)	6 (+1)	20,6	147	454,23	4,42	8,21	0,54	101,84	9,61
5	20 (+1)	200 (-1)	4 (-1)	20,3	105	479,59	4,20	7,58	0,55	99,19	7,66
6	20 (+1)	200 (-1)	6 (+1)	22,1	161	800,57	5,31	9,24	0,57	99,04	11,31
7	20 (+1)	300 (+1)	4 (-1)	18,6	104	290,16	3,93	6,22	0,63	99,03	3,99
8	20 (+1)	300 (+1)	6 (+1)	20,7	148	459,54	4,28	7,72	0,55	102,84	7,99
9	18 (0)	250 (0)	5 (0)	20,3	124	453,10	4,56	6,87	0,62	106,74	7,42
10	18 (0)	250 (0)	5 (0)	19,7	122	432,61	4,35	8,07	0,57	105,00	7,83
11	18 (0)	250 (0)	5 (0)	21	125	472,50	4,31	7,97	0,55	103,93	7,93

Fonte: O Autor (2023).

A partir da Figura 16 e dos resultados apresentados na Tabela 7, observa-se que os depósitos apresentaram diferentes características dimensionais, podendo estas serem explicadas pela diferença de aporte de calor característico de cada amostra, que é resultado da combinação dos parâmetros de processo selecionados, obtendo depósitos com diferentes valores de reforço, largura, ângulo de molhamento e diluição. Sendo a priori, os valores de reforço e largura os de maior interesse para manufatura aditiva de metais.

4.1.1 Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial

Com base nos resultados da Tabela 8, realizou-se uma análise estatística de variância, calculando o nível de significância “*p*” dos parâmetros de controle sobre os aspectos geométricos de Reforço e Largura, inicialmente. Os níveis de significância menores que 0,1 indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 90% em se admitir que esse fator de controle esteja influenciando as variáveis de resposta analisadas. Os valores em vermelho no Quadro representam os fatores estatisticamente significativos. Os fatores SGFR*V_s, SGFR*V_a, e V_s*V_a representam interações entre estes parâmetros de processo.

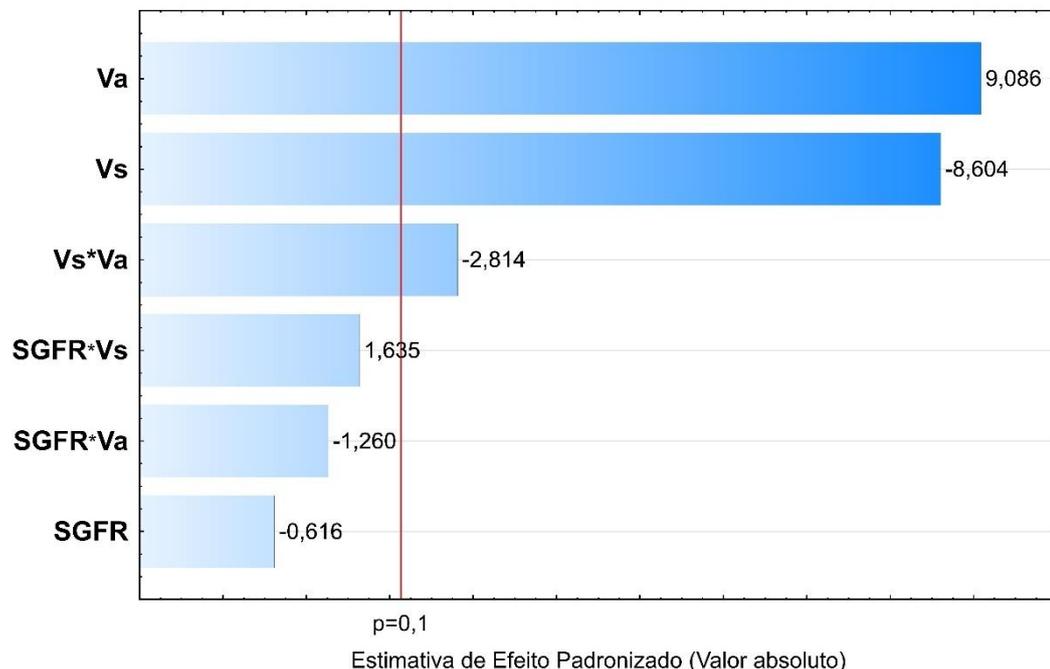
Tabela 8 – Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis resposta do aspecto geométrico e diluição

Fatores de Controle	Valores de p		
	R (mm)	L (mm)	D (%)
SGFR ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	0,570937	0,201281	0,021630
V_s ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,001003	0,060569	0,065408
V_a ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,000813	0,003114	0,000387
SGFR* V_s	0,177389	0,252246	0,004485
SGFR* V_a	0,276250	0,108477	0,124613
$V_s \cdot V_a$	0,048104	0,494820	0,845778
R^2	97,69	93,36	97,802
$R^2_{ajustado}$	94,23	83,96	94,504
MS Erro Puro	0,0180333	0,44333	0,07303

Fonte: O Autor (2023).

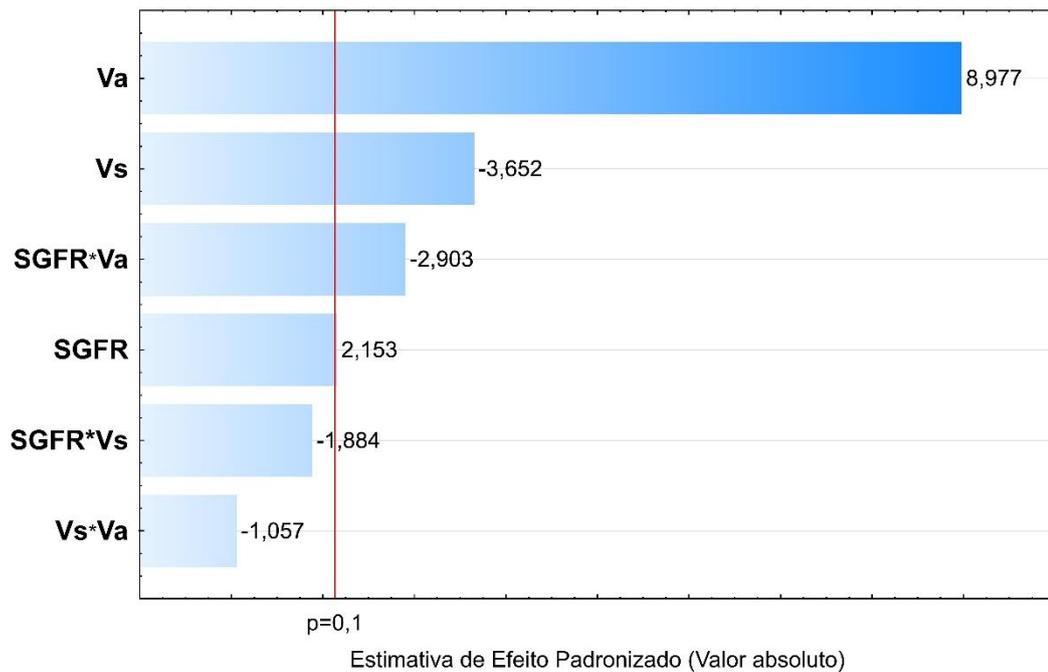
No Diagrama de Pareto, presente nas Figuras 17 e 18, é possível visualizar que os parâmetros que mais influenciam as variáveis dependentes R e L são, respectivamente a velocidade deslocamento da tocha (V_s) e de alimentação do arame (V_a), e velocidade de alimentação do arame para as outras duas variáveis. Já a D, Figura 19, é afetada também pela vazão do gás de proteção (SGFR) e a interação entre a vazão do gás de proteção e a velocidade de impressão ($SGFR * V_s$) de forma significativa.

Figura 17 – Diagramas de Pareto de efeitos associados ao aspecto geométrico de Reforço
DV: R (mm)



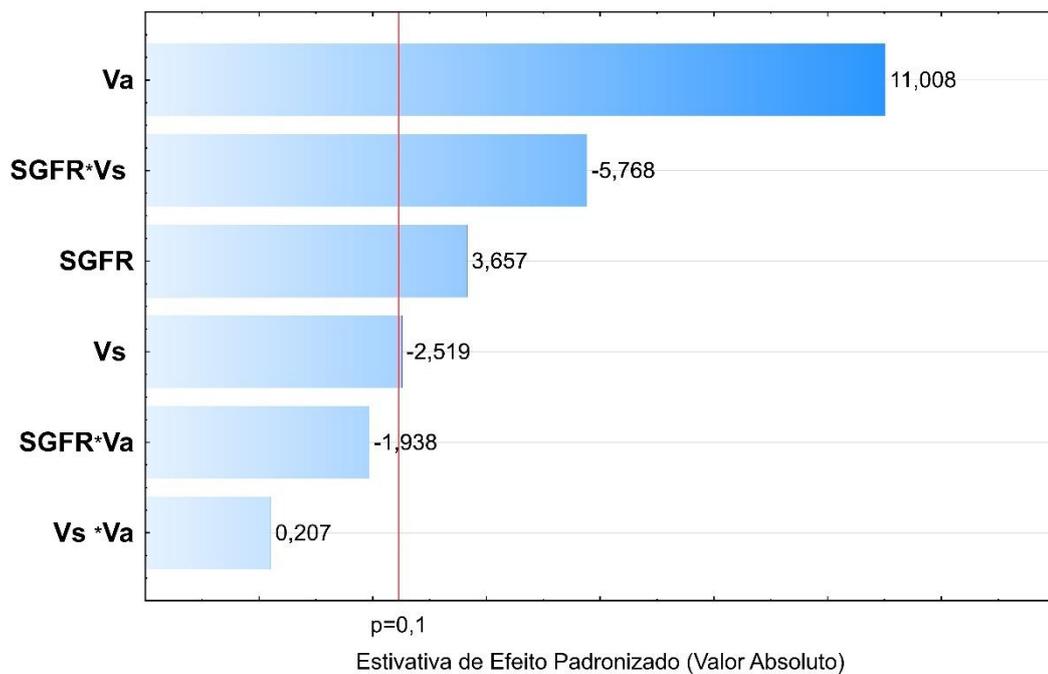
Fonte: O Autor (2023).

Figura 18 – Diagramas de Pareto de efeitos associados ao aspecto geométrico de Largura.
DV: **L (mm)**



Fonte: O Autor (2023).

Figura 19 – Diagramas de Pareto de efeitos associados ao aspecto geométrico de Diluição
DV: **D (%)**



Fonte: O Autor (2023).

As equações 4, 5 e 6 representam os modelos ajustados de regressão, com seus respectivos parâmetros estatísticos para R, L e D, para as quais foram levados em consideração todos os efeitos estatisticamente significativos, em função dos níveis

+1 e -1, de acordo com a descrição e implementação de COMPARINI *et al.* (2009).

$$R = 4,444 - (0,40125 * Vs) + (0,42375 * Va) \quad (4)$$

$$L = 7,4718 - (0,475 * Vs) + (1,1675 * Va) \quad (5)$$

$$D = 7,1736 + (0,7712 * SGFR) - (0,5312 * Vs) + (2,3212 * Va) - (1,21625 * SGFR * Vs) \quad (6)$$

As Tabelas 9, 10 e 11, apresentam os resultados da análise de variância para, respectivamente, R, L e D, mostrando que o modelo é estatisticamente significativo e preditivo com o valor de $F_{CALCULADO}$, pois $4 * F_{CALCULADO(R)} > F_{TABELADO(R)}$, e bem ajustado já que $F_{CALCULADO(F.A)} < F_{TABELADO(F.A)}$.

Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta R

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	2,9431	3	0,98103	98,695
RESÍDUOS	0,0696	7	0,00994	1
FALTA DE AJUSTE	0,0335	5	0,0067	0,674
ERRO PURO	0,0180	2	0,009	0,905
TOTAL	3,0127	10	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res);90\%} = 3,07$;

& $F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res);90\%} = 2,88$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta L

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	15,1082	2	7,5541	56,206
RESÍDUOS	1,0748	8	0,1344	1
FALTA DE AJUSTE	0,18815	6	0,03135	0,233
ERRO PURO	0,44333	2	0,22167	1,649
TOTAL	16,18296	10	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res);90\%} = 3,11$;

& $F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res);90\%} = 2,67$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) para a resposta D

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	63,3081	4	15,827	66,7243
RESÍDUOS	1,42298	6	0,2372	1
FALTA DE AJUSTE	1,27691	4	0,3192	1,3457
ERRO PURO	0,07303	2	0,0365	0,1539
TOTAL	64,73105	10	-	-

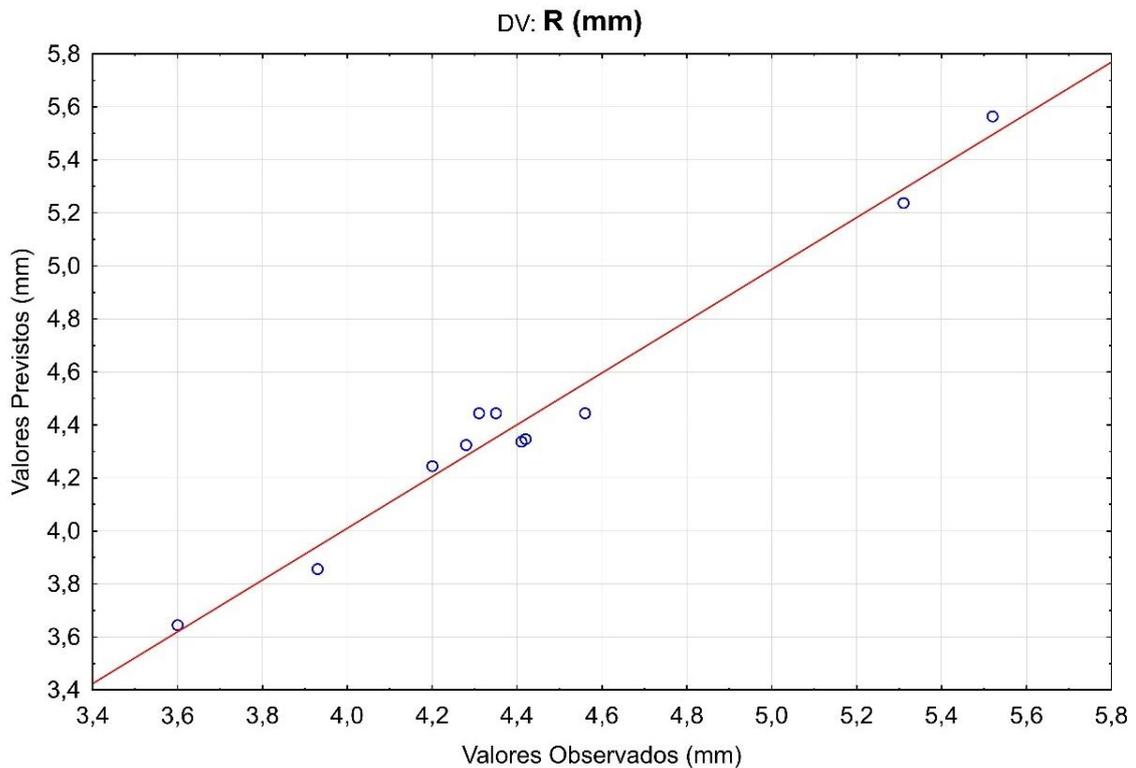
$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res); 90\%} = 3,18;$

& $F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res); 90\%} = 3,18$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

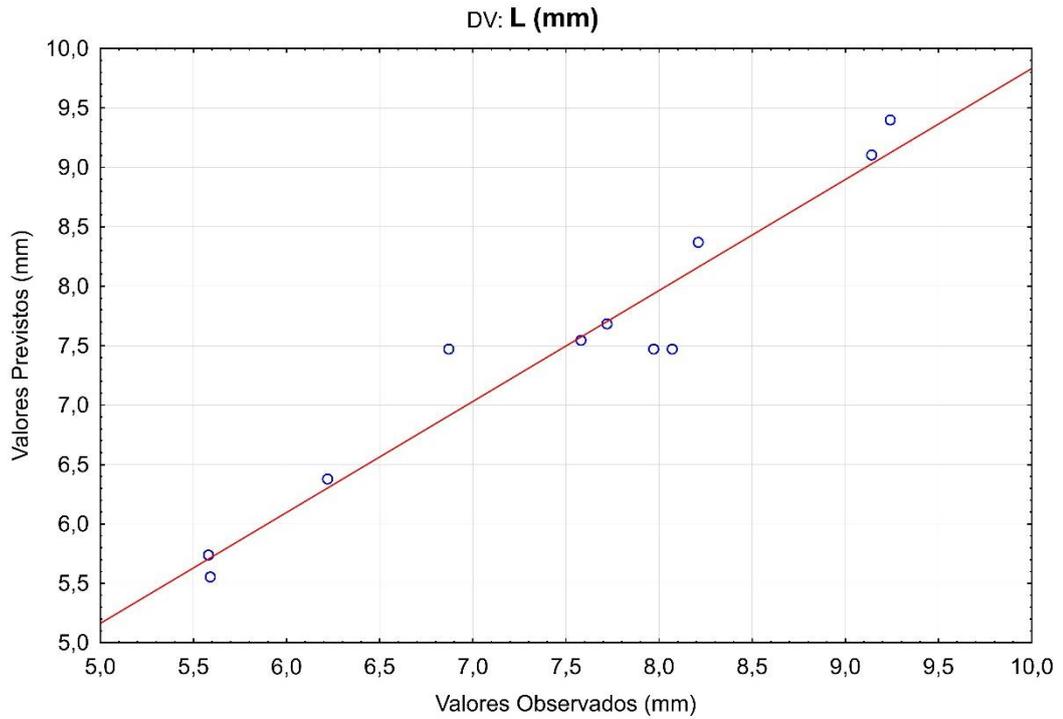
Dessa forma, pode-se afirmar que os modelos para determinação das respostas R, L e D são preditivos e bem ajustados, considerando 90% de confiabilidade, em detrimento dos valores de $F_{CALCULADO}$. Nas Figuras 20, 21 e 22 abaixo, tem-se os valores observados experimentalmente versus os valores previstos pelos modelos associados as respostas do aspecto geométrico dos cordões.

Figura 20 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados ao Reforço dos depósitos



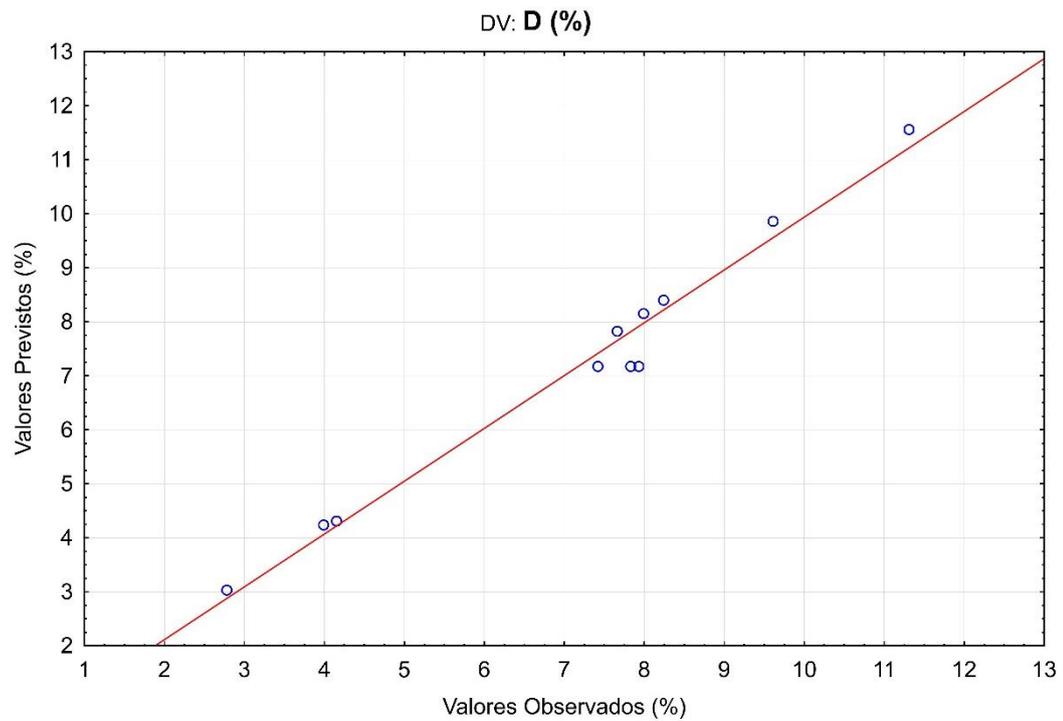
Fonte: O Autor (2023).

Figura 21 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados a Largura dos depósitos



Fonte: O Autor (2023).

Figura 22 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados a Largura dos depósitos



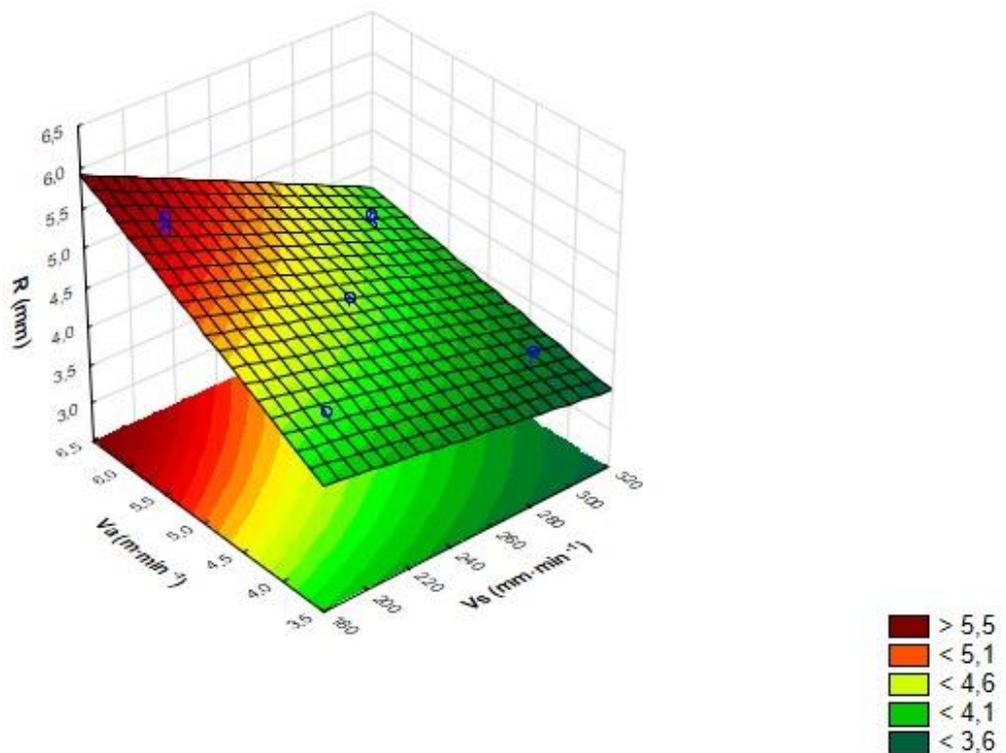
Fonte: O Autor (2023).

Nota-se a notável concordância entre os pontos das Figuras 20-22, indicando boa aproximação dos pontos com a reta de linearidade em vermelho, como era esperado devido aos altos valores de R^2 e de R^2 ajustado, obtidos na análise de variância.

4.1.2 Influência dos parâmetros sobre a diluição e sobre os fatores geométricos das deposições

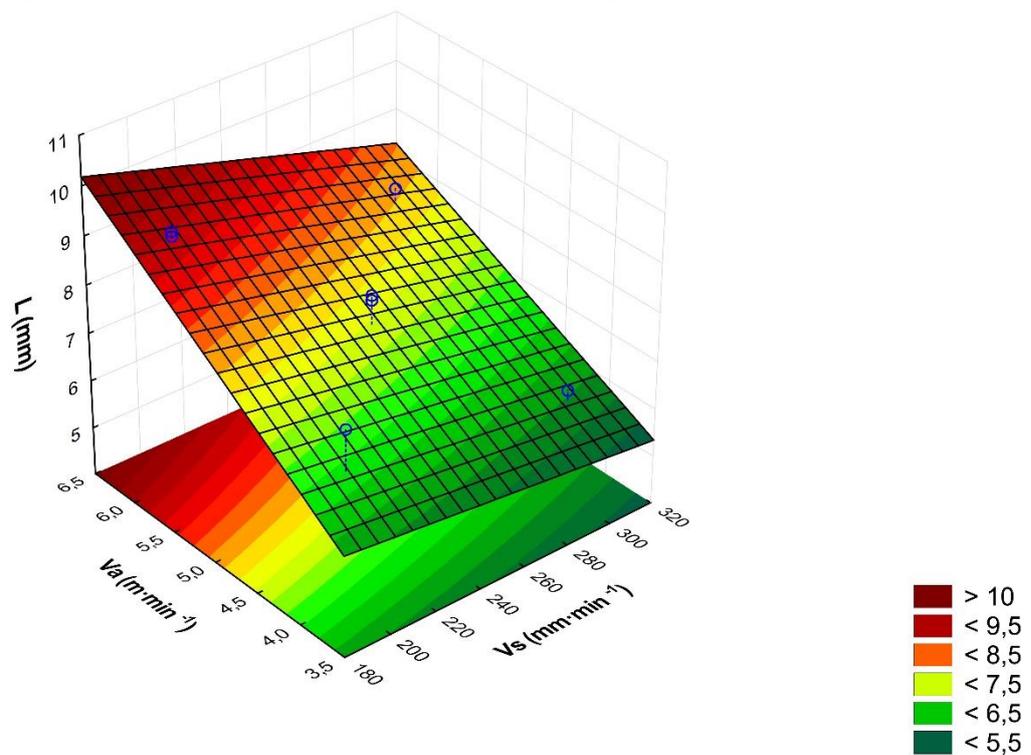
Com vista aos modelos de resposta estatisticamente significativos e ajustados dos parâmetros de saída R, L e D considerados, os gráficos de superfície, conforme ilustram as Figuras 23, 24 e 25 apresentam, respectivamente, a influência dos parâmetros de entrada de velocidade de deslocamento da tocha e velocidade de alimentação do arame em cada resposta isoladamente. Mantendo o valor da vazão do gás de proteção constante em $18 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, devido à sua menor significância comparado aos outros fatores independentes.

Figura 23 – Gráfico de superfície de resposta do reforço (R)



Fonte: O Autor (2023).

Figura 24 – Gráfico de superfície de resposta da largura (L)

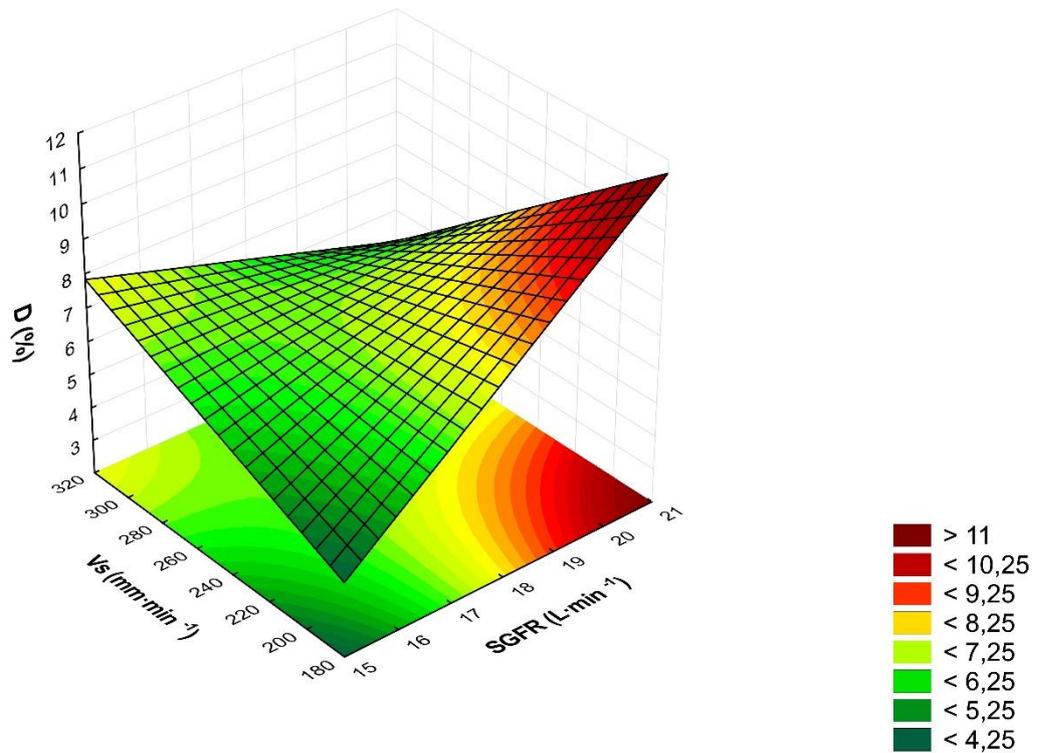
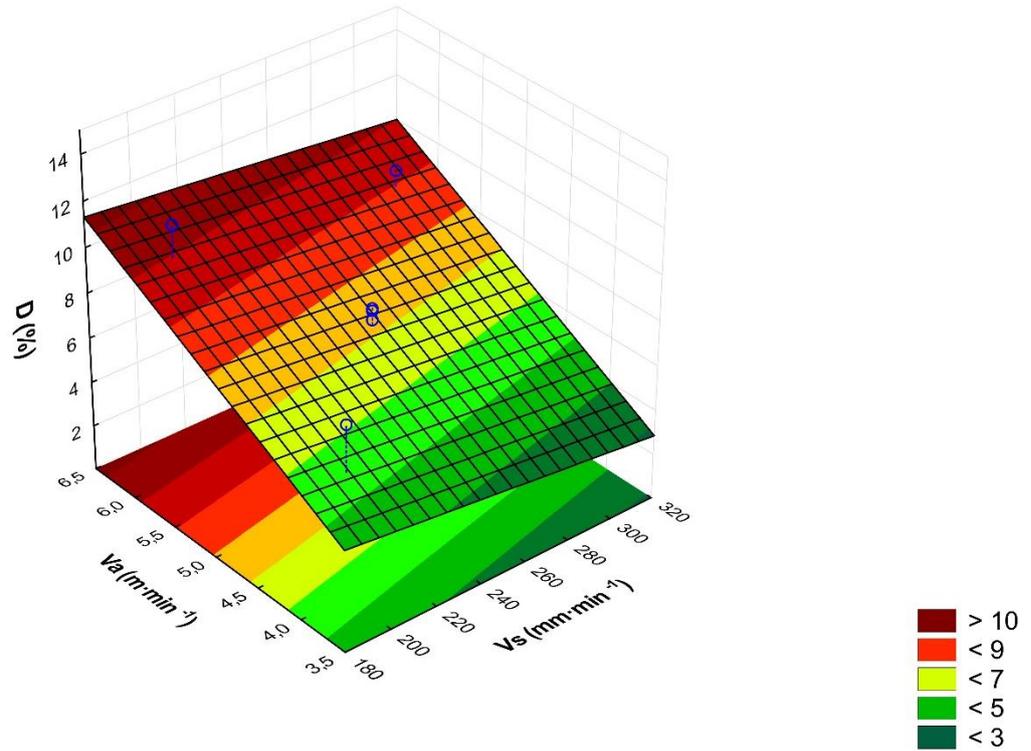


Fonte: O Autor (2023).

Descrevendo o comportamento da variável de resposta conforme variação desses fatores de controle, a partir da Figura 23, indica-se tendência geral de crescimento do valor de R para combinação de parâmetros, com maiores velocidades de alimentação do arame e menores valores de deslocamento da tocha, considerando o valor constante da vazão do gás de proteção. Para a mesma combinação de fatores, tem-se também a tendência de crescimento de L, na Figura 24.

Ao descrever o comportamento da diluição de acordo com variação dos fatores de controle, mostrados na Figura 25, indica-se tendência geral de crescimento do valor de D em duas circunstâncias de combinação de parâmetros de soldagem, sendo elas: maiores valores de vazão do gás de proteção e velocidade de alimentação do arame, com o valor de velocidade de soldagem fixa em $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; ou ainda menores valores de velocidade de deslocamento da tocha combinados com maiores valores para vazão do gás de proteção, com a velocidade de alimentação do arame fixa em $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Figura 25 – Gráficos de superfície de resposta da diluição (D)



Fonte: O Autor (2023).

Observa-se que os menores valores de diluição foram obtidos para valores mais baixos de corrente e para velocidades de deslocamento da tocha mais alta (SILVA *et al.*, 2019). Semelhante ao relatado por (NUNES *et al.*, 2015), que observou que o aumento da corrente de soldagem proporcionou aumento da largura do cordão de solda, redução do reforço e maior nível de diluição, devido possivelmente ao aumento do aporte térmico.

4.1.3 Teste de Curvatura

O teste de curvatura foi utilizado para a análise dos valores de resposta da variável Diluição, devido interação de fatores significante e geometria curva observado na superfície de resposta obtida para o planejamento de primeira ordem.

O teste de curvatura, quando significativo, pode indicar aplicação mais adequada do planejamento experimental fatorial de segunda ordem incluindo pontos axiais. Nesse contexto, os níveis de significância dos fatores de controle e teste de curvatura para a variável resposta “D” ou “diluição” podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta de diluição

FONTE DE VARIAÇÃO	Valores de p	
	D (%)	D (%) + Curv
<i>Curvatura teste</i>	-	0,016797
SGFR (L·min ⁻¹)	0,021630	0,002546
Vs (mm·min ⁻¹)	0,065408	0,007464
Va (m·min ⁻¹)	0,000387	0,000097
SGFR*Vs	0,004485	0,000665
SGFR*Va	0,124613	0,015522
Vs*Va	0,845778	0,630664
R^2	97,802	99,75
$R^2_{ajustado}$	94,504	99,17
MS Erro Puro	0,07303	0,07303

Fonte: O Autor (2023).

Conforme observado na Tabela 12, o teste de curvatura para a variável diluição se mostrou-se significativo, indicando aumento dos valores de R^2 e $R^2_{ajustado}$ ao implementar um planejamento quadrático. No entanto, mesmo com curvatura

significativa, decidiu-se manter o planejamento em primeira ordem para este trabalho, visto os altos valores de R^2 e $R^2_{ajustado}$ ainda obtidos no planejamento de primeira ordem e o tempo limitado para realização de novos experimentos para fabricação de pontos axiais.

4.2 ANÁLISE DE DUREZA NOS DEPÓSITOS

A Tabela 13 mostra o planejamento experimental fatorial completo de segunda ordem com os três parâmetros de processo controláveis e os valores médios obtidos para a variável resposta de dureza média, de acordo com as medições de microdureza vickers realizadas nos depósitos, além do tratamento estatístico dos dados.

Tabela 13 – Matriz do planejamento fatorial com níveis reais para os valores médios de dureza nos depósitos

Amostra	SGFR (L·min⁻¹)	Vs (mm·min⁻¹)	Va (m·min⁻¹)	Dureza (HV)
1	16 (-1)	200 (-1)	4 (-1)	190,25
2	16 (-1)	200 (-1)	6 (+1)	179,07
3	16 (-1)	300 (+1)	4 (-1)	220,64
4	16 (-1)	300 (+1)	6 (+1)	198,81
5	20 (+1)	200 (-1)	4 (-1)	211,40
6	20 (+1)	200 (-1)	6 (+1)	193,63
7	20 (+1)	300 (+1)	4 (-1)	213,89
8	20 (+1)	300 (+1)	6 (+1)	193,87
9	18 (0)	250 (0)	5 (0)	196,50
10	18 (0)	250 (0)	5 (0)	195,87
11	18 (0)	250 (0)	5 (0)	202,00

Fonte: O Autor (2023).

A faixa de valores de microdureza Vickers encontrados estão de acordo com o encontrado para o aço inoxidável austenítico 316LSi por (SOUZA, 2022, SILVA *et al.*, 2019, SILVA *et al.*, 2010, CUNHA, 2016). Percebe-se altos valores para a dureza nos níveis mais altos de velocidade de deslocamento da tocha, pela sua relação com a taxa de resfriamento, e sua influência com o ciclo térmico, granulometria e formação de microconstituintes com maior dureza, conforme também foi observado por SILVA *et al.*, (2010).

4.2.1 Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial

A Tabela 14, apresenta o nível de significância “ p ” dos parâmetros de controle sobre a dureza.

Os níveis de significância menores que 0,1 indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 90% em se admitir que esse fator de controle esteja influenciando as variáveis de resposta analisadas. Os valores em vermelho na Tabela 14 representam os fatores estatisticamente significativos.

Tabela 14 – Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável resposta de dureza

Fatores de Controle	Valores de p
	Dureza (HV)
SGFR ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	0,056686
V_s ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,004279
V_a ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,001439
SGFR* V_s	0,006344
SGFR* V_a	0,625215
V_s * V_a	0,227049
R^2	97,063
$R^2_{ajustado}$	92,657
MS Erro Puro	11,3706

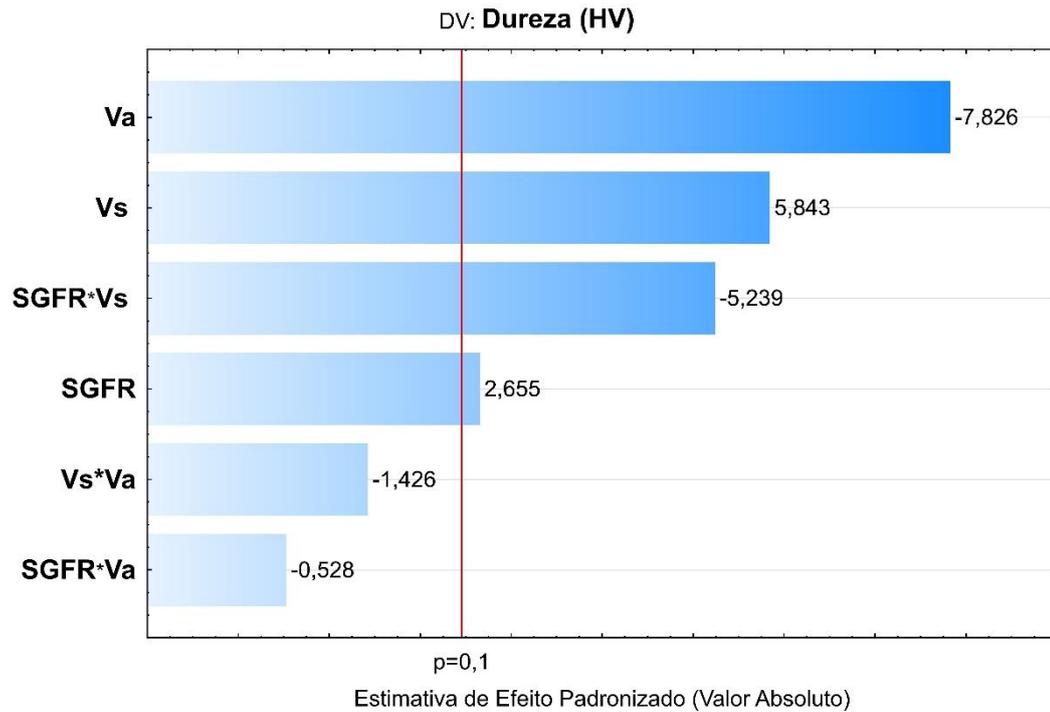
Fonte: O Autor (2023).

Verifica-se que os parâmetros que mais influenciam a variável de resposta da dureza são: V_a , V_s , SGFR e a interação SGFR * V_s . A Figura 26 apresenta o diagrama de pareto correspondente.

O modelo matemático de regressão ajustado, para o parâmetro estatístico de dureza, está expresso na Equação 7, para a qual se leva em conta os efeitos estatisticamente significativos, de acordo com a descrição previamente esclarecida.

$$HV = 199,63 + (3,0025 \cdot SGFR) + (6,6075 \cdot V_s) - (8,85 \cdot V_a) - (5,925 \cdot SGFR \cdot V_s) \quad (7)$$

Figura 26 – Diagrama de Pareto de efeitos associados a dureza da região de depósito



Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 15, apresenta o resultado da análise de variância para a dureza, a partir do qual se demonstra que o modelo é estatisticamente significativo e preditivo, já que satisfaz a premissa de $4 * F_{CALCULADO(R)} > F_{TABELADO(R)}$, sendo também um modelo bem ajustado já que $F_{CALCULADO(F.A)} < F_{TABELADO(F.A)}$.

Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para a dureza

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	1352,48	4	338,12	49,57
RESÍDUOS	40,925	6	6,821	1
FALTA DE AJUSTE	18,184	4	4,546	0,667
ERRO PURO	11,3706	2	5,6853	0,833
TOTAL	1393,4	10	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res); 90\%} = 3,18$;

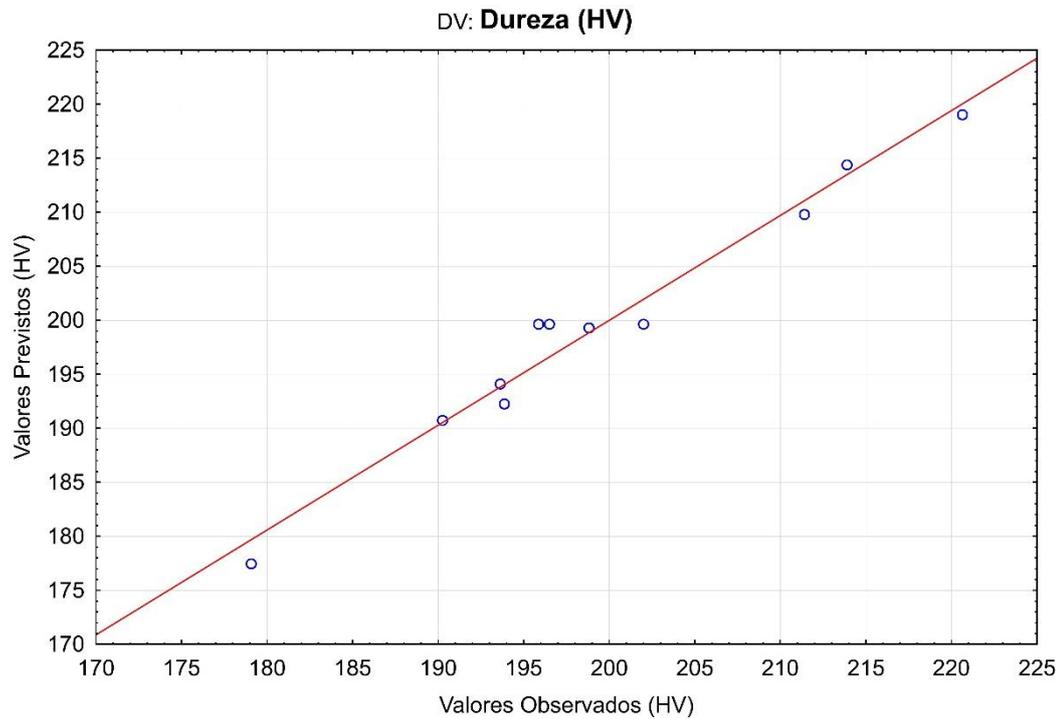
& $F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res); 90\%} = 3,18$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Sendo assim, pode-se afirmar que o modelo matemático para a resposta da dureza é significativo, preditivo e bem ajustado, considerando a confiabilidade de 90%,

em face dos valores de $F_{CALCULADO}$. Em acréscimo, tem-se os valores observados versus os valores previstos pelo modelo associado a resposta da dureza da região de depósito dos cordões, na Figura 27 abaixo.

Figura 27 – Valores Previstos vs. Valores Observados dos modelos associados a dureza dos depósitos.



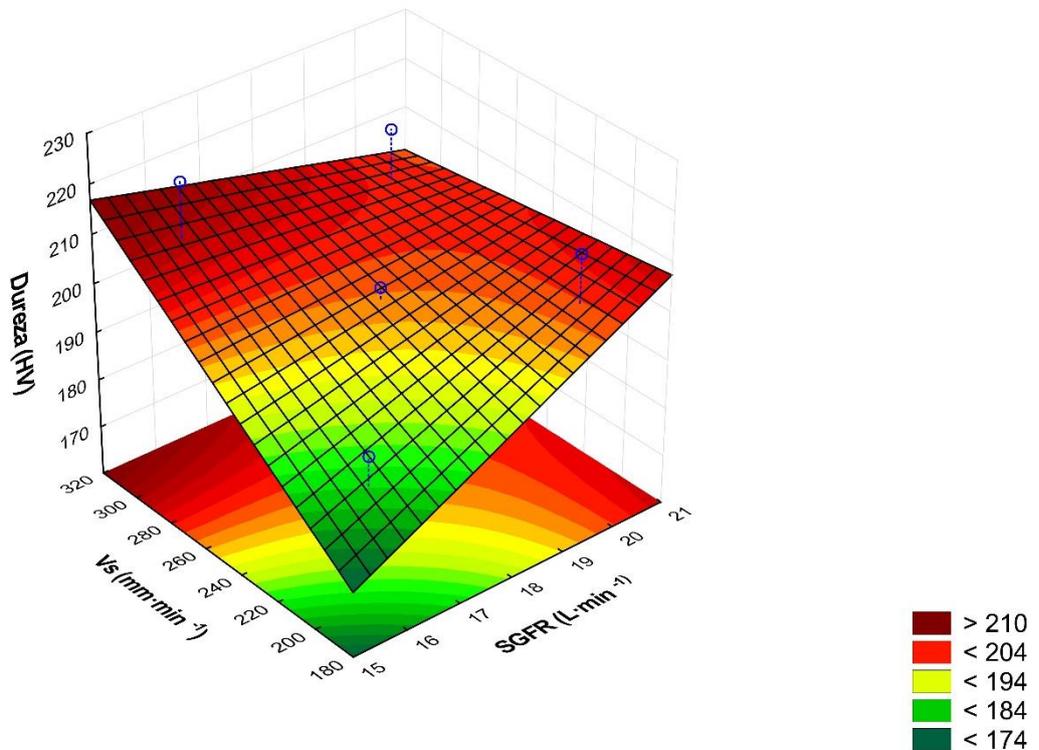
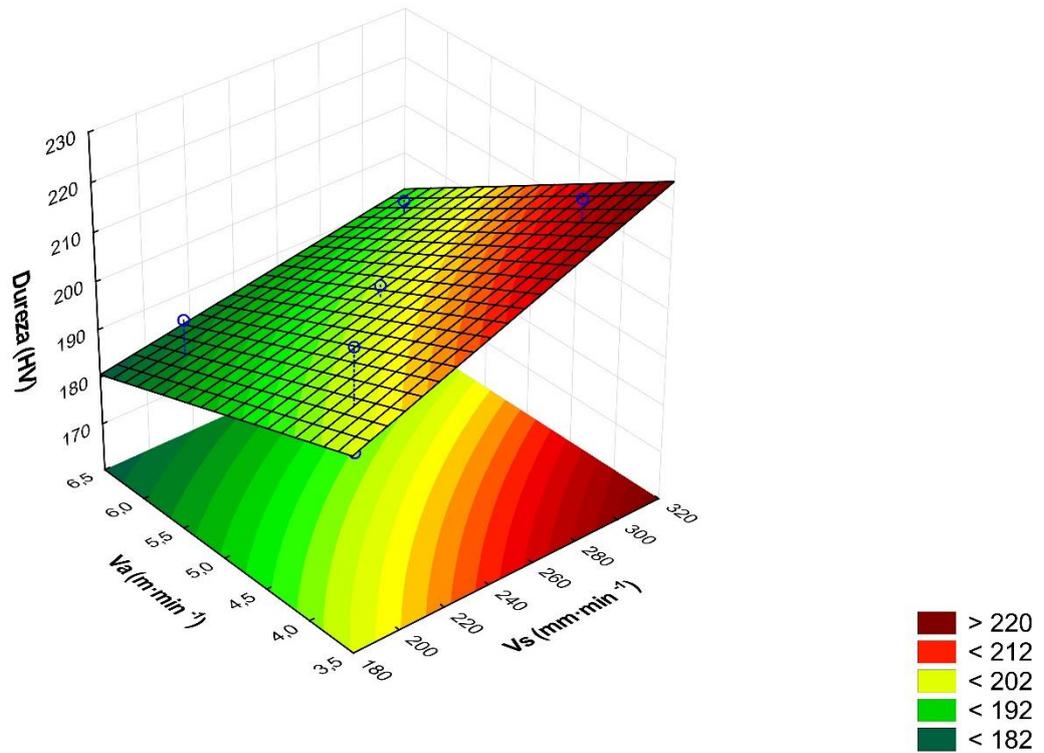
Fonte: O Autor (2023).

A partir da Figura 27, é de notável destaque a boa consonância dos pontos do gráfico pela sua estreita aproximação com a reta de regressão em vermelho, o que já era esperado devido aos altos valores de R^2 e de $R^2_{ajustado}$, obtidos na análise de variância.

4.2.2 Influência dos parâmetros sobre a dureza

Levando em consideração o modelo de resposta estatisticamente significativo e ajustado do parâmetro de saída da dureza (Equação 7), os gráficos de superfície, ilustrados na Figura 28, apresentam, a influência dos parâmetros de entrada significativa na resposta considerada.

Figura 28 – Gráficos de superfície de resposta de dureza (HV)



Fonte: O Autor (2023).

Para descrever o comportamento da dureza de acordo com a faixa de valores dos fatores de controle, mostrados na Figura 28, nota-se uma tendência geral de crescimento dos valores da dureza para maiores valores de velocidade de

deslocamento da tocha associados a menores valores de velocidade de alimentação do arame, devido possivelmente a maior taxa de resfriamento e microestrutura de solidificação mais fina.

4.2.3 Teste de Curvatura

O teste de curvatura foi utilizado para a análise dos valores de resposta da variável Dureza (HV), devido interação de fatores significantes e geometria curva observado na superfície de resposta obtida para o planejamento de primeira ordem.

Os níveis de significância dos fatores de controle e teste de curvatura para a variável resposta “D” ou “diluição” podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta de diluição

FONTE DE VARIAÇÃO	Valores de <i>p</i>	
	Dureza (HV)	Dureza (HV) + Curv
<i>Curvatura teste</i>	-	0,415059
SGFR (L·min ⁻¹)	0,056686	0,079120
Vs (mm·min ⁻¹)	0,004279	0,010389
Va (m·min ⁻¹)	0,001439	0,004523
SGFR*Vs	0,006344	0,014065
SGFR*Va	0,625215	0,638359
Vs*Va	0,227049	0,254362
<i>R</i> ²	97,063	97,74
<i>R</i> ² <i>ajustado</i>	92,657	92,45
MS Erro Puro	11,3706	11,3706

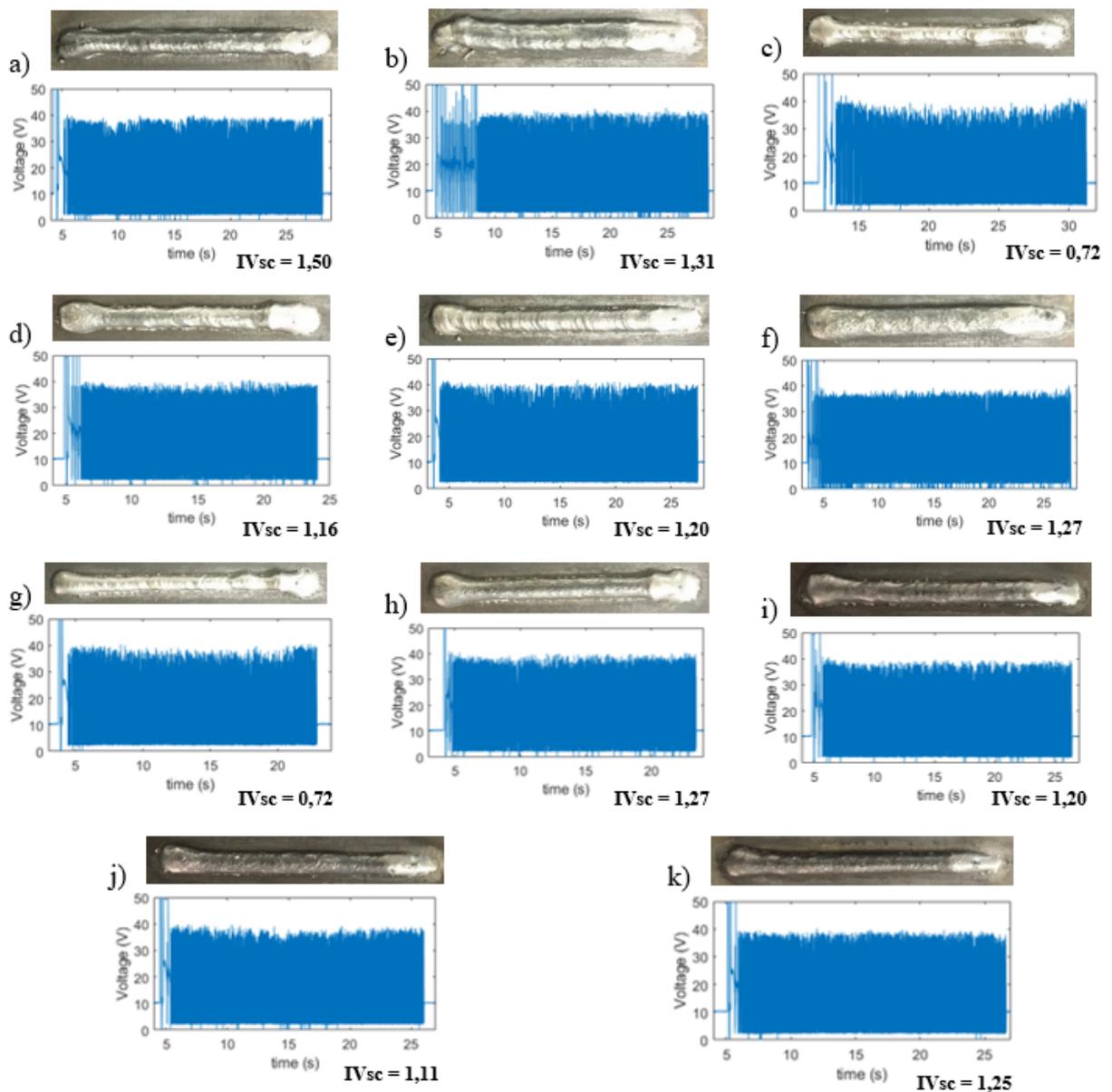
Fonte: O Autor (2023).

Conforme observado na Tabela 16, o teste de curvatura para a variável de dureza não se mostrou-se significativo, indicando indiferença dos valores de *R*² e *R*²*ajustado* ao implementar um planejamento quadrático. Nesse sentido, mesmo com interações significativas, o planejamento em primeira ordem é o mais indicado para este trabalho.

4.3 ANÁLISE DE REGULARIDADE DO ARCO DOS DEPÓSITOS

A visão superficial dos depósitos isolados e os gráficos de tensão ao longo do tempo são observados na Figura 29, de forma que se destaca o efeito da aplicação de níveis dos fatores na transferência metálica e a estabilidade do processo GMAW-CCC por meio do valor do índice de transferência IV_{sc} .

Figura 29 - A morfologia macroscópica e a forma de onda de tensão dos cordões depositados referentes aos experimentos 1 a 3 (a-c), 4 a 6 (d-f), 7 a 9 (g-i), e 10 a 11 (j-k)



Fonte: O Autor (2023).

A análise dos resultados do índice Vilarinho de estabilidade do arco elétrico, assim como as anteriores, foi realizada por métodos estatísticos. Na Tabela 17 estão listados os níveis reais para cada fator de controle e as respostas para IV_{cc}.

Tabela 17 – Matriz do planejamento fatorial com níveis reais para os valores de IV_{cc}

Amostra	SGFR (L·min⁻¹)	Vs (mm·min⁻¹)	Va (m·min⁻¹)	IV_{cc}
1	16 (-1)	200 (-1)	4 (-1)	1,50
2	16 (-1)	200 (-1)	6 (+1)	1,31
3	16 (-1)	300 (+1)	4 (-1)	0,72
4	16 (-1)	300 (+1)	6 (+1)	1,16
5	20 (+1)	200 (-1)	4 (-1)	1,20
6	20 (+1)	200 (-1)	6 (+1)	1,27
7	20 (+1)	300 (+1)	4 (-1)	0,72
8	20 (+1)	300 (+1)	6 (+1)	1,27
9	18 (0)	250 (0)	5 (0)	1,20
10	18 (0)	250 (0)	5 (0)	1,11
11	18 (0)	250 (0)	5 (0)	1,25

Fonte: O Autor (2023).

Conforme a Tabela 17, o índice IV_{cc} cresce com aumento da velocidade de alimentação do arame, o que infere que a regularidade de transferência metálica e estabilidade do arco pioram, como discutido também por (COSTA; MOTA, 2014), mas utilizando a tensão elétrica como parâmetro de controle e a corrente elétrica sendo monitorada durante a execução dos depósitos, podendo ser relacionada com a velocidade de alimentação do arame abordada por este trabalho. Contudo, alguns trabalhos costumam divergir com relação aos resultados obtidos de IV_{cc} ao utilizar aço inoxidável austenítico, assim como mostrado pelos resultados de (LISKEVYCH, 2010, REZENDE *et al.*, 2010b, COSTA; MOTA, 2014), devido a ampla faixa de valores para os parâmetros de controle e a obtenção de melhores resultados de forma descontínua ao longo da faixa de valores dos parâmetros de controle selecionados.

4.3.1 Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial

A Tabela 18 apresenta os níveis de significância dos fatores de controle sobre a variável resposta de IVcc.

Os níveis de significância menores que 0,05 indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que esse fator de controle esteja influenciando as variáveis de resposta analisadas. Os valores em vermelho na Tabela 18 representam os fatores estatisticamente significativos.

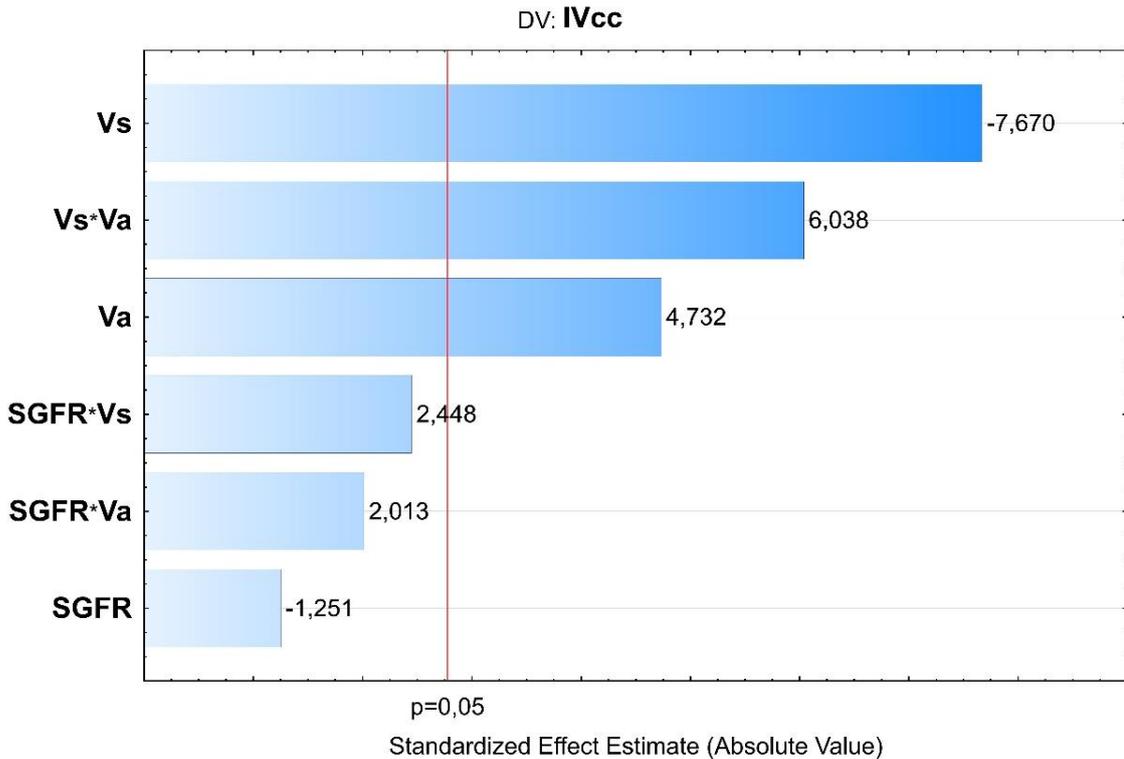
Tabela 18 – Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável resposta de IVcc

Fatores de Controle	Valores de p
	IVcc (%)
SGFR ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	0,279072
Vs ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,001553
Va ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,009087
SGFR*Vs	0,070609
SGFR*Va	0,114450
Vs*Va	0,003794
R^2	97,00
$R^2_{ajustado}$	92,50
MS Erro Puro	0,0050333

Fonte: O Autor (2023).

É possível observar que os parâmetros que mais influenciam a variável resposta IVcc foram: Vs, a interação Vs*Va e a Va, respectivamente. A Figura 30 apresenta o Diagrama de Pareto correspondente.

Figura 30 – Diagrama de Pareto de efeitos associados ao IVcc dos depósitos



Fonte: O Autor (2023).

Considerando que um valor de probabilidade de 95% de confiança é satisfatório, foi possível estabelecer um modelo para o IVcc (Equação 8), na qual as variáveis dependentes são os efeitos estatisticamente significativos para essa variável dependente, descritos anteriormente.

$$IVcc = 1,1555 - (0,17625*Vs) + (0,10875*Va) + (0,13875*Vs*Va) \quad (8)$$

A análise de variância (ANOVA) para o modelo encontrado foi realizada com um nível de confiança de 95% para $p < 0,05$ e os resultados representativos da resposta do índice de regularidade (IVcc) estão listados na Tabela 19, que mostra, por meio do valor de $F_{CALCULADO}$, que o modelo é estatisticamente significativo, preditivo e bem ajustado, com as mesmas considerações tecidas para as demais respostas analisadas anteriormente.

Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) para o IVcc

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	0,55885	3	0,18628	310,467
RESÍDUOS	0,00422	7	0,0006	1
FALTA DE AJUSTE	0,00683	5	0,00137	2,28
ERRO PURO	0,00503	2	0,00252	4,2
TOTAL	0,563073	10	-	-

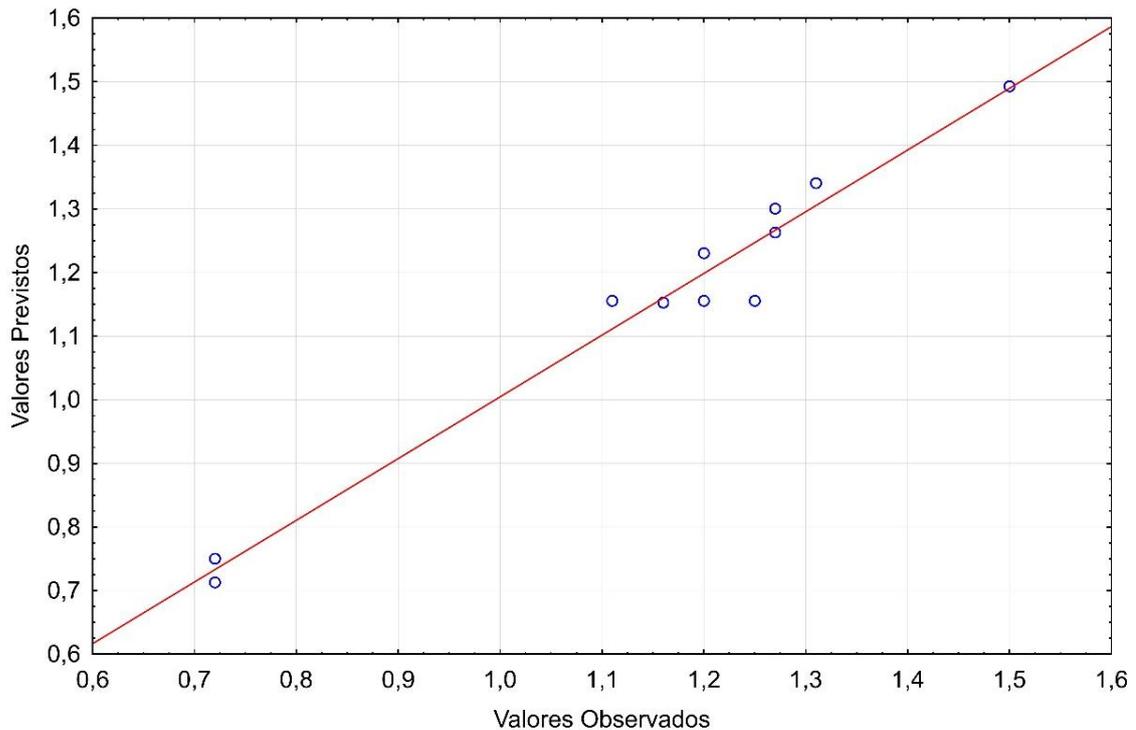
$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res);95\%} = 4,33$;

& $F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res);95\%} = 3,92$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Dessa forma, é possível afirmar que o modelo para a resposta do IVcc é, de fato, significativo, preditivo e bem ajustado, considerando a confiabilidade de 95%, em detrimento de $F_{CALCULADO}$. Somado a isso, em associação ao modelo de resposta de IVcc, tem-se o gráfico dos Valores Observados versus Valores Previstos na Figura 31, logo abaixo.

Figura 31 – Valores Previstos vs. Valores Observados do modelo associado ao IVcc
DV: **IVcc**



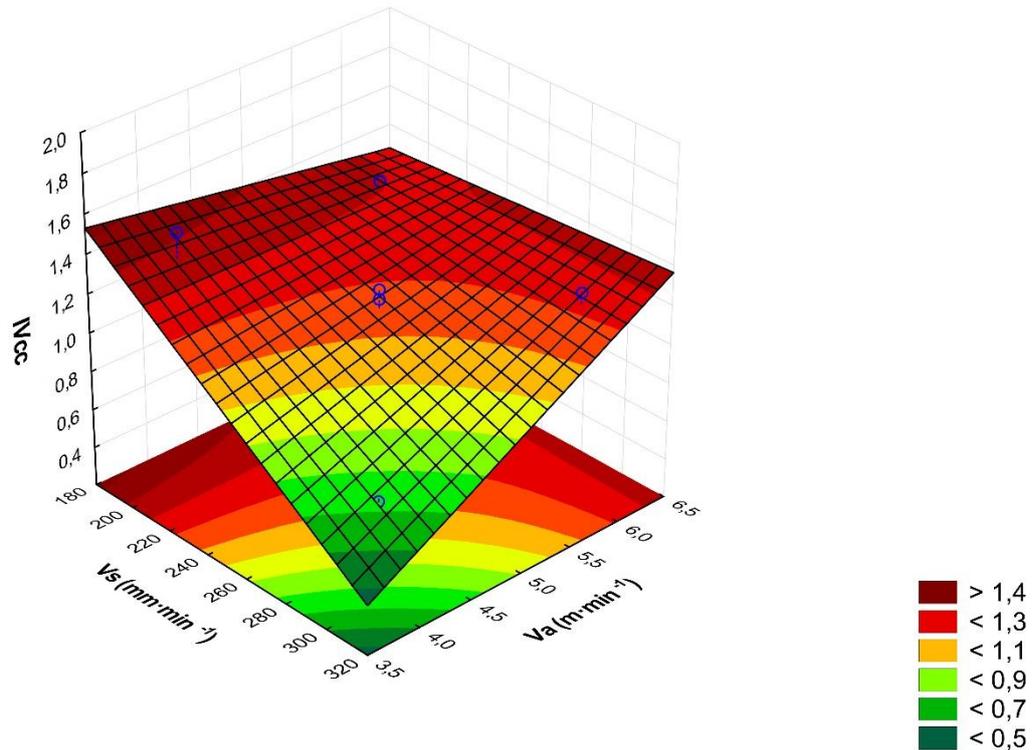
Fonte: O Autor (2023).

A partir da Figura 31, destaca-se a boa concordância dos pontos do gráfico por sua aproximação com a reta linearizada em vermelho, fato que era de expectativa frente aos altos valores de R^2 e de $R^2_{ajustado}$, obtidos na análise de variância.

4.3.2 Influência dos parâmetros sobre o IVcc

Sendo o modelo da resposta do índice de regularidade considerado estatisticamente significativo, preditivo e bem ajustado, o gráfico da superfície de resposta, ilustra na Figura 32, apresenta a influência da velocidade de soldagem e de alimentação do arame no IVcc, fixando o valor da SGFR em $18 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Figura 32 – Gráfico de superfície de resposta de IVcc



Fonte: O Autor (2023).

O gráfico de superfície de resposta IVcc prevê tendência de crescimento para combinação de maiores valores de V_s e de V_a , mantendo constante a SGFR, igual a $18 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

4.3.3 Teste de Curvatura

O teste de curvatura foi utilizado para a análise dos valores de resposta da variável IV_{CC} , devido interação de fatores significativa e geometria pouco curva observada no gráfico de superfície de resposta obtido em planejamento experimental de primeira ordem.

Os níveis de significância dos fatores de controle e teste de curvatura para a variável resposta “ IV_{CC} ” podem ser observados na Tabela 20.

Tabela 20 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta de diluição

FONTE DE VARIAÇÃO	Valores de p	
	IV_{CC}	$IV_{CC} + \text{Curv}$
<i>Curvatura teste</i>	-	0,404659
SGFR ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	0,279072	0,302779
V_s ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,001553	0,004712
V_a ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,009087	0,018279
SGFR* V_s	0,070609	0,093480
SGFR* V_a	0,114450	0,139797
$V_s \cdot V_a$	0,003794	0,009318
R^2	97,00	97,71
$R^2_{ajustado}$	92,50	92,38
MS Erro Puro	0,0050333	0,0050333

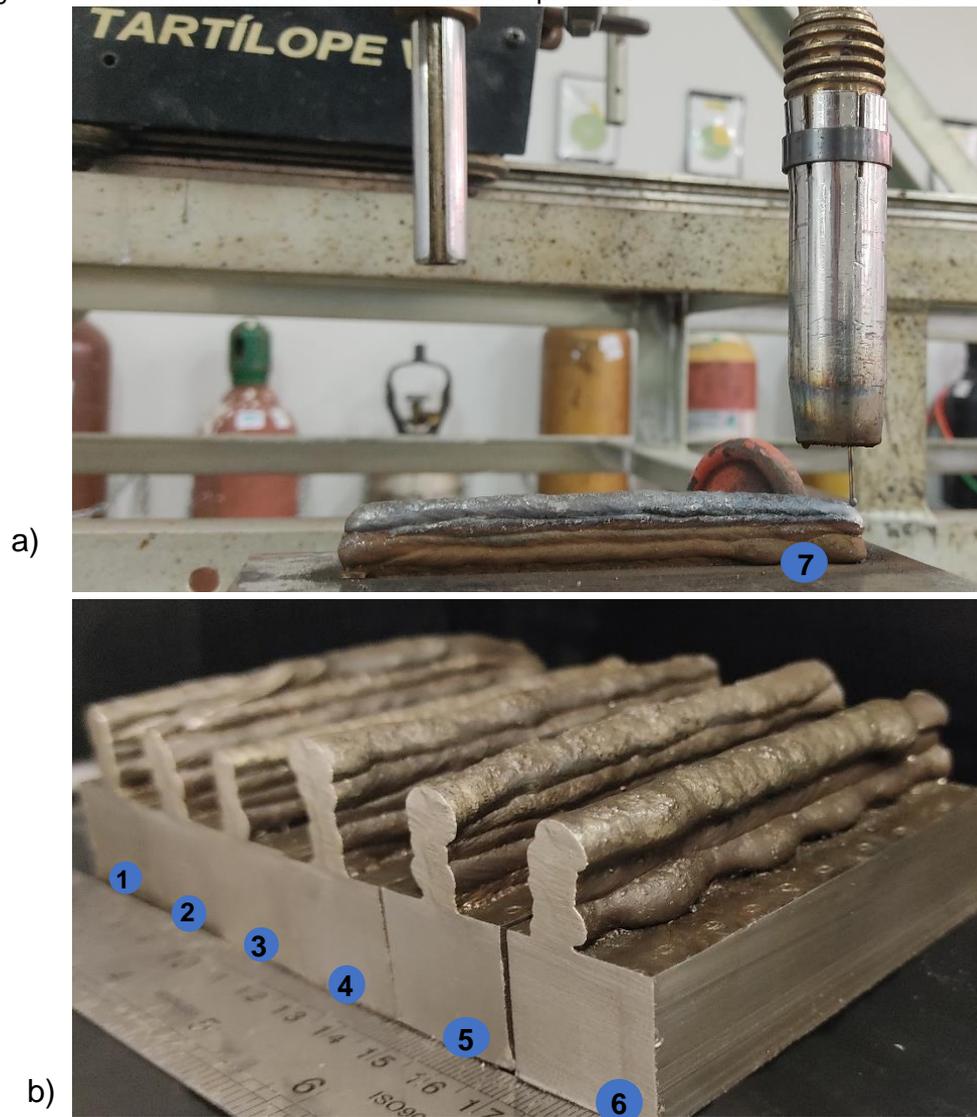
Fonte: O Autor (2023).

Conforme observado na Tabela 20, o teste de curvatura para a variável de IV_{CC} não se mostrou-se significativo, indicando pela indiferença dos valores de R^2 e $R^2_{ajustado}$ ao implementar um planejamento quadrático. Nesse sentido, mesmo com interações entre fatores independentes e sinergia significativa, o planejamento em primeira ordem é o mais indicado para este trabalho.

4.4 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DAS PRÉ-FORMAS

Como ilustração geral, na Figura 33a pode ser observado uma pré-forma de AISI 316L-Si fabricada pelo processo MADA neste trabalho. Já na Figura 33b, é observado seis diferentes pré-formas, correspondente a combinação de parâmetros para as amostras 1, 2, 3, 4, 5 e 6, da esquerda para direita.

Figura 33 - Pré-formas de AISI 316L-Si obtidas por MADA utilizando a técnica de C-CC



Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 21 ilustra a superfície das pré-formas 1-5, e 7 (correspondente aos pontos centrais) fabricadas com diferentes combinações de parâmetros de processo, com observações e defeitos identificados.

Tabela 21 - Vistas lateral e frontal das diferentes pré-formas obtidas por MADA

Pré-forma	Vista frontal	Vista lateral	Parâmetros de fabricação	Observações
1			$V_S = 200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $V_a = 4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Sem defeitos superficiais aparentes; efeito escada regular.
2			$V_S = 200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $V_a = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Alta distorção geométrica; efeito escada acentuado; irregularidade e rugosidade.
3			$V_S = 300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $V_a = 4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Sem defeitos superficiais aparentes; baixa ocorrência de respingos; menor efeito escada.
4			$V_S = 300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $V_a = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Baixa distorção geométrica; altura total maior; efeito escada acentuado.
5, 6 e 7.			$V_S = 250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $V_a = 5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Irregularidade geométrica; efeito escada acentuado.

Fonte: O Autor (2023).

Inicialmente, foram realizadas inspeções visuais em todas as sete pré-formas manufaturadas com os diferentes parâmetros de processo a fim de verificar defeitos

superficiais, Tabela 21. A presença de “degraus de escada”, ou “efeito escada” é claramente observada na face lateral das pré-formas obtidas, devido à característica geométrica côncava dos depósitos de metal executados por processo ao arco elétrico. Este fenômeno é encontrado com maior intensidade em formas obtidas por GMAW (XIONG *et al.*, 2018) do que no processo de deposição de laser mais pó (ALIMARDANI *et al.*, 2012), devido ao processo GMAW possuir maior produtividade na deposição de metal, o que favorece a produção de camadas com uma maior altura na MADA.

A qualidade da superfície mostrada na pré-forma 1 é mais ou menos equivalente àquela apresentada na pré-forma 3, com menor quantidade de deformações aparentes e efeito escada uniforme, o que indica maior regularidade geométrica para as pré-formas fabricadas com menores valores de V_a . À medida que a V_a aumenta para $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, as camadas adjacentes em determinada área não possuem limites uniformes visíveis, e ocorre o fenômeno de camadas mistas, como visto na pré-forma 2 e pré-forma 4. Pode-se deduzir que o formato da poça fundida não pode ser bem controlado nas camadas depositadas com altos valores de V_a . Quando maiores valores de V_a , $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, são associados a menores valores de V_s , $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, diversas ondulações e deformações podem ser observadas no perfil da superfície da pré-forma, sendo mais predominante o fenômeno de camadas mistas, conforme observado na pré-forma 2. O que indica que a poça fundida transborda aleatoriamente nas camadas. À medida que a peça de parede fina é resfriada até a temperatura ambiente, é produzida uma aparência superficial ruim, resultando em um grande volume de desperdícios de metal no processo de usinagem de acabamento.

À medida que a V_s aumenta para $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ o efeito de degraus da escada é enfraquecido (XIONG *et al.*, 2018). Esse efeito é melhor observado com a comparação da transição da pré-forma 1 para a pré-forma 3, obtidas com mesma V_a e diferentes valores de V_s . Apesar de apresentar melhor aspecto visual, uma pequena quantidade de partículas de respingos é gerada no perfil de superfície da pré-forma 3.

A Tabela 22 apresenta os resultados para as variáveis respostas relacionadas às características geométricas das pré-formas metálicas obtidas por MA, tais como: Altura total (A_T), Altura eficaz (A_{Ef}), Largura total (L_T), Largura eficaz (L_{Ef}) e rugosidade/rejeito (S_z). Tendo-se como fatores de controle a velocidade de deslocamento da tocha (V_s) e a velocidade de alimentação do arame (V_a). De posse desses valores foi realizada uma análise com base na metodologia do planejamento

experimental fatorial para determinar os parâmetros de fabricação que mais se enquadram ao fim a que se destina, isto é, melhor acabamento superficial.

Tabela 22 – Características geométricas das pré-formas conforme planejamento experimental

Amostra	FATORES DE CONTROLE		VARIÁVEL DE RESP.				
	V_s (mm·min ⁻¹)	V_a (m·min ⁻¹)	A_T (mm)	A_{Ef} (mm)	L_T (mm)	L_{Ef} (mm)	S_z (mm)
1	200 (-1)	4 (-1)	15,45	13,87	8,03	7,02	0,51
2	200 (-1)	6 (+1)	20,87	18,45	9,97	7,61	1,18
3	300 (+1)	4 (-1)	14,09	12,1	6,25	5,53	0,36
4	300 (+1)	6 (+1)	17,63	15,87	8,31	6,73	0,79
5	250 (0)	5 (0)	17,56	16,08	8,18	6,57	0,81
6	250 (0)	5 (0)	16,74	15,31	8,15	6,66	0,75
7	250 (0)	5 (0)	15,79	14,22	7,76	6,53	0,62

Fonte: O Autor (2023).

4.4.1 Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial

Com base nos resultados da Tabela 23, localizado logo abaixo, realizou-se uma análise estatística de variância, calculando o nível de significância “ p ” dos parâmetros de controle sobre as características geométricas das pré-formas (Altura total, Altura eficaz, Largura total, Largura eficaz e rugosidade/rejeito), inicialmente. Os níveis de significância menores que 0,1 indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 90% em se admitir que esse fator de controle esteja influenciando as variáveis de resposta analisadas. Os valores em vermelho na tabela representam os fatores estatisticamente significativos.

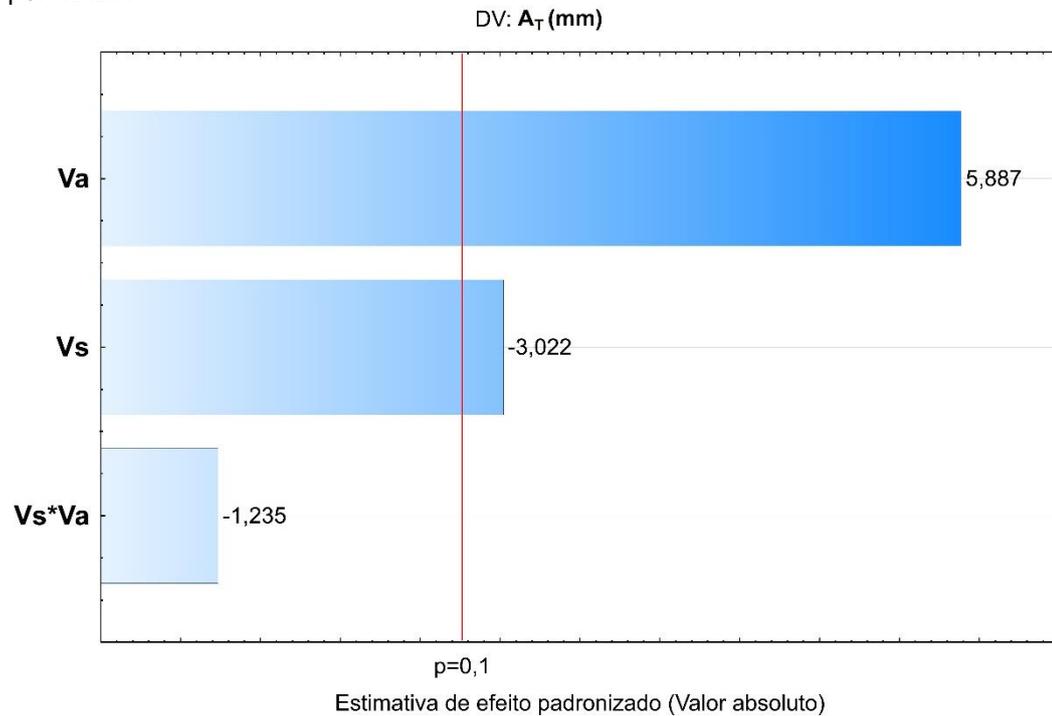
Tabela 23 – Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis resposta do aspecto geométrico

Fatores de Controle	Valores de p				
	A_T (mm)	A_{Ef} (mm)	L_T (mm)	L_{Ef} (mm)	S_z (mm)
V_s (mm·min ⁻¹)	0,056662	0,066373	0,003735	0,002009	0,043652
V_a (m·min ⁻¹)	0,009784	0,012284	0,002408	0,004547	0,006370
V_s*V_a	0,304690	0,635083	0,792354	0,078653	0,231920
R^2	93,79	92,63	98,16	98,27	95,27
$R^2_{ajustado}$	87,58	85,26	96,32	96,54	90,55
MS Erro Puro	0,78463	0,87343	0,05490	0,00443	0,00943

Fonte: O Autor (2023).

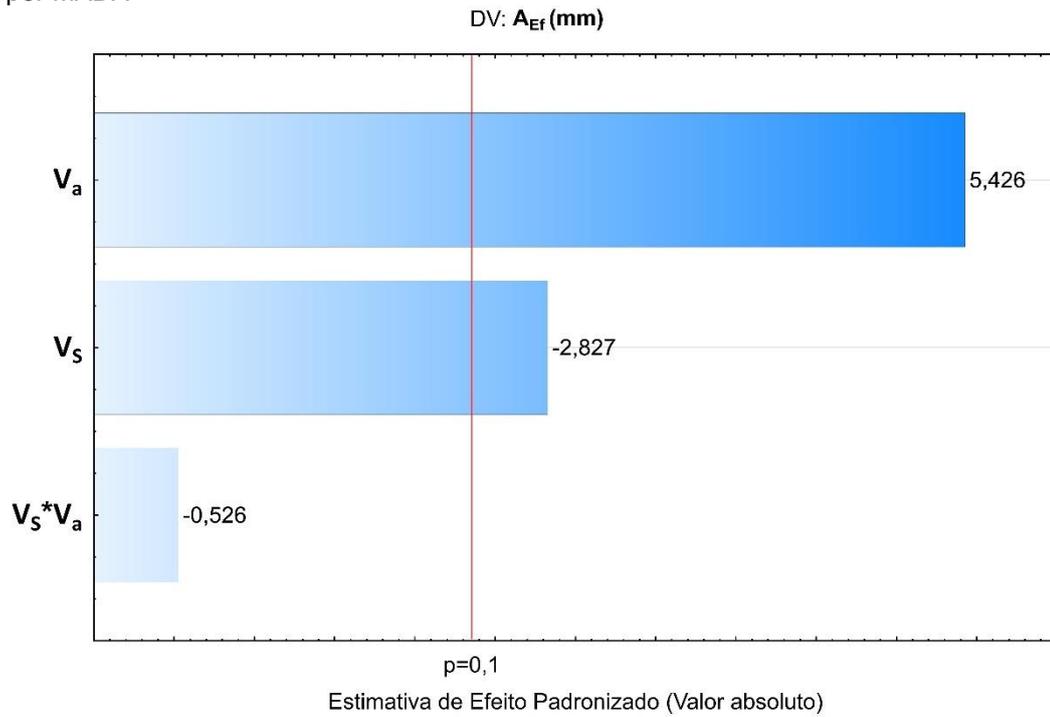
Nos diagramas de Pareto, presentes nas Figuras 34 a 38, é possível observar que os parâmetros que mais influenciam as variáveis dependentes A_T , A_{Ef} , L_T , L_{Ef} e S_z , são, respectivamente a velocidade de alimentação do arame (V_a) e de deslocamento da tocha (V_s).

Figura 34 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Altura total (A_T) das pré-formas obtidas por MADA



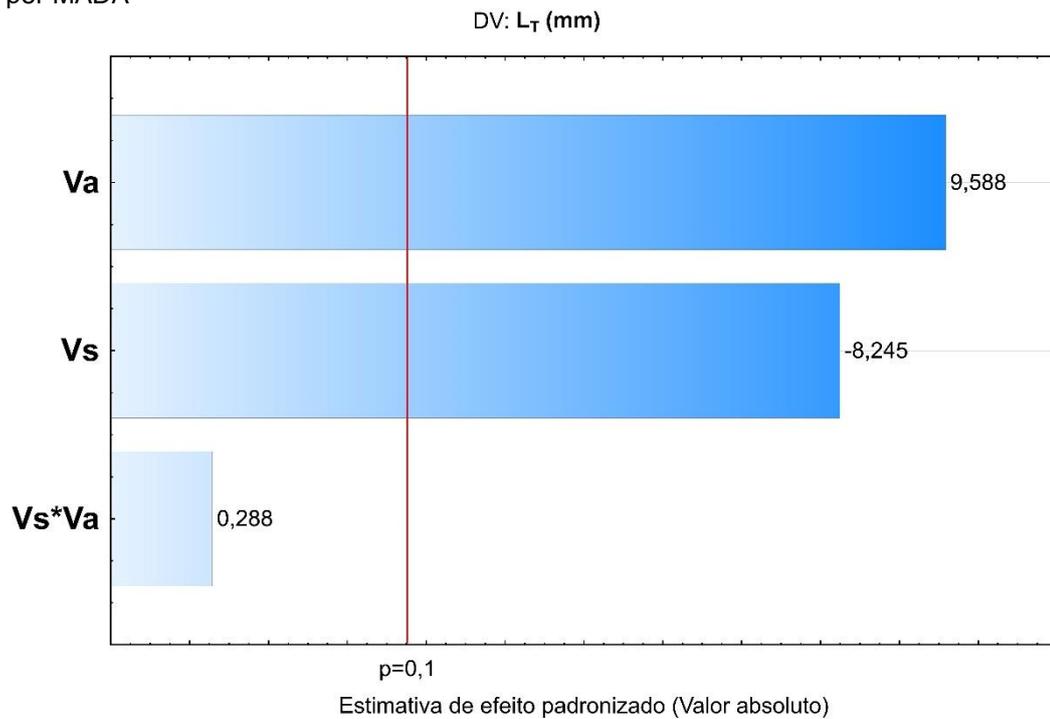
Fonte: O Autor (2023).

Figura 35 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA



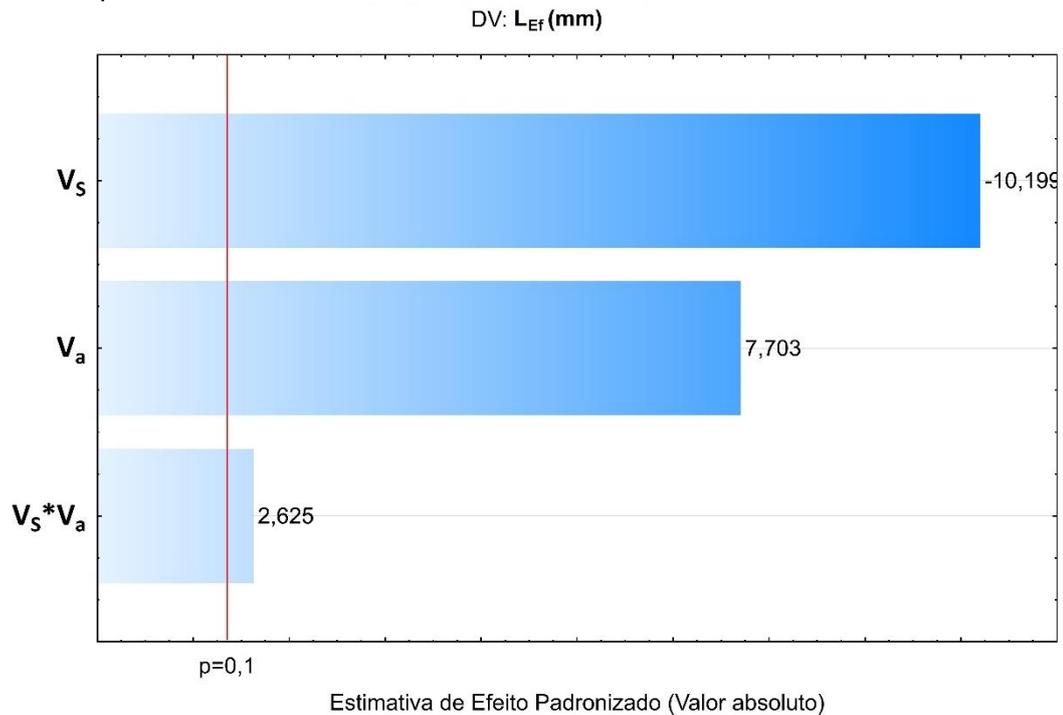
Fonte: O Autor (2023).

Figura 36 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Largura total (L_T) das pré-formas obtidas por MADA



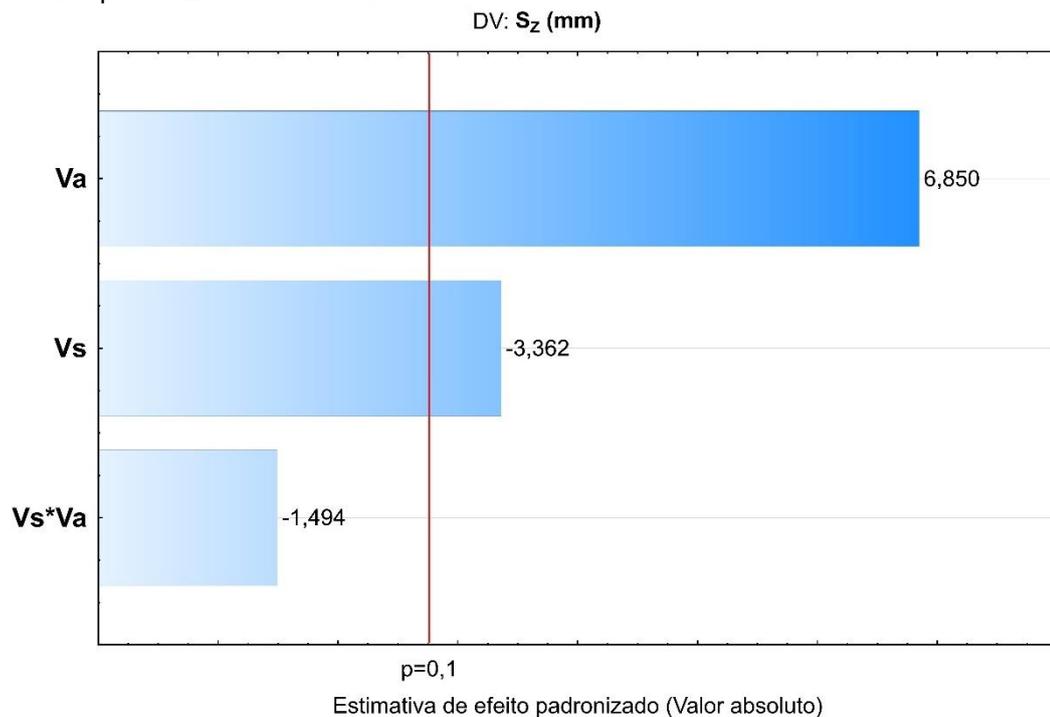
Fonte: O Autor (2023).

Figura 37 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA



Fonte: O Autor (2023).

Figura 38 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas obtidas por MADA



Fonte: O Autor (2023).

As equações dos modelos ajustados de regressão, com seus respectivos parâmetros estatísticos para A_T , A_{Ef} , L_T , L_{Ef} e S_z , estão mostrados, respectivamente

nas Equações 9, 10, 11, 12 e 13 para as quais foram levados em consideração todos os efeitos estatisticamente significativos, em função dos níveis +1 e -1, de acordo com a descrição e implementação de COMPARINI *et al.* (2009).

$$A_T = 16,8757 - (1,15 * V_s) + (2,24 * V_a) \quad (9)$$

$$A_{Ef} = 15,1286 - (1,0875 * V_s) + (2,0875 * V_a) \quad (10)$$

$$L_T = 8,0929 - (0,86 * V_s) + (1 * V_a) \quad (11)$$

$$L_{Ef} = 6,6643 - (0,5925 * V_s) + (0,4475 * V_a) + (0,1525 * V_s * V_a) \quad (12)$$

$$S_z = 0,7171 - (0,1350 * V_s) + (0,2750 * V_a) \quad (13)$$

Nas Tabelas 24 a 28, está apresentado o resultado da análise de variância para A_T , A_{Ef} , L_T , L_{Ef} e S_z , mostrando através do valor de $F_{CALCULADO}$ que o modelo é estatisticamente significativo e preditivo, pois $4F_{CALCULADO(R)} > F_{TABELADO(R)}$, e bem ajustado já que $F_{CALCULADO(F.A)} < 4F_{TABELADO(F.A)}$.

Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA) para Altura total (A_T) das pré-formas obtidas por MADA

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	26,244	2	13,122	30,208
RESÍDUOS	1,73757	4	0,43439	1
FALTA DE AJUSTE	0,16830	2	0,08415	0,1937
ERRO PURO	0,78463	2	0,39232	0,9032
TOTAL	27,98157	6	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res); 90\%} = 4,32$;

& $F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res); 90\%} = 4,32$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 25 – Análise de variância (ANOVA) para Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	22,32528	2	11,16264	25,141
RESÍDUOS	1,77621	4	0,444	1
FALTA DE AJUSTE	0,02934	2	0,01467	0,033
ERRO PURO	0,87343	2	0,43672	0,9836
TOTAL	24,10149	6	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res);90\%} = 4,32;$

$\& F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res);90\%} = 4,32$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 26 – Análise de variância (ANOVA) para Largura total (L_T) das pré-formas obtidas por MADA

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	6,962	2	4,481	137,286
RESÍDUOS	0,130543	4	0,03264	1
FALTA DE AJUSTE	0,020743	2	0,01037	0,3177
ERRO PURO	0,05490	2	0,02745	0,841
TOTAL	7,092543	6	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res);90\%} = 4,32;$

$\& F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res);90\%} = 4,32$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) para Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	2,298275	3	1,14914	113,551
RESÍDUOS	0,040496	3	0,01012	1
FALTA DE AJUSTE	0,031630	1	0,01582	1,5632
ERRO PURO	0,00443	2	0,00222	0,21887
TOTAL	2,338771	6	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res);90\%} = 5,39;$

$\& F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res);90\%} = 5,54$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 28 – Análise de variância (ANOVA) para Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas obtidas por MADA

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{CALCULADO}$
REGRESSÃO	0,3898	2	0,1949	40,604
RESÍDUOS	0,019343	4	0,0048	1
FALTA DE AJUSTE	0,000476	2	0,00024	0,05
ERRO PURO	0,00943	2	0,0047	0,9792
TOTAL	0,409143	6	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res); 90\%} = 4,32;$

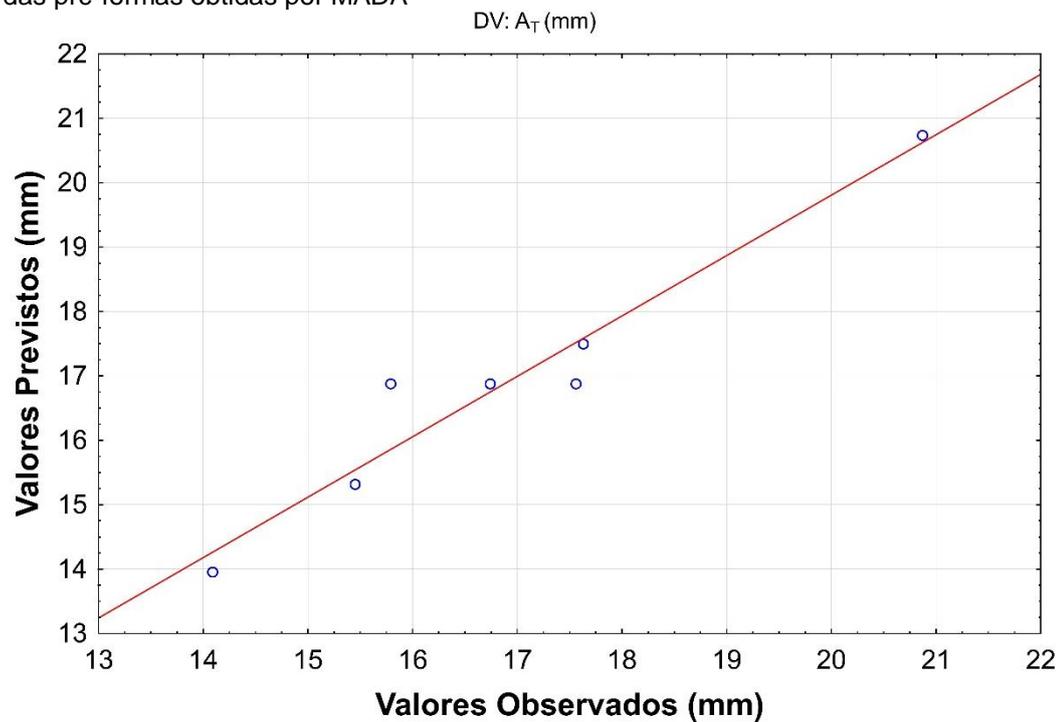
$\& F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res); 90\%} = 4,32$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Com base nos valores de $F_{CALCULADO}$ pode-se afirmar que os modelos para determinação dos fatores A_T , A_{Ef} , L_T , L_{Ef} e S_Z , são ‘significativos e preditivos’ e ‘bem ajustados’, com 90% de confiabilidade.

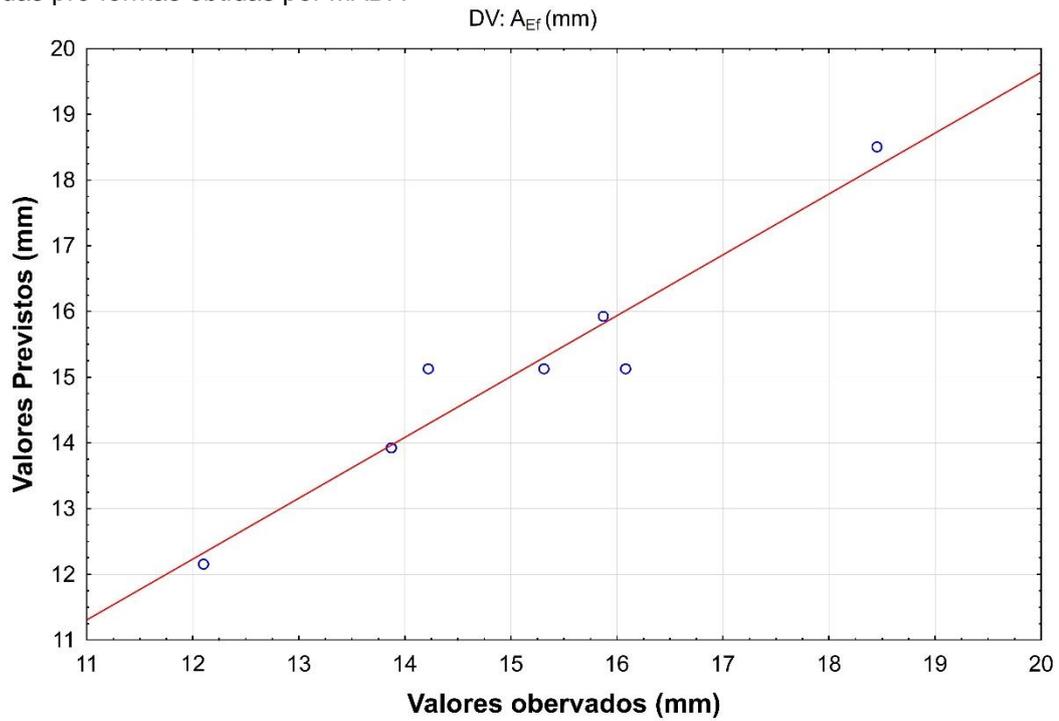
Os valores observados experimentalmente versus os valores preditos pelos modelos associados aos fatores geométricos, são observados nas Figuras 39 a 43. Sendo observado uma boa concordância entre os valores, indica pela aproximação dos pontos com as retas de linearidade em vermelho, já esperado devido os ótimos valores de R^2 e de $R^2_{ajustado}$, obtidos na análise de variância para todos fatores geométricos analisados.

Figura 39 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Altura total (A_T) das pré-formas obtidas por MADA



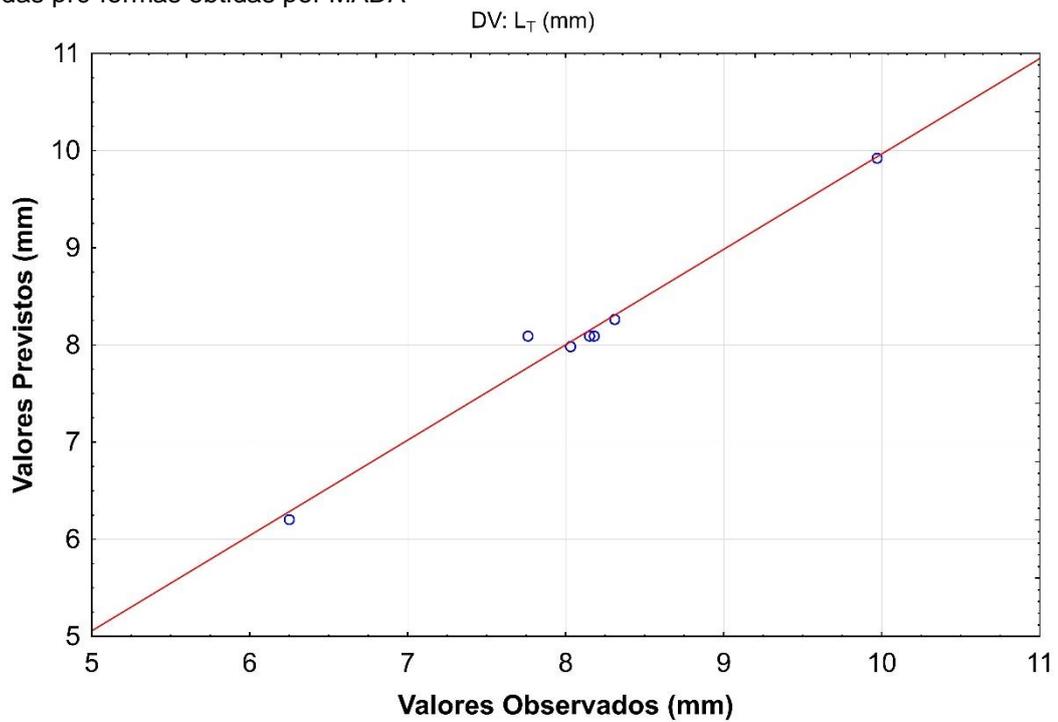
Fonte: O Autor (2023).

Figura 40 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA



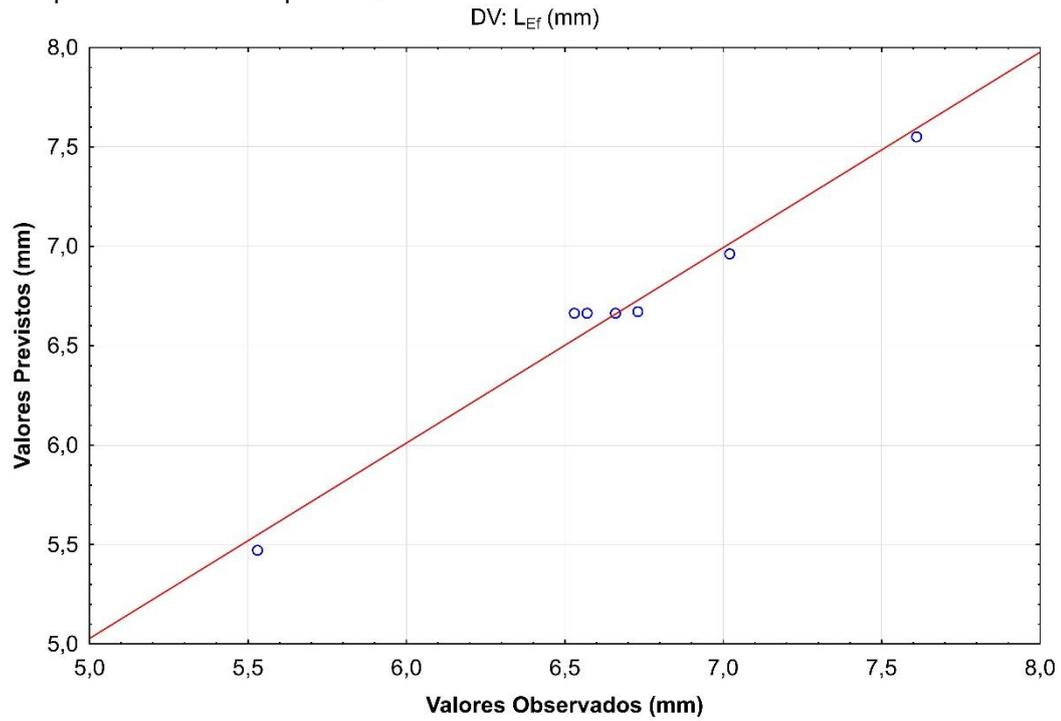
Fonte: O Autor (2023).

Figura 41 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Largura total (L_T) das pré-formas obtidas por MADA



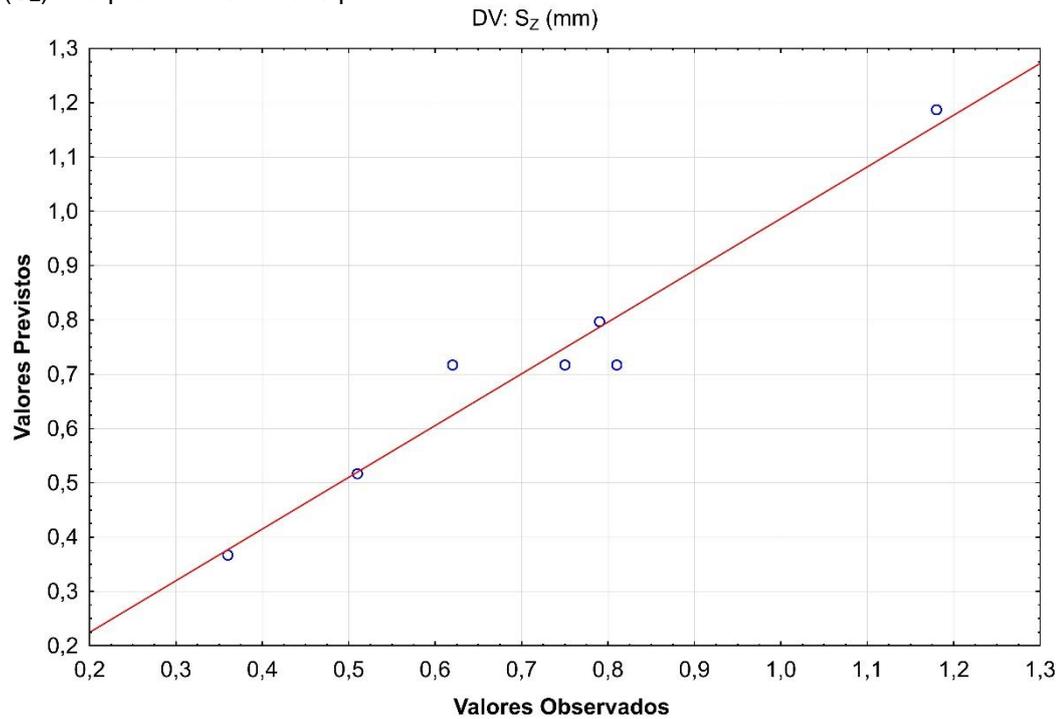
Fonte: O Autor (2023).

Figura 42 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas obtidas por MADA



Fonte: O Autor (2023).

Figura 43 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas obtidas por MADA

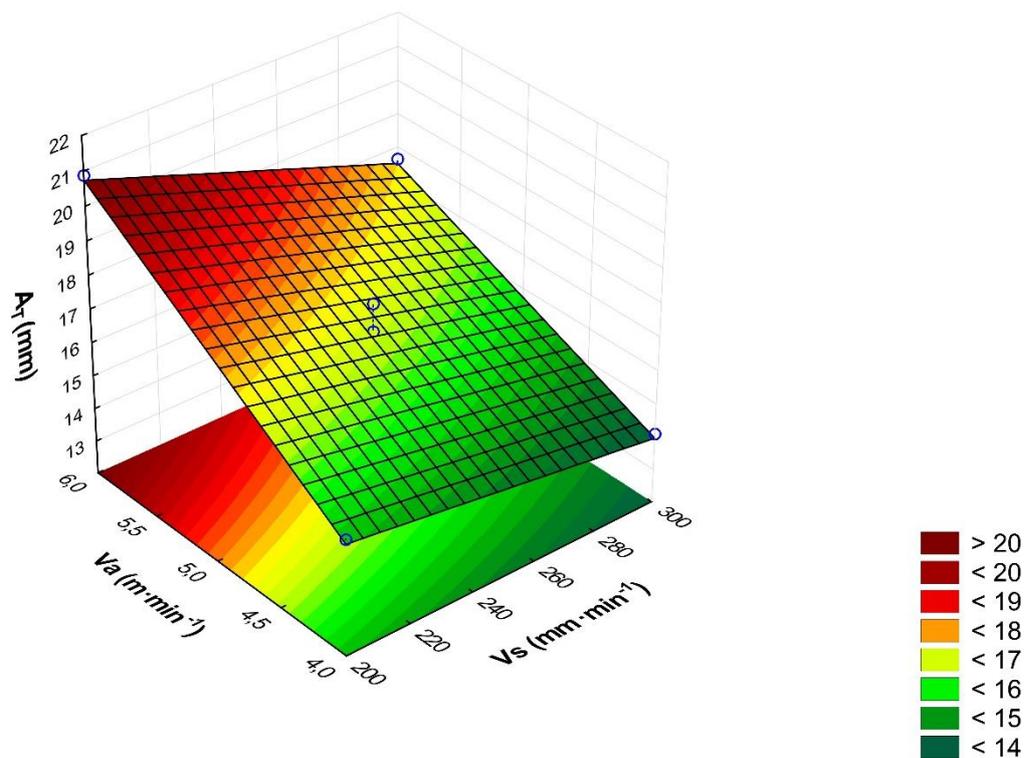


Fonte: O Autor (2023).

4.4.2 Influência dos parâmetros sobre os fatores geométricos das pré-formas

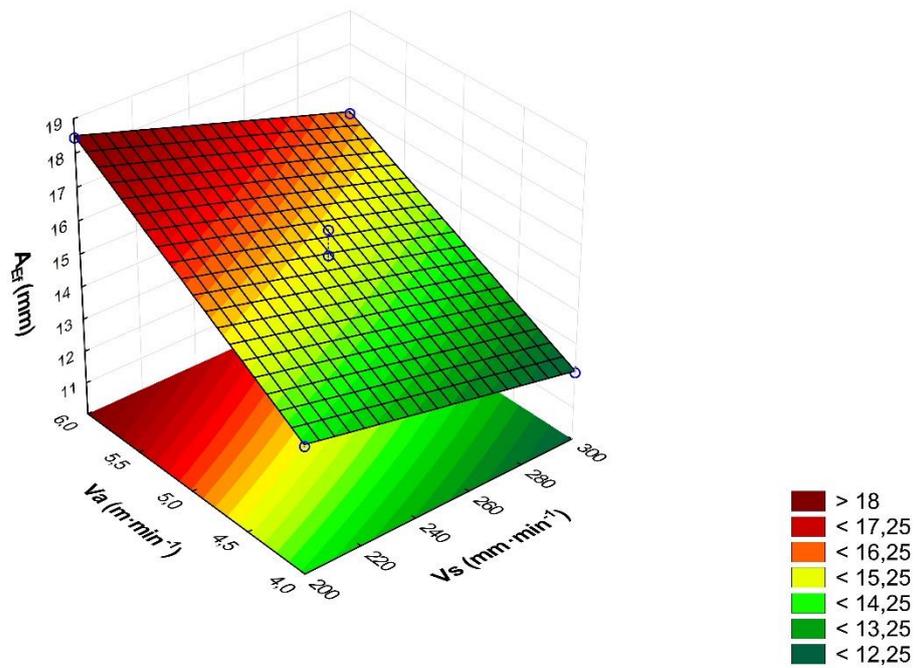
Com vista aos modelos de resposta estatisticamente significativos e ajustados dos fatores A_T , A_{Ef} , L_T , L_{Ef} e S_z , os gráficos de superfície, conforme ilustram as Figuras 44 a 48, apresentam, respectivamente, a influência dos parâmetros de entrada sobre cada fator resposta isoladamente.

Figura 44 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Altura total (A_T) das pré-formas



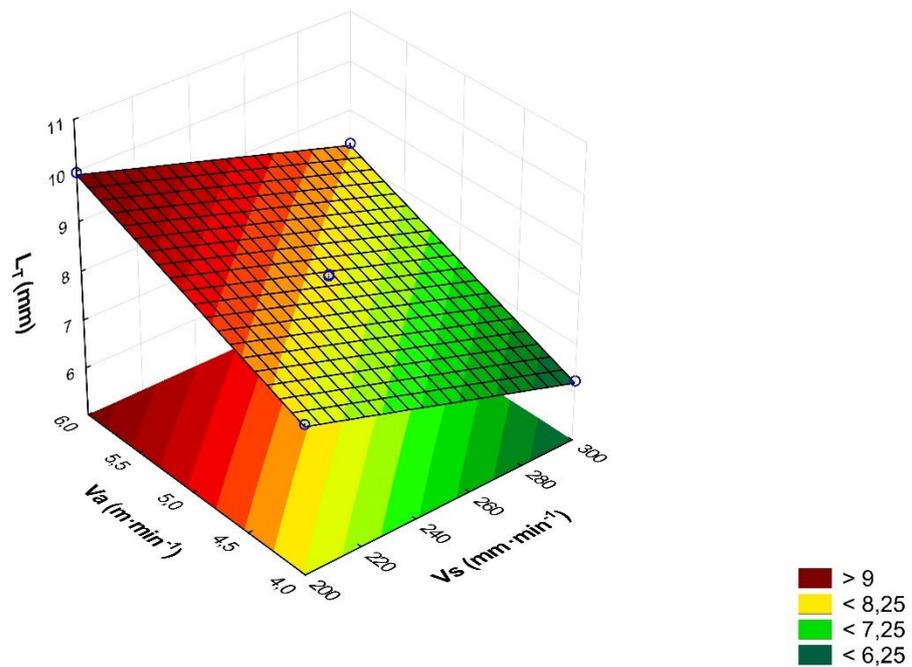
Fonte: O Autor (2023).

Figura 45 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Altura eficaz (A_{Ef}) das pré-formas
DV: A_{Ef} (mm)



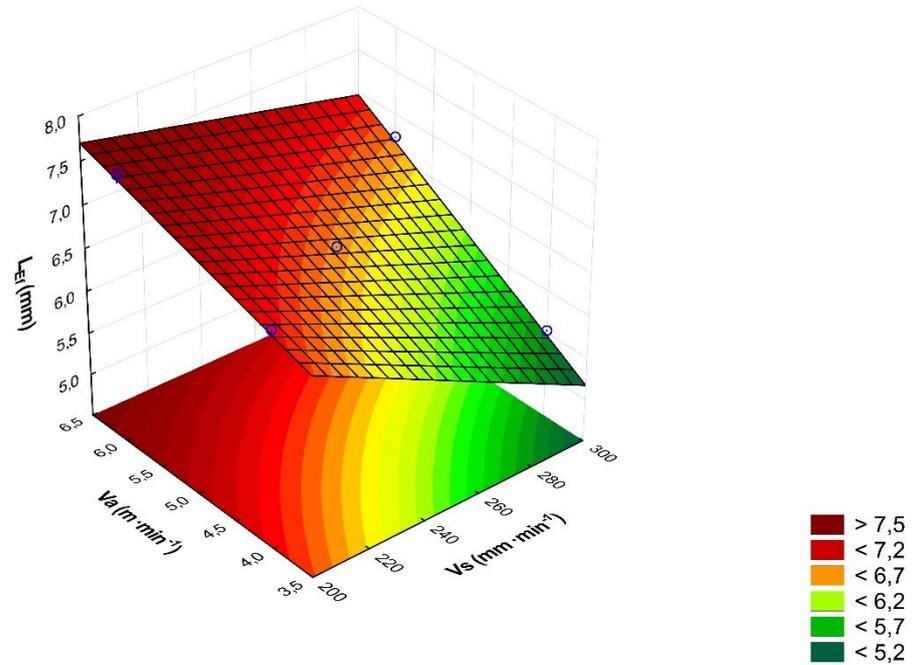
Fonte: O Autor (2023).

Figura 46 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Largura total (L_T) das pré-formas
DV: L_T (mm)



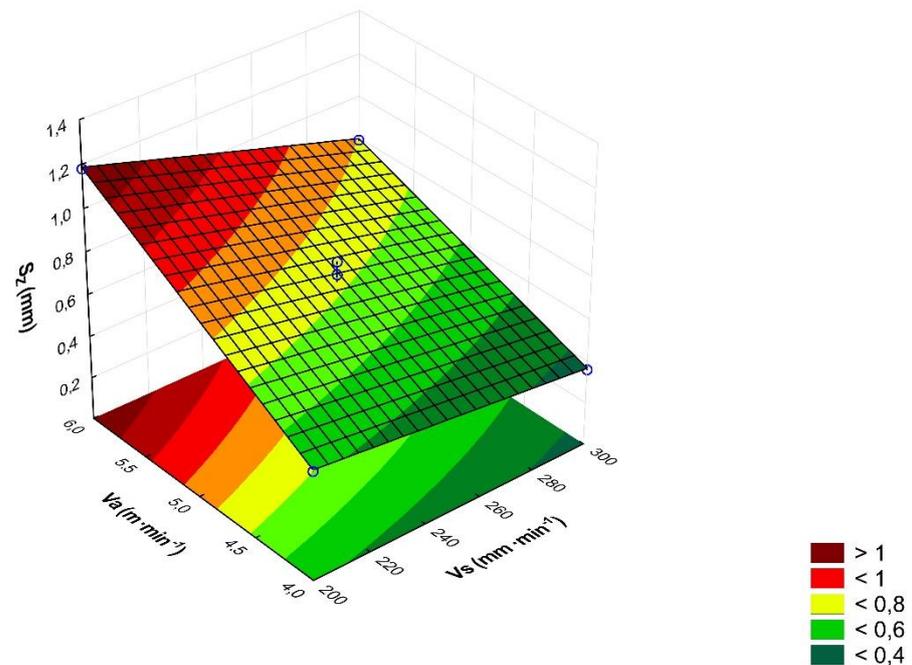
Fonte: O Autor (2023).

Figura 47 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre à Largura eficaz (L_{Ef}) das pré-formas
 DV: L_{Ef} (mm)



Fonte: O Autor (2023).

Figura 48 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre Rugosidade/rejeito (S_z) das pré-formas
 DV: S_z (mm)



Fonte: O Autor (2023).

4.4.3 Teste de Curvatura

Para o planejamento de primeira ordem usado na avaliação das variáveis de resposta dos fatores geométricos das pré-formas, não houve verificação do teste de curvatura por falta de indícios de melhoria. Sendo o teste de curvatura mais indicado na ocorrência de alta sinergia entre fatores independentes, baixo valores de R^2 e $R^2_{ajustado}$ e aspecto curvo em superfície de resposta. O qual não foi observado para o planejamento experimental para as respostas A_T , A_{Ef} , L_T , L_{Ef} e S_z , gerando modelos matemáticos preditivos e bem ajustados.

4.5 MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DAS PRÉ-FORMAS

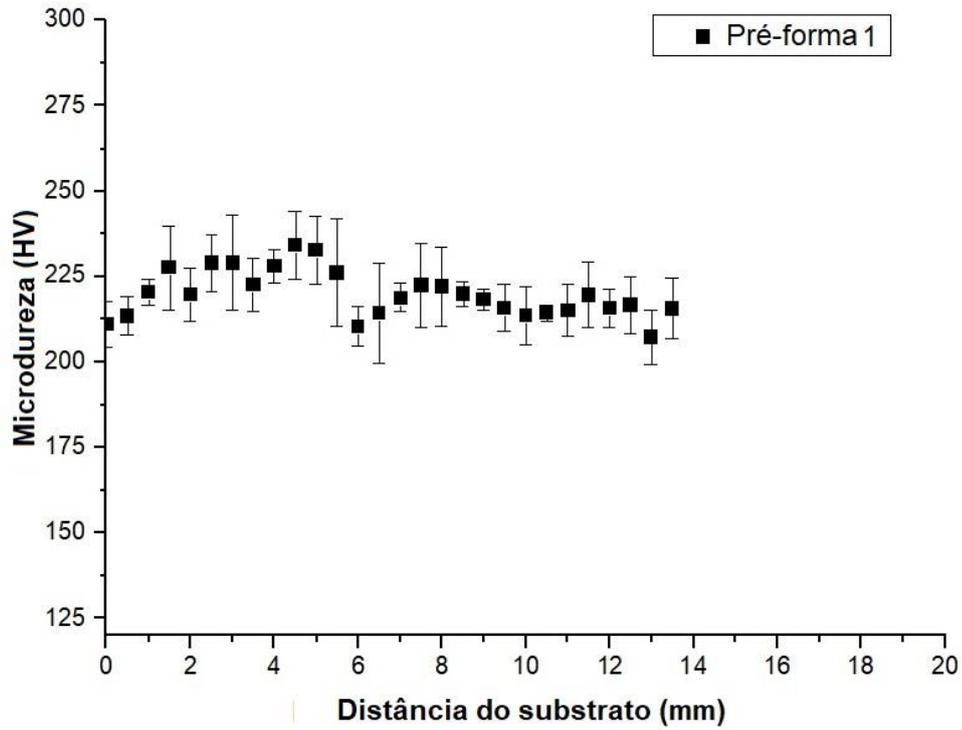
4.5.1 Perfis de Microdureza

Os perfis de dureza transversais ao longo do centro da seção transversal das pré-formas 1, 2, 3 e 4 obtidos por MADA são observadas nas Figuras 49 a 52. Os perfis de dureza das pré-formas metálicas 5, 6 e 7 estão agrupados na Figura 53, já que correspondem a pré-formas obtidas com iguais parâmetros de fabricação do ponto central com o objetivo principal de favorecer a análise estatística.

Na visão macroscópica não foram encontrados defeitos internos de soldagem. No geral, os diferentes perfis de dureza são heterogêneos ao longo da direção de construção, resultando de uma complexa heterogeneidade microestrutural (LYU *et al.*, 2021). As flutuações nos dados de dureza encontrados nas camadas são atribuídas às alterações microestruturais resultantes da história térmica cíclica composta (CCTH) desenvolvido ao longo do processo MADA (NIKAM *et al.*, 2020).

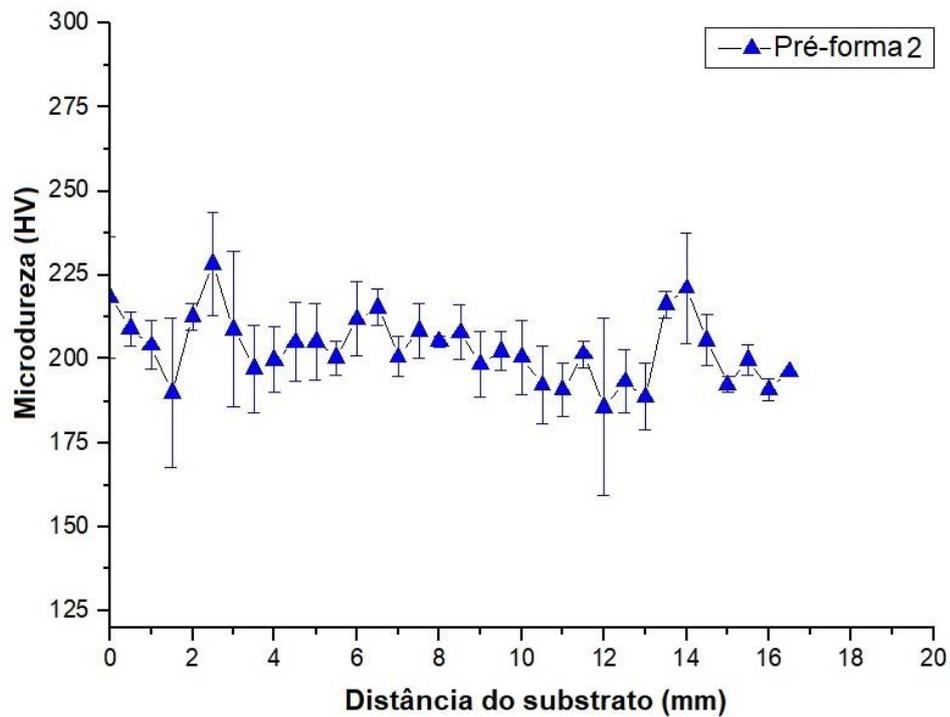
As Figuras 49 e 50 (pré-formas 1 e 2), em comparação com as Figuras 51 e 52 (pré-formas 3 e 4), mostra que os valores médios de dureza nas diferentes camadas da pré-forma não variaram drasticamente, possivelmente devido ao menor valor de V_s utilizado durante a deposição da camada. Os perfis observados, principalmente das pré-formas 3 e 4, apresentam maiores valores de dureza próximos ao substrato, com diminuição na direção de crescimento da pré-forma e aumento na última camada depositada.

Figura 49 - Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 1 de MA de 316L-Si



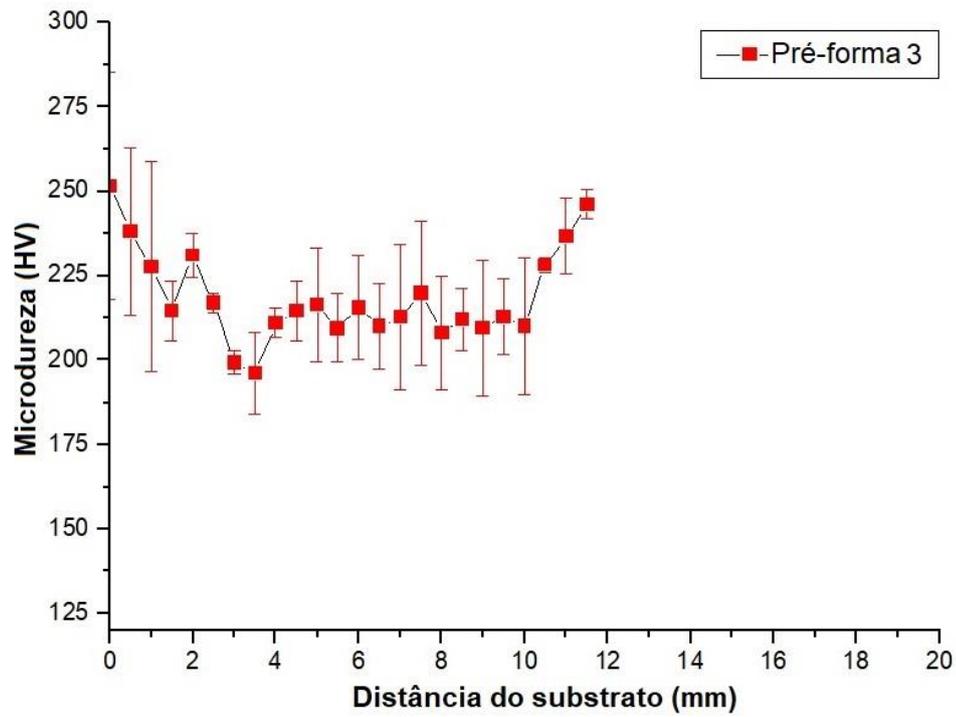
Fonte: O Autor (2023).

Figura 50 - Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 2 de MA de 316L-Si



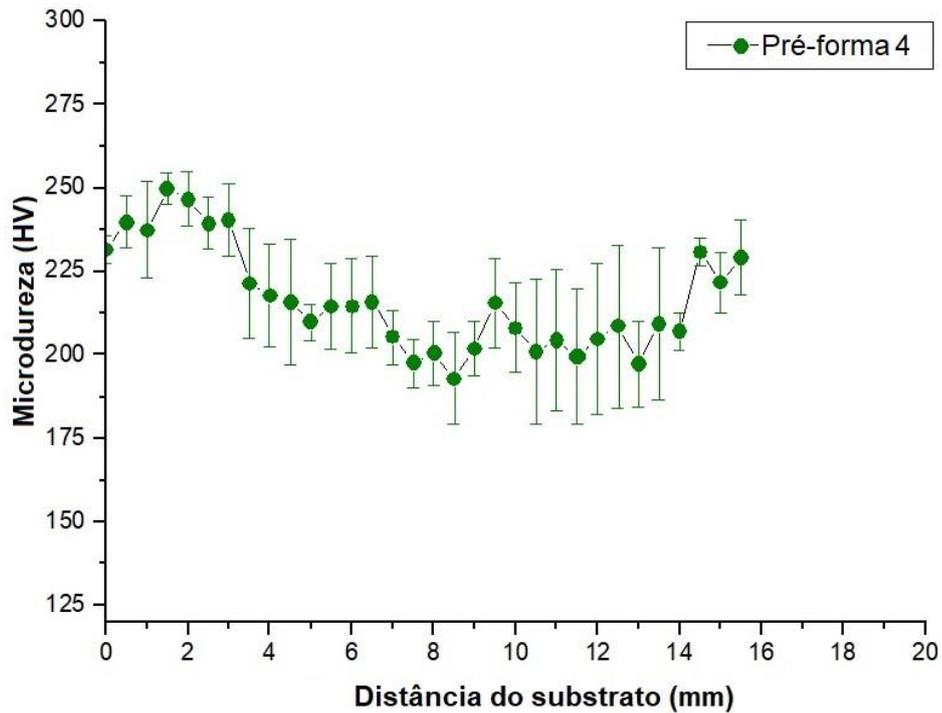
Fonte: O Autor (2023).

Figura 51 - Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 3 de MA de 316L-Si



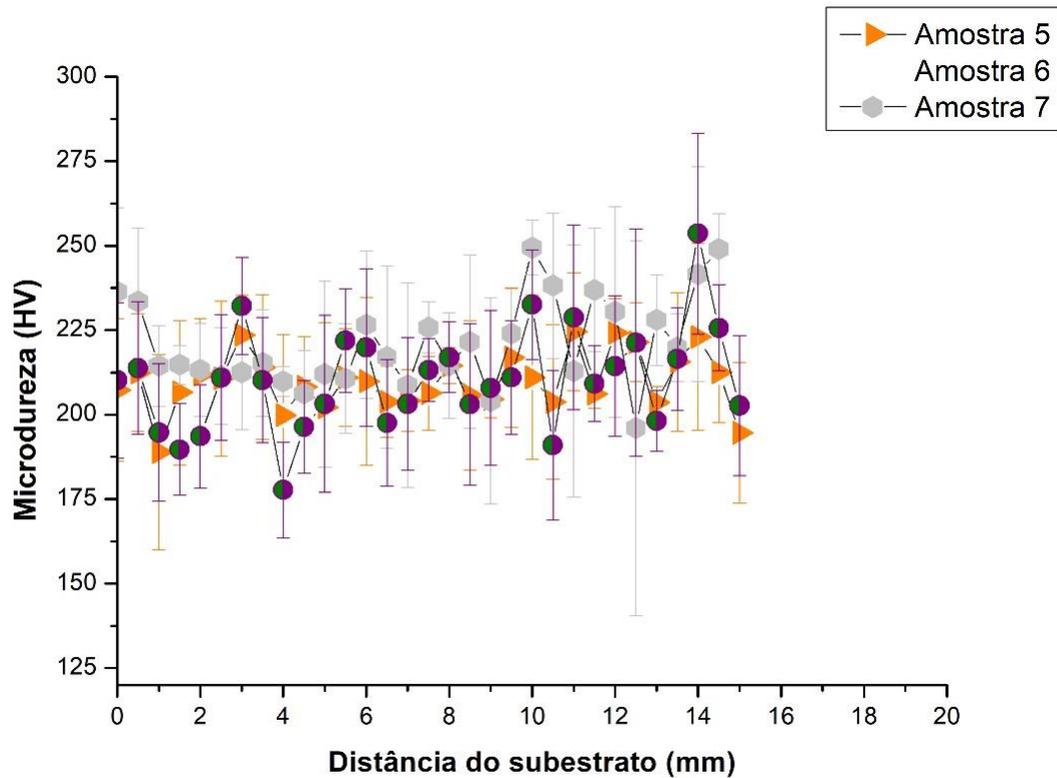
Fonte: O Autor (2023).

Figura 52 - Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal da pré-forma 4 de MA de 316L-Si



Fonte: O Autor (2023).

Figura 53 - Perfil de distribuição de microdureza vickers da seção transversal das pré-formas 5, 6 e 7 de MA de 316L-Si



Fonte: O Autor (2023).

As diferenças nos valores de microdureza dentro da zona de fusão (ZF) podem ser atribuídas a variações na morfologia da fase ferrita. Especificamente, a ferrita do tipo *lathy* está presente nas regiões de interface, enquanto a ferrita do tipo vermicular é observada nas regiões mais internas. Adicionalmente, a taxa de resfriamento afeta significativamente a quantidade efetiva e a morfologia da ferrita, servindo assim como um dos fatores para as variações entre o teor desta fase observado na ZF.

A Tabela 29 apresenta os resultados para a resposta de dureza média relacionadas às pré-formas metálicas obtidas por MADA. De posse desses valores foi realizada uma análise com base na metodologia do planejamento experimental fatorial para encontrar analisar os efeitos dos fatores de controle sobre a dureza em pré-formas obtidas por MADA.

Tabela 29 – Dureza média das pré-formas obtidas por MADA conforme planejamento experimental

Amostra	FATORES DE CONTROLE		VARIÁVEL DE RESP.
	V_s (mm·min ⁻¹)	V_a (m·min ⁻¹)	Dureza média (HV)
1	200 (-1)	4 (-1)	219,83

2	200 (-1)	6 (+1)	203,70
3	300 (+1)	4 (-1)	218,73
4	300 (+1)	6 (+1)	216,07
5	250 (0)	5 (0)	212,13
6	250 (0)	5 (0)	212,77
7	250 (0)	5 (0)	214,44

Fonte: O Autor (2023).

4.5.2 Análise estatística utilizando o Planejamento Fatorial

Com base nos resultados da Tabela 29 realizou-se uma análise estatística de variância e com isso foi calculado o nível de significância “ p ” dos fatores de controle sobre a dureza média. Níveis de significância menores que 0,05 indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que este fator de controle esteja influenciando as variáveis de resposta analisadas. Os valores em vermelho e sublinhados na Tabela 30 representam os fatores estatisticamente significativos. Onde: $V_s * V_a$, representa a interação entre os parâmetros de processo.

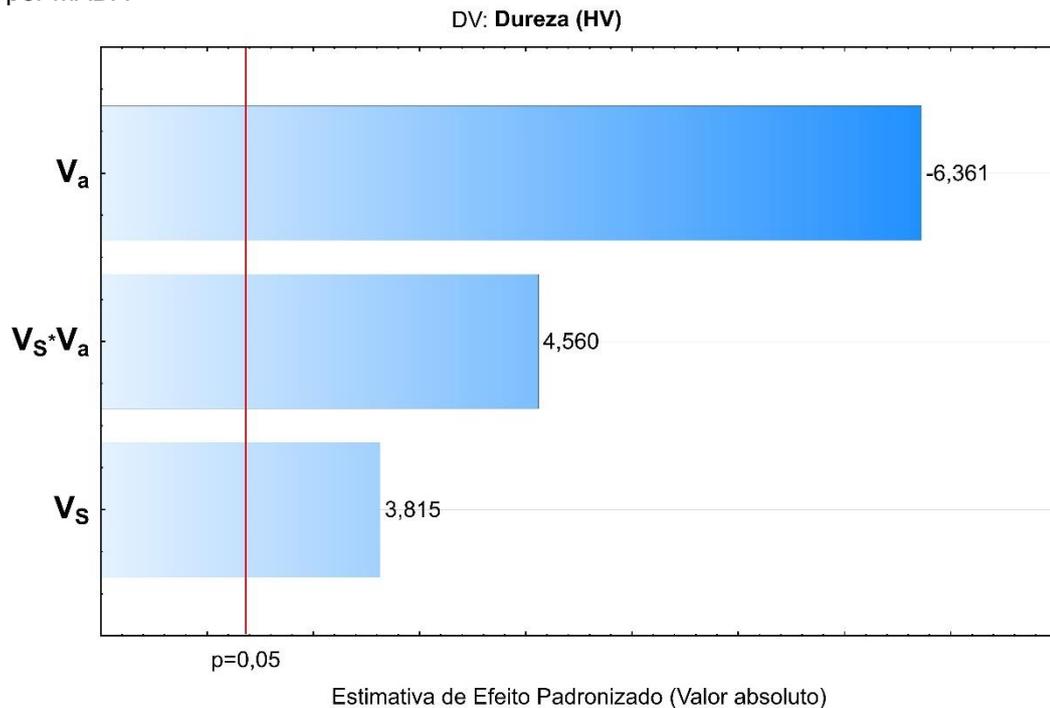
Tabela 30 – Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis de resposta relacionadas à dureza média das pré-formas obtidas por MADA

FATORES DE CONTROLE	Valores de p
	Dureza (HV)
V_s ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	<u>0,031680</u>
V_a ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	<u>0,007863</u>
V_s*V_a	<u>0,019776</u>
R^2	96,19
$R^2_{ajustado}$	92,39
MS Erro Puro	1,422433

Fonte: O Autor (2023).

No Diagrama de Pareto, Figura 54, é possível visualizar que os parâmetros que mais influenciam a média de dureza, são a velocidade de alimentação do arame (V_a) e a interação da V_s com a V_a ($V_s * V_a$). A velocidade de deslocamento da tocha (V_s) também tem influência significativa, porém em menor proporção.

Figura 54 – Diagrama de Pareto de efeitos associados à dureza média das pré-formas obtidas por MADA



Fonte: O Autor (2023).

O modelo matemático empírico, codificado, com seus respectivos parâmetros estatísticos para o HV, está apresentado na Equação 13, onde foram levados em consideração todos os efeitos estatisticamente significativos.

$$HV = 213,9529 + (2,8175 * V_s) - (4,6975 * V_a) + (3,3675 * V_s * V_a) \quad (13)$$

Na Tabela 31 está apresentado o resultado da análise de variância para o LRT, mostrando através do valor de $F_{\text{CALCULADO}}$ que o modelo é estatisticamente significativo e preditivo, pois $4F_{\text{CALCULADO}(R)} > F_{\text{TABELADO}(R)}$, e bem ajustado já que $F_{\text{CALCULADO}(F.A)} < 4F_{\text{TABELADO}(F.A)}$.

Tabela 31 – Análise de variância (ANOVA) para dureza média das pré-formas obtidas por MADA

VARIAÇÕES	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO DA MÉDIA	$F_{\text{CALCULADO}}$
REGRESSÃO	165,3794	3	55,126467	24,8874
RESÍDUOS	6,5451	3	2,215033	1
FALTA DE AJUSTE	3,7002	1	3,7002	1,6705
ERRO PURO	1,422433	2	0,7112165	0,3211
TOTAL	171,9245	6	-	-

$F_{TABELADO, G.L(R); G.L(Res); 95\%} = 9,55;$

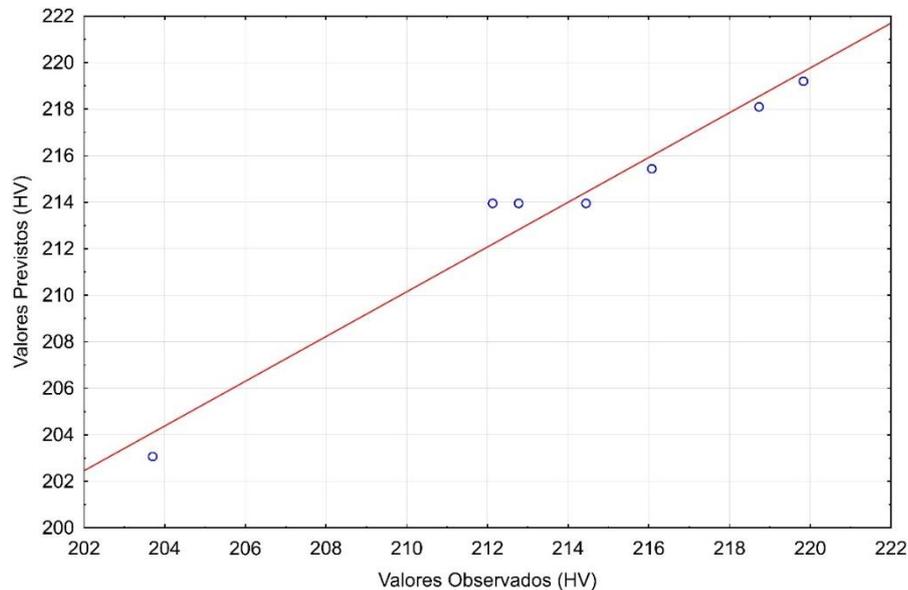
$\& F_{TABELADO, G.L(F.A); G.L(Res); 95\%} = 10,13$ de acordo com RODRIGUES & IEMMA, (2014).

Fonte: O Autor (2023).

Com base nos valores de $F_{CALCULADO}$ pode-se afirmar que o modelo para determinação da dureza média é 'significativo e preditivo' e 'bem ajustado', com 95% de confiabilidade.

Na Figura 55, os valores observados experimentalmente versus os valores preditos pelo modelo associado à dureza média. Observa-se uma boa concordância entre eles, indicado pela aproximação dos pontos com a reta de linearidade em vermelho, como era de se esperar devido os ótimos valores de R^2 e de $R^2_{ajustado}$, obtidos na análise de variância.

Figura 55 – Valores Previstos vs Valores Observados do modelo associado à dureza média das pré-formas obtidas por MADA

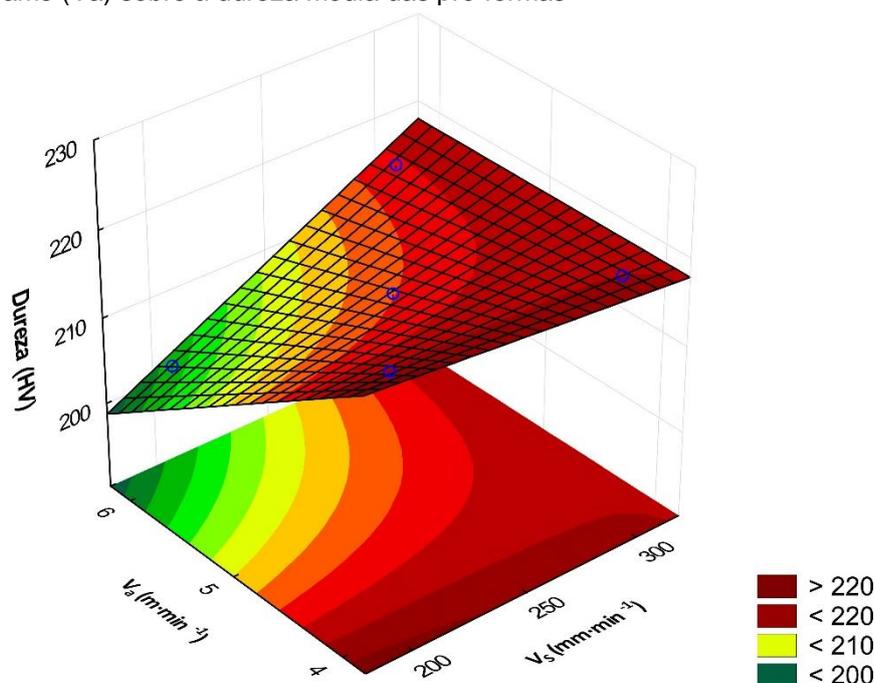


Fonte: O Autor (2023).

4.5.3 Influência dos parâmetros sobre a dureza

O Gráfico de superfície de resposta da Dureza HV pode ser observado na Figura 56.

Figura 56 – Influência da velocidade de descolamento da tocha (V_s) e velocidade de alimentação do arame (V_a) sobre a dureza média das pré-formas



Fonte: O Autor (2023).

4.5.4 Teste de Curvatura

O teste de curvatura foi utilizado para a análise dos valores de resposta da variável Dureza média (HV), devido interação de fatores significante e geometria mais curva observada na superfície de resposta. Os níveis de significância dos fatores de controle e teste de curvatura para a variável resposta “Dureza (HV)” nas pré-fomas obtidas por MADA podem ser observados na Tabela 32.

Tabela 32 – Nível de significância dos fatores de controle e teste de curvatura sobre a variável resposta da dureza média

FONTE DE VARIAÇÃO	Valores de p	
	Dureza (HV)	Dureza (HV) + Curv
<i>Curvatura teste</i>	-	0,248108
V_s ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	<u>0,031680</u>	<u>0,041995</u>
V_a ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	<u>0,007863</u>	<u>0,015736</u>
V_s*V_a	<u>0,019776</u>	<u>0,029957</u>
R^2	96,19	98,35
R^2 ajustado	92,39	95,04
MS Erro Puro	1,422433	1,422433

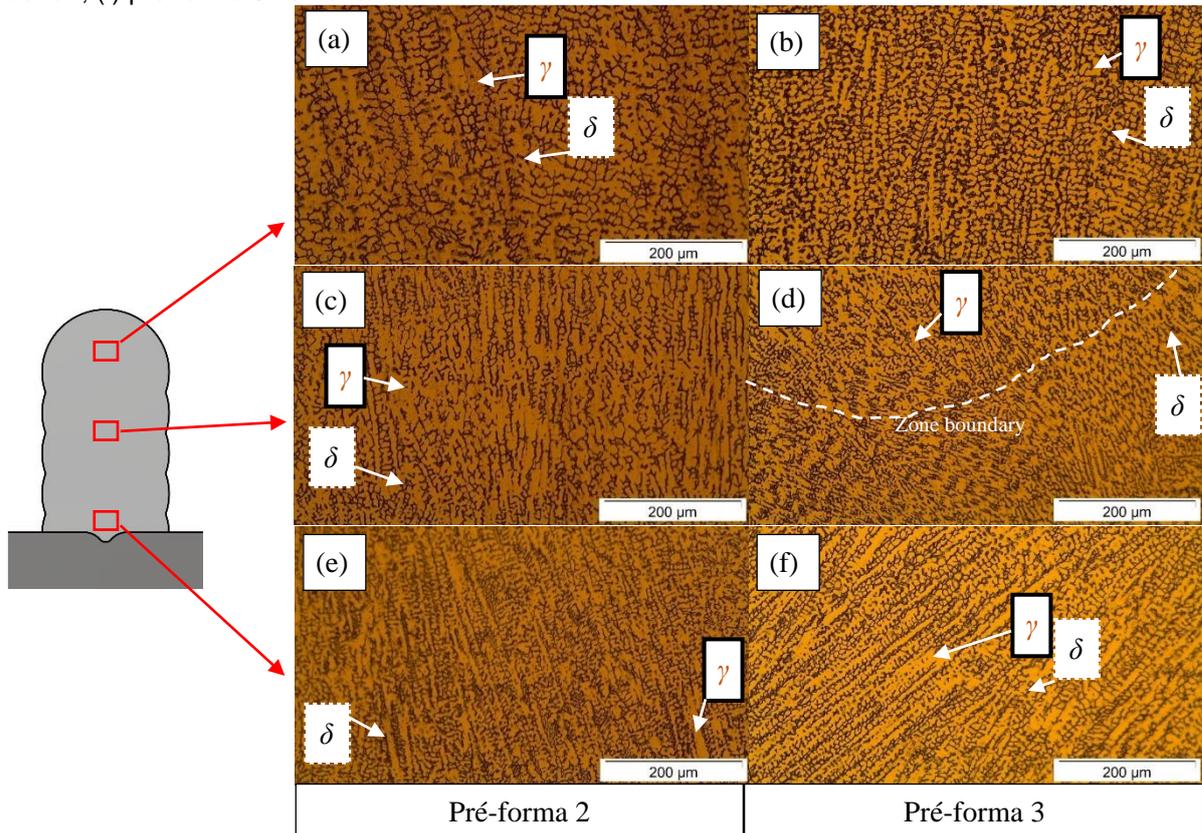
Fonte: O Autor (2023).

Conforme observado na Tabela 32, o teste de curvatura para a variável de dureza não se mostrou significativo, mostrando pequena melhora entre os valores de R^2 e $R^2_{ajustado}$ do planejamento de primeira para o de curvatura em segunda ordem. Nestas condições, para este trabalho, o planejamento em primeira ordem é o mais indicado por necessitar de um menor número de experimentos.

4.5.5 Microestrutura

Para investigação microestrutural, foram caracterizadas e observadas as microestruturas das pré-formas dois e três, devido à combinação dos níveis (baixo-alto e alto-baixo) dos fatores independentes de estudo V_s e V_a . A microestrutura das seções transversais centrais em diferentes regiões da pré-forma dois e da pré-forma três pode ser observada na Figura 57. Para revelar o efeito da combinação de parâmetros em cada pré-forma, foram obtidas microestruturas da mesma camada para fazer uma comparação significativa, sendo observadas, as camadas superior (zona I), central (zona II) e inferior (zona III).

Figura 57 - Microestrutura do 316L-Si obtido por MADA em diferentes zonas: (a) pré-forma 2 na zona III; (b) pré-forma 3 na zona III; (c) pré-forma 2 na zona II; (d) pré-forma 3 na zona II; (e) pré-forma 2 na zona I; (f) pré-forma 3 na zona I



Fonte: O Autor (2023).

A δ -ferrita, observada como microestrutura preta, está distribuída dentro da matriz de austenita (γ), observada em amarelo. Para o aço inoxidável austenítico, existem quatro formas possíveis de solidificação e transformação: os tipos de solidificação A e AF estão relacionados à solidificação da austenita como fase principal, enquanto os tipos FA e F têm a ferrita como fase primária (FU; YANG, 2013b). Para ER316LSi o modo de solidificação é FA. Elmer *et al.* (1989) relataram que as características microestruturais em aços inoxidáveis foram determinadas pelas condições de solidificação e taxa de resfriamento. A formação de uma estrutura celular é favorecida por altas taxas de resfriamento, enquanto o resfriamento mais lento leva predominantemente à formação de uma estrutura AF dendrítica (APOLINARIO *et al.*, 2019). Portanto, embora seja esperado um baixo aporte térmico com a aplicação do GMAW-CCC, a microestrutura de solidificação é colunar-dendrítica. Não é observada formação de estrutura celular equiaxial ou dendrítica. De acordo com Mirshekari *et al.* (2014), a solidificação do tipo FA envolve a solidificação primária da ferrita δ seguida pela transformação $\delta \rightarrow \gamma$, por meio de um processo controlado por difusão. Uma alta

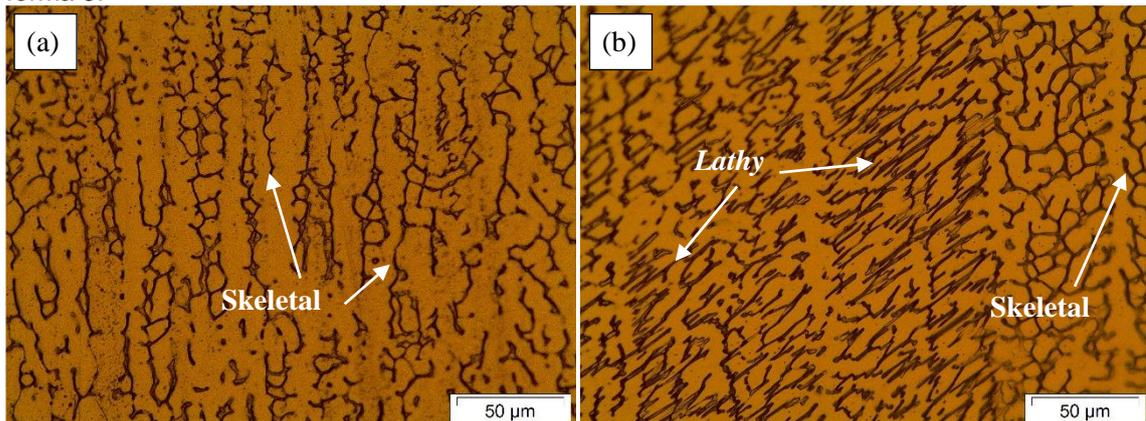
taxa de resfriamento, portanto, não permite tempo suficiente para que a transformação seja concluída, resultando na retenção da ferrita δ primária dentro da zona fundida.

Considerando essas condições durante os depósitos realizados neste trabalho, as variações microestruturais nas pré-formas das amostras foram atribuídas ao CCTH desenvolvido durante o processo MADA, conforme relatado por Kannan *et al.* (2023). É notório que o tamanho da estrutura de solidificação é significativamente afetado pela posição na pré-forma. Em ambas as amostras, a granulometria diminui significativamente da zona I para III. Isto pode ser explicado pelo aumento da taxa de resfriamento nas camadas inferiores, devido ao maior fluxo de calor em direção ao substrato (LE *et al.*, 2021).

Ao comparar a granulometria entre as duas pré-formas, verifica-se que a microestrutura da amostra dois é mais fina do que o esperado. Isso ocorre mesmo que o aporte térmico tenha sido maior para aquela amostra, conforme mostrado na Tabela 3, o que implica que sua taxa de resfriamento deveria ser menor. Para confirmar isso, pode-se avaliar o tamanho dos depósitos (A_{Ef} e L_{Ef}) e a dureza (H_M), que demonstram maior taxa de resfriamento na amostra três.

Ao examinar a microestrutura dos depósitos em maior ampliação, verificou-se que a pré-forma dois era composta de ferrita vermicular (Figura 58a). Na pré-forma três, a maioria também era ferrita vermicular, mas a *ferrita lathy* também estava presente (Figura 8b). Para a solidificação FA, a microestrutura da ferrita pode ser do tipo interdendrítica, vermicular (*skeletal*) ou *lathy* (Lacy). Fu e Yang (2013) descobriram que durante a solidificação da ferrita, Cr e Ni são rejeitados no líquido. O líquido retido transforma-se gradualmente em austenita devido ao seu enriquecimento com o Ni rejeitado. Quando taxas de resfriamento moderadas estão presentes e/ou a relação Cr_{eq}/Ni_{eq} é menor, mas ainda dentro da região FA, a microestrutura é de morfologia vermicular (ou *skeletal*) (LIPPOLD; KOTECKI, 2005), conforme representado na Figura 58a. Para maiores taxas de resfriamento e valores de Cr_{eq}/Ni_{eq} , a morfologia da ferrita é do tipo *lathy*, conforme ilustrado na Figura 58b (FU; YANG, 2013; SAHA; MUKHERJEE; PAL, 2015).

Figura 58 - Microestrutura em x500 da camada intermediária (zona II): (a) Pré-forma 2 e (b) Pré-forma 3.



Fonte: O Autor (2023).

A presença de ferrita aumenta a resistência, mas AghaAli *et al.* [72] também observaram um valor de dureza maior para a placa de ferrita do que para a morfologia vermicular. Silva *et al.* (2009) apoiaram essas descobertas. Assim, a quantidade e as morfologias da ferrita são responsáveis pelas variações nos valores de microdureza. Raut *et al.* (2023) fabricaram corpos de prova por MADA com CMT, usando ER316LSi e encontraram estrutura vermicular em seus depósitos, FN entre 3-8% e dureza variando de 163 (superior) a 206 HV (inferior). Para todas as condições avaliadas neste trabalho, esses valores são inferiores aos relatados. Portanto, as evidências sugerem que o aumento da dureza presente na amostra três se deve ao menor tamanho da microestrutura e à existência de ferrita *lathy*.

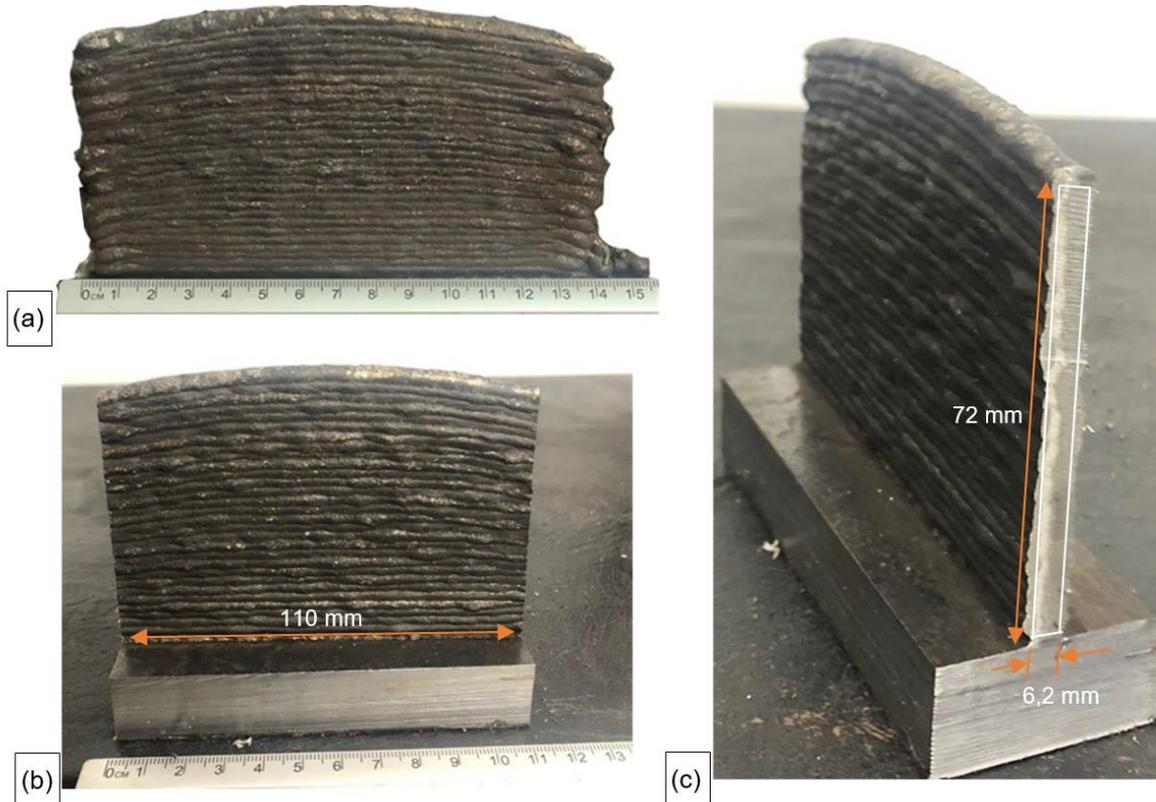
4.6 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PRÉ-FORMA FINAL

Para a produção da pré-forma por MADA usando a técnica de CCC, foi selecionada a combinação de parâmetros que forneceram melhor regularidade de arco, menor IV_{cc} , e maior resolução de fabricação, com menores valores associados de L e R, equivalente a combinação de níveis da pré-forma 3. Desta forma, as deposições de cada camada da pré-forma produzida utilizaram uma combinação de parâmetros composta por SGFR de $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, V_s de $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e V_a de $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

A pré-forma produzida e suas dimensões podem ser observadas na Figura 59.

A Figura 59b mostra a forma original da pré-forma com as trinta deposições, sem limpeza ou outro tipo de tratamento de superfície, descartando as partes inicial e final da peça que mostra instabilidade de deposição. Para além disso, não se observou defeitos visuais por inspeção visual na pré-forma, atendendo, portanto, as expectativas previstas pela seleção dos melhores parâmetros validados pelo depósito de camada única, feita anteriormente. A parede vertical, com comprimento de cerca de 110 mm, constituiu área transversal efetiva de altura medida em 72 mm e largura de 6,2 mm.

Figura 59 - (a) Macro morfologia da pré-forma obtida por GMAW-CCC, (b) Morfologia da pré-forma com as extremidades descartadas, (c) Corte transversal da pré-forma obtida.



Fonte: O Autor (2023).

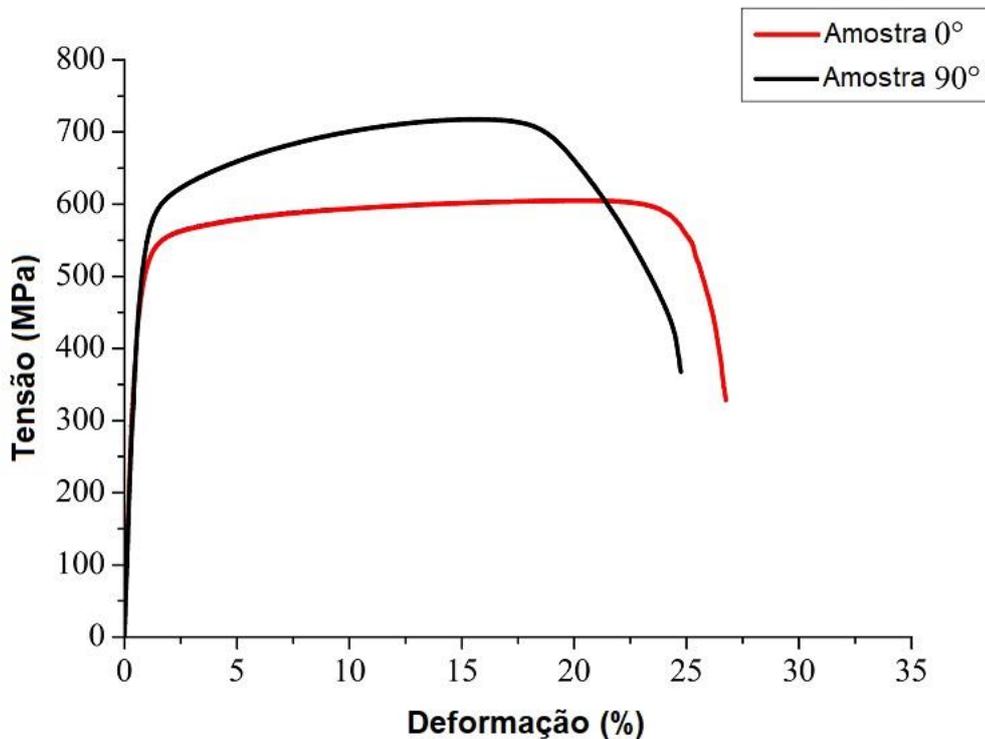
4.6.1 Resistência à Tração

As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração uniaxial dos corpos de prova retirados na horizontal e vertical, denominados sample 0° e 90° , respectivamente, podem ser vistas na Figura 60. Em detalhes, a Figura 60 mostra o limite de escoamento (LE), o limite de resistência à tração (LRT) e a deformação até a fratura do aço estudado (DEF), de acordo com a orientação de retirada dos corpos

de prova. Conforme observado pela literatura (CAIN *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2019a), essas propriedades são determinadas principalmente pela direção de deposição, que causa o crescimento ascendente dos cristais colunares grossos, levando à anisotropia.

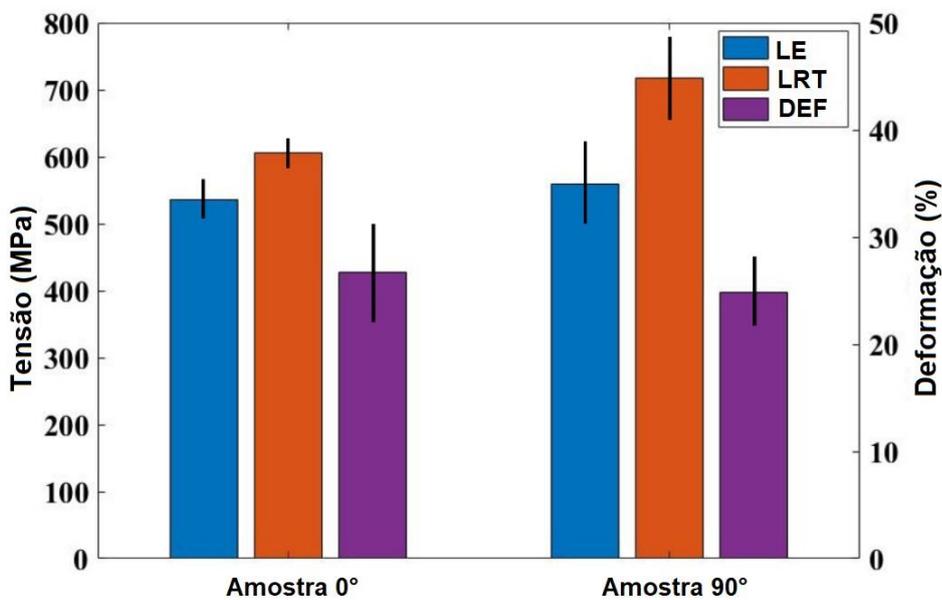
Observa-se que resistência à tração da amostra 90° (vertical) é significativamente maior do que a amostra 0° (horizontal) correspondente à parede depositada, em que a vertical mostrou seu LRT em cerca de 720 MPa, enquanto a horizontal para esta seu limite estava em cerca de 600 MPa. Para o alongamento, foi exatamente o oposto: a amostra vertical mostrou menor área de plasticidade em comparação à amostra horizontal. Esse mesmo mecanismo de comportamento para tensão e deformação de corpos de prova retirados de forma horizontal e vertical à direção de deposição em pré-formados por MADA também foi apresentado por (WANG *et al.*, 2020a; WU *et al.*, 2019a; XIE *et al.*, 2020). A deformação até a ruptura apresentada sample 0° e 90° foi de, respectivamente, 26,75% e 24,82%. Em termos comparativos, o LE não foi sensivelmente discrepante entre as amostras retiradas de diferentes orientações, apresentando uma diferença inferior a 5% para a amostra 90° em comparação com a de 0°, enquanto que para o LRT, comprovou-se a sua anisotropia pré-formados em MADA, uma vez que seu valor para a amostra 90° foi cerca de 20% superior ao da amostra 0°, como observado nas curvas tensão-deformação na Figura 60, onde se mostram os valores médios de LE, de resistência e deformação horizontais e verticais, conforme a legenda das amostras.

Figura 60 - Curvas de tensão-deformação de engenharia dos espécimes de tração amostra 0° e 90°



Fonte: O Autor (2023).

Figura 61 - Histograma de propriedades mecânicas de tensão das amostras retiradas a 0° e 90°



Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados, em termos de patamar de valores absolutos, apresentados para o LE e o LRT estão em concordância aos apresentados pela literatura em pré-formados fabricados a partir do aço inoxidável 316L, através do processo GMAW (LONG *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2020a, 2022). Ao comparar o comportamento da curva tensão-deformação para os corpos de prova retirados horizontal e verticalmente, observou-se disparidade com relação as características das curvas tensão-deformação em algumas discussões (Wang *et. al* 2021, WANG *et al.*, 2020a) mostrou que as amostras retiradas verticalmente apresentavam menores valores de LRT e baixíssimos valores de deformação, em comparação com as retiradas no sentido de deposição (horizontal). Ao estudar a microestrutura e propriedades de tração do aço inoxidável 316L fabricado por MADA-CMT, em diversas orientações de retirada de corpo de prova. LONG *et al.*, (2021) mostrou resultados semelhantes, ao avaliar o efeito de parâmetros do processo MADA-CMT sobre a microestrutura e propriedades de tração do aço inoxidável 316L nas orientações vertical e horizontal de retirada do corpo de prova, no plano de deposição dos cordões. De forma também similar, WANG *et al.*, (2022) mostrou comportamento das curvas tensão-deformação, conforme o descrito inicialmente, ao avaliar o efeito da temperatura de tratamento térmico na microestrutura e propriedades de tração de pré-formados de aço inoxidável 316L fabricados por MADA-CMT, com corpos de provas retirados a partir das orientações vertical e horizontal ao sentido de deposição dos cordões.

Por outro lado, outros estudos discutiram o comportamento das curvas tensão-deformação, em função da orientação de retirada dos corpos de prova de tração, e que está de acordo com o encontrado no presente estudo. XIE *et al.*, (2020) mostrou que as amostras retiradas da orientação vertical apresentaram maiores valores de LRT em comparação as de orientação horizontal, ao estudar o efeito de diferentes parâmetros de processo CMT+P em pré-formados de aço inoxidável 316L sobre a macromorfologia, microestrutura, dureza e propriedades de tração. De forma análoga, WU *et al.*, (2019a) também mostrou resultados de LRT, na curva de tensão-deformação, que favoreciam as amostras retiradas na orientação vertical, em comparação ao do sentido de deposição, ao avaliar os parâmetros do processo na microestrutura e propriedades mecânicas de paredes finas de aço inoxidável 316L fabricadas por *speed-cold-welding AM*.

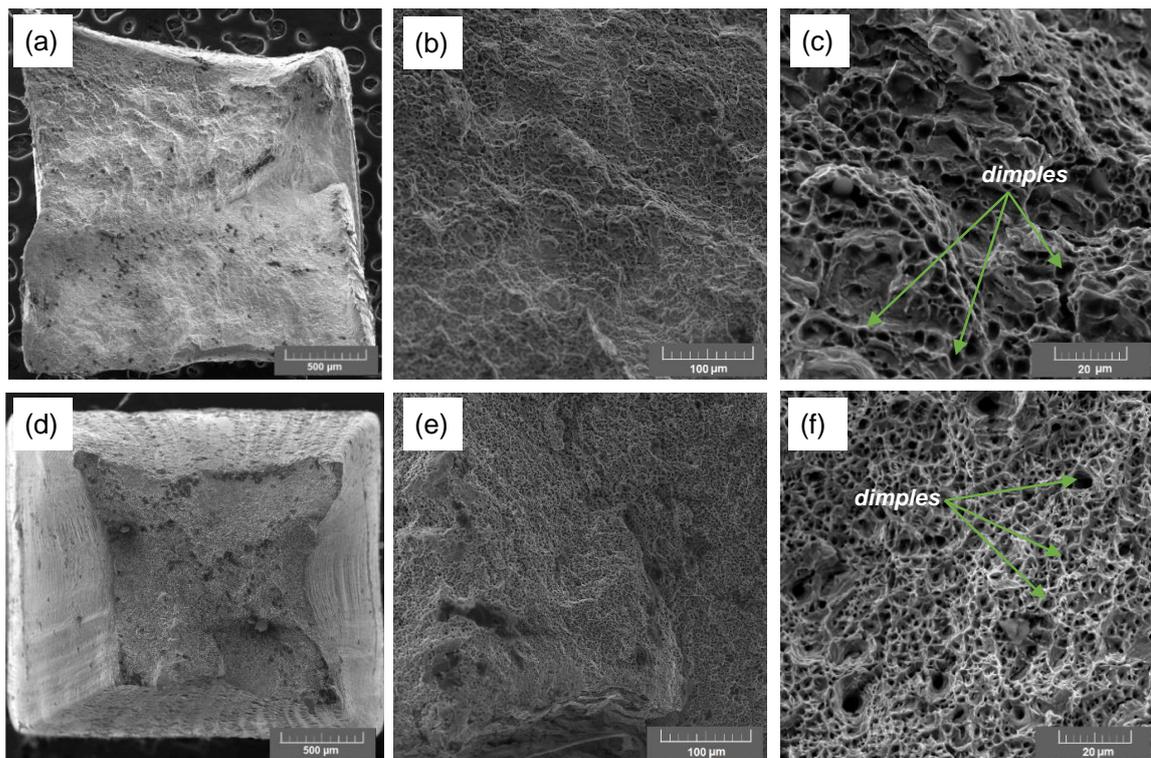
No que diz respeito a outros métodos de fabricação, a resistência à tração do 316L da pré-forma fabricada pelo processo MADA-CCC foi maior do que a obtida para

o 316L fundido (552 MPa) e laminado a quente (480 MPa) (VILLANUEVA *et al.*, 2006), independente da orientação de retirada do corpo de prova e, portanto, atende os mínimos requisitos industriais, embora LRT ter apresentado anisotropia conforme descrito anteriormente. De maneira geral, a seleção e utilização das melhores condições para os parâmetros de depósito, tendo em vista o processo MADA por GMAW-CCC, permitiu que as amostras retiradas verticalmente (amostra 90°) apresentassem valores de LRT superiores ao das retiradas horizontalmente (amostra 0°), e valores de deformação até a fratura comparáveis entre si.

4.6.2 Fractografia

Análises fractográficas detalhadas usando MEV em superfícies fraturadas por tração na direção vertical e na direção horizontal podem ser vistas na Figura 61, em ampliações de 30X, 500X e 2000X.

Figura 62 - Análise fractografica via MEV: (a) amostra 0° 30x, (b) amostra 0° 500x, (c) amostra 0° 2000x, (d) amostra 90° 30x, (e) amostra 90° 500x, (f) amostra 90° 2000x.



Fonte: O Autor (2023).

A partir das morfologias microscópicas das fraturas por tração das amostras depositadas analisadas via MEV, apresentadas na Figura 61, observa-se um grande número de *dimples* nas fraturas de todos os espécimes. No processo de tração, a tensão foi distribuída uniformemente em toda a superfície de fratura e os microporos cresceram uniformemente em três direções, formando *dimples*, em diferentes escalas. Além disso, observou-se as bordas marcadas ao redor dos *dimples*, indicando que a deformação plástica era suficiente para que, no geral, a análise da fratura pudesse revelar características típicas de fratura dúctil, conforme indicado por WU *et al.*, (2019a).

5 CONCLUSÕES

Através do planejamento experimental fatorial foi possível obter diferentes modelos matemáticos de resposta para análise dos fatores de estudo em depósitos simples e pré-formas metálicas em um aço inoxidável austenítico 316LSi. Os modelos matemáticos obtidos foram estatisticamente significativos, preditivos e bem ajustados, com altos valores de R^2 de e $R^2_{Ajustado}$. Mostrando-se uma ferramenta útil e eficiente para a avaliação da influência dos parâmetros de deposição na fabricação de peças por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA).

O modo de transferência metálica por Curto-Circuito Controlado (CCC), adaptando uma fonte de soldagem GMAW, para utilização da MADA, mostrou-se uma técnica promissora na obtenção de depósitos e pré-formas metálicas aço AISI 316L-Si. Permitindo a obtenção de formas com acabamento aceitável e baixo valor de diluição entre camadas depositadas, quando comparado as técnicas convencionais de transferência metálica empregadas na MADA, conforme literatura atual.

A verificação da regularidade do arco na transferência metálica do aço 316LSi por CCC, mediante emprego e cálculo do índice IV_{CC} , mostrou ser uma ferramenta de efetiva funcionalidade para seleção e adequação de melhores parâmetros na obtenção de depósitos e pré-formas metálicas de maior qualidade e com ausência de defeitos, confirmada pelas análises macro e microestruturais, ensaios de dureza e tração. Deposições com menores valores de IV_{CC} permitiram obtenção de depósitos com menores valores de largura, indicando melhor combinação para deposições com maiores resoluções de impressão, indicando maior resolução na fabricação de componentes por MADA.

Os perfis heterogêneos de microdureza oriundas de uma complexa heterogeneidade microestrutural devido aos diferentes ciclos térmicos em função dos diferentes parâmetros de deposição e da região da pré-forma. Amostras de pré-formas fabricadas com menores velocidade de arame, $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, apresentaram perfil menos regular de distribuição de dureza.

A redução da entrada de calor e maior taxa de resfriamento, imposta pela associação de uma menor velocidade de alimentação de $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ e maior velocidade de deslocamento de tocha de $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, resultam na diminuição do gradiente de temperatura da poça de fusão. O que gerou uma estrutura de solidificação dendrítica

de grãos colunares finos, que proporcionou valores quantitativamente adequados de propriedades mecânicas para peças e chapas de aço 316LSi.

No que confere às propriedades mecânicas de tração das amostras retiradas da pré-forma obtidas por GMAW-CCC, observou-se comportamento anisotrópico para o limite de resistência (LRT), de modo que as amostras verticais apresentaram resultado superior às horizontais e, de uma maneira geral, equivalentes aos valores demonstrados pela literatura para o aço 316L utilizando o GMAW-CMT.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propostas para trabalhos futuros:

- Otimização dos parâmetros do modo de transferência metálica do CCC, a fim de melhorar o fluxo de material e controle de calor, possibilitando alcançar melhores valores de acabamento superficial em pré-formas obtidas por MADA;
- Aplicação de tratamentos térmicos (TT) em peças fabricadas por MADA, a fim de reduzir a anisotropia e avaliar seu efeito nas propriedades mecânicas e microestrutura;
- Desenvolvimento e implementação de Inteligência Artificial (IA) no monitoramento assistido por termografia e avaliação dos ciclos térmicos, a fim de verificar e relacionar efeitos de aquecimento, e a geração de defeitos, em função da variação dos parâmetros do processo.

REFERÊNCIAS

- ABE, H.; WATANABE, Y. Low-temperature aging characteristics of type 316L stainless steel welds: dependence on solidification mode. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 39, p. 1392–1398, 2008.
- AGHAALI, I.; FARZAM, M.; GOLOZAR, M. A.; DANAEI, I. The effect of repeated repair welding on mechanical and corrosion properties of stainless steel 316L. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 54, p. 331–341, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2013.08.052>. Acesso em: 26 out. 2023.
- ALIMARDANI, M.; FALLAH, V.; IRAVANI-TABRIZIPOUR, M.; KHAJEPOUR, A. Surface finish in laser solid freeform fabrication of an AISI 303L stainless steel thin wall. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 1, p. 113–119, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2011.08.012>. Acesso em: 9 set. 2023.
- AL-MAMUN, N. S.; DEEN, K. M.; HAIDER, W.; ASSELIN, E.; SHABIB, I. Corrosion behavior biocompatibility of additively manufactured 316 L stainless steel in a physiological environment: the effect of citrate ions. **Additive Manufacturing**, v. 34, p. 101237, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101237>
- APOLINARIO, L. H. R.; WALLERSTEIN, D.; MONTEALEGRE, M. A.; URTIGA FILHO, S. L.; TORRES, E. A.; HERMENEGILDO, T. F. C.; SANTOS, T. F. A. Predominant Solidification Modes of 316 Austenitic Stainless Steel Coatings Deposited by Laser Cladding on 304 Stainless Steel Substrates. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 50, n. 8, p. 3617–3628, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05293-y>
- ARAI, T.; KOBAYASHI, M.; YAMADA, T.; ROKUJYO, M.; HIRAKOSO, K.; KANEKO, T. The Investigation of Arc Phenomena by means of A Computer. **QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY**, v. 1, n. 3, p. 317–322, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.2207/qjws.1.317>
- ARASAPPAN, R.; SHANMUGAM, N.; VASU, R.; MURUGESAN, V. Insight into the microstructural features and corrosion properties of Wire Arc Additive Manufactured Super Duplex Stainless Steel (ER2594). **Materials Letters**, v. 270, p. 127680, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127680>
- ASTM. **ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0008>
- BELHADJ, M.; KROMER, R.; WERDA, S.; DARNIS, P. **Effect of Cold Metal Transfer-Based Wire Arc Additive Manufacturing parameters on geometry and machining allowance**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2169173/v1>
- BUCHANAN, C.; GARDNER, L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. **Engineering**

Structures, v. 180, p. 332–348, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.11.045>. Acesso em: 22 ago. 2023.

CADIOU, S.; COURTOIS, M.; CARIN, M.; BERCKMANS, W.; LE MASSON, P. 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam). **Additive Manufacturing**, v. 36, n. August, p. 101541, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101541>

CAIN, V.; THIJS, L.; VAN HUMBEECK, J.; VAN HOOREWEDER, B.; KNUTSEN, R. Crack propagation and fracture toughness of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting. **Additive Manufacturing**, v. 5, p. 68–76, 2015. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.12.006>

CHEN, C.; FAN, C.; CAI, X.; LIN, S.; YANG, C. Effects of ultrasonic energy on short-circuiting transfer process in PU-GMA welding. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 34, n. 11, p. 1225–1231, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1628257>

CHEN, C.; HE, H.; ZHOU, J.; LIAN, G.; HUANG, X.; FENG, M. A profile transformation based recursive multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Journal of Manufacturing Processes**, v. 84, p. 886–901, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.042>

CHEN, J.; WEI, H.; BAO, K.; ZHANG, X.; CAO, Y.; PENG, Y.; KONG, J.; WANG, K. Dynamic mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by an additive manufacturing process. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 11, p. 170–179, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.097>

COSTA, T. F.; FILHO, E. B.; AREVALO, H. D. H.; VILARINHO, L. O. **Assessment of Conventional and Controlled Short-Circuit MIG/MAG Processes for Steel-Pipe Welding in Single PassOut/Dez.** [S. l.: s. n.].

COSTA, T. F.; MOTA, C. P. Correlação entre o Aspecto Superficial do Cordão e a Regularidade da Transferência Metálica por Curto-Circuito para a Soldagem MIGMAG de Aços Inoxidáveis Austenítico e Duplex.pdf. **XL CONSOLDA**, p. 12, 2014.

CUNHA, H. M. **CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS CARBONO E AÇOS INOXIDÁVEIS UTILIZANDO ARAME AWS E309L T1-1.** 2016. - UNESP, [s. l.], 2016.

DA SILVA, M. M.; BATISTA, V. R.; MACIEL, T. M.; DOS SANTOS, M. A.; BRASILEIRO, T. L. Otimização de parâmetros do processo de soldagem arco submerso para revestimentos anticorrosivos. **Soldagem e Inspeção**, v. 21, n. 1, p. 115–124, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2101.11>

DEBROY, T.; WEI, H.; ZUBACK, J.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.; MILEWSKI, J. O.; BEESE, A.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112– 224., 2018 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

DEBROY, T.; WEI, H.; ZUBACK, J.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.; MILEWSKI, J. O.; BEESE, A.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112– 224., 2018 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

DE MENESES, V. A.; GOMES, J. F. P.; SCOTTI, A. The effect of metal transfer stability (spatter) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 7, p. 1388–1397, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.012>

DUTRA, J.; SILVA, R.; MARQUES, C. **Características de Fusão e Potência de Soldagem com a Transferência MIG-CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183**. [S. l.: s. n.].

ELMER, J. W.; ALLEN, S. M.; EAGAR, T. W. Microstructural development during solidification of stainless steel alloys. **Metallurgical transactions A**, v. 20, p. 2117–2131, 1989.

ERA, T.; UEYAMA, T.; HIRATA, Y. Spatter reduction in gas metal arc welding of stainless steel sheets using controlled bridge transfer process. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 14, n. 8, p. 708–716, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/136217109X12518083193595>

FARIAS, F. W. C.; DA CRUZ PAYÃO FILHO, J.; MORAES E OLIVEIRA, V. H. P. Prediction of the interpass temperature of a wire arc additive manufactured wall: FEM simulations and artificial neural network. **Additive Manufacturing**, v. 48, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102387>

FOGLIATTO, A. A. B. **Influência Dos Parâmetros Do Processo Mig/Mag Com Curto- Circuito Controlado Sobre a Geometria Do Cordão De Solda**. 2013. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2013.

FU, J. W.; YANG, Y. S. Solidification behavior in three-phase region of AISI 304 stainless steel. **Materials Letters**, v. 93, p. 18–20, 2013 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2012.11.035>. Acesso em: 23 out. 2023.

FU, J. W.; YANG, Y. S. Origin of the lathy ferrite in AISI 304 stainless steel during directional solidification. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 580, p. 191–194, 2013 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2013.05.107>. Acesso em: 23 out. 2023.

GENTIL, V. C. Corrosão. **Rio de Janeiro-BR**, 2007.

GEORGE, E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery**. [S. l.]: Wiley New York, 2005.

HUANG, S.; LIU, P.; MOKASDAR, A.; LIANG, H. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>

HUSSEIN, N. I. S.; MOHD JMMANI, N. A. N.; AYOF, M. N.; ABD RAHIM, T.; ZAINAL ABIDIN, M. Z.; YUSOF, F.; JAMALUDIN, M. F.; WILLIAMS, S. Simulation of wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel with cold arc gas metal arc welding. **Journal of Applied Engineering Design and Simulation**, v. 1, n. 1, p. 88–96, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24191/jaeds.v1i1.35>

JAVIDI, M.; HAGSHENAS, S. M. S.; SHARIAT, M. H. CO₂ corrosion behavior of sensitized 304 and 316 austenitic stainless steels in 3.5 wt.% NaCl solution and presence of H₂S. **Corrosion Science**, v. 163, p. 108230, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2019.108230>. Acesso em: 13 mar. 2023.

KANNAN, A. R.; PALGUNA, Y.; KORLA, R.; KUMAR, S. M.; PRAMOD, R.; SHANMUGAM, N. S. Hot tensile deformation and fracture behavior of wire arc additive manufactured Hastelloy C-276. **Welding in the World**, v. 67, n. 4, p. 1037–1047, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01462-1>

KUMAR, M.; SINGH, J.; SINGH UPPAL, A. Improvement in corrosion resistance of AISI 316L stainless steel weld cladding using GTA remelting technique. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 3224–3228, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.05.377>. Acesso em: 13 mar. 2023.

KUMAR, V.; RANJAN SAHU, D.; MANDAL, A. Parametric study and optimization of GMAW based AM process for Multi-layer bead deposition. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 255–261, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.223>

LEON, A.; AGHION, E. Effect of surface roughness on corrosion fatigue performance of AISi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting (SLM). **Materials Characterization**, v. 131, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.06.029>

LE, V. T.; MAI, D. S.; DOAN, T. K.; PARIS, H. Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 24, n. 4, p. 1015–1026, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2021.01.009>. Acesso em: 24 ago. 2023.

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

LISKEVYCH, O. **Estudo Da Influência Do Teor De CO₂ Na Regularidade Da Transferência De Metal e Estabilidade Do Processo MIG/MAG**. 2010. - Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2010.

LI, Y.; SU, C.; ZHU, J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. **Results in Engineering**, v. 13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>

LONG, P.; WEN, D.; MIN, J.; ZHENG, Z.; LI, J.; LIU, Y. Microstructure evolution and mechanical properties of a wire-arc additive manufactured austenitic stainless steel:

Effect of processing parameter. **Materials**, v. 14, n. 7, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14071681>

LOTFI, A. H.; NOUROUZI, S. Predictions of the optimized friction stir welding process parameters for joining AA7075-T6 aluminum alloy using preheating system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 9–12, p. 1717–1737, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5963-8>

LYU, Z.; SATO, Y. S.; TOKITA, S.; ZHAO, Y.; JIA, J.; WU, A. Microstructural evolution in a thin wall of 2Cr13 martensitic stainless steel during wire arc additive manufacturing. **Materials Characterization**, v. 182, p. 111520, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2021.111520>. Acesso em: 10 mar. 2023.

MELO, R. H. F.; DOS SANTOS, M. A.; MACIEL, T. M. Avaliação do campo de tensões residuais por difração de raios - X utilizando o método do $\sin^2\psi$ em revestimentos metálicos do aço inoxidável S308-L. **Soldagem e Inspeção**, v. 18, n. 1, p. 50–56, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000100007>

MILEWSKI, J. **Additive Manufacturing of Metals**. [S. l.: s. n.]. v. 258. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4>

MIRSHEKARI, G. R.; TAVAKOLI, E.; ATAPOUR, M.; SADEGHIAN, B. Microstructure and corrosion behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel. **Materials & Design**, v. 55, p. 905–911, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2013.10.064>. Acesso em: 23 out. 2023.

MODENESI, P. J. Soldabilidade dos aços inoxidáveis. **São Paulo, Senai-SP**, p. 21–48, 2001.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2007.

NAVARRO, M.; MATAR, A.; DILTEMIZ, S. F.; ESHRAGHI, M. Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 6, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010003>

NIKAM, P. P.; ARUN, D.; RAMKUMAR, K. D.; SIVASHANMUGAM, N. Microstructure characterization and tensile properties of CMT-based wire plus arc additive manufactured ER2594. **Materials Characterization**, v. 169, p. 110671, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2020.110671>. Acesso em: 10 mar. 2023.

NUNES, E. B.; CAVALCANTE, N. E.; BARRETO, A. S.; SILVA, A. Í. N. da; MOTTA, M. F. Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem na Deposição de Aço Inoxidável Superduplex pelo Processo Plasma Pó. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 2, p. 205–218, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.08>

RAMALHO, A.; SANTOS, T. G.; BEVANS, B.; SMOQI, Z.; RAO, P.; OLIVEIRA, J. P. Effect of contaminations on the acoustic emissions during wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel. **Additive Manufacturing**, v. 51, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102585>

RAUT, L. P.; TAIWADE, R. V.; AGARWAL, A. Investigation of microstructural and corrosion behavior of 316LSi structure developed by wire arc additive manufacturing. **Materials Today Communications**, v. 35, p. 105596, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2023.105596>. Acesso em: 23 out. 2023.

REZENDE, G. M. C. de; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. **Soldag. insp. São Paulo**, v. 16, n. 2, p. 98–103, 2010 a.

REZENDE, G. M. C. de; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. **Soldag. insp. São Paulo**, v. 16, n. 2, p. 98–103, 2010 b.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Experimental Design and Process Optimization**. 1. ed. [S. l.]: CRC Press, 2014.

RON, T.; LEVY, G. K.; DOLEV, O.; LEON, A.; SHIRIZLY, A.; AGHION, E. Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process. **Metals**, v. 9, n. 8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9080888>

SAHA, S.; MUKHERJEE, M.; PAL, T. K. Microstructure, Texture, and Mechanical Property Analysis of Gas Metal Arc Welded AISI 304 Austenitic Stainless Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 24, n. 3, p. 1125–1139, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1374-0>

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. [S. l.]: Artliber, 2014.

SELVI, S. ; VISHVAKSENAN, A. ;; RAJASEKAR, E. Cold metal transfer (CMT) technology-A review. 2018.

SHAH, A.; ALIYEV, R.; ZEIDLER, H.; KRINKE, S. **A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>

SHAHIAND, A. S.; PANDEY, S. Welding current prediction in GMAW and UGMAW processes using response surface methodology. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 3, p. 341–346, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/174329306X113253>

SILVA, B. **Avaliação e aplicabilidade de arame ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**. 2020. - Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.279>

SILVA, C. C.; DE MIRANDA, H. C.; DE SANT'ANA, H. B.; FARIAS, J. P. Microstructure, hardness and petroleum corrosion evaluation of 316L/AWS

E309MoL-16 weld metal. **Materials Characterization**, v. 60, n. 4, p. 346–352, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2008.09.017>. Acesso em: 23 out. 2023.

SILVA, M. M. da; OLIVEIRA, W. C.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A. dos; MOTTA, M. F. Caracterização de Solda de Revestimento de AWS 317L Depositados por GMAW Duplo Arame em Aços ASTM A 516 Gr 60 para Uso na Indústria do Petróleo. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 15, n. 3, p. 225–233, 2019.

SILVA, M. M.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A.; MOTTA, M. F.; LIMA, M. S. S. S. Efeito da energia de soldagem sobre a microestrutura de revestimentos AISI 317L depositados em aços ASTM A516 Gr 60 para aplicação no setor de petróleo e gás. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 2, p. 54–60, 2010.

SOUZA, L. B. O. de. **Correlação entre processos de fabricação convencional e por manufatura aditiva com as propriedades do aço inoxidável 316L**. 2022. - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2022.

TARASOV, S. Y.; FILIPPOV, A. V.; SHAMARIN, N. N.; FORTUNA, S. V.; MAIER, G. G.; KOLUBAEV, E. A. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 803, p. 364–370, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.06.246>. Acesso em: 13 mar. 2023.

TOWNSEND, A.; SENIN, N.; BLUNT, L.; LEACH, R. K.; TAYLOR, J. S. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. **Precision Engineering**, v. 46, p. 34–47, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001>

TRUPPEL, G. H.; ANGERHAUSEN, M.; PIPINIKAS, A.; REISGEN, U.; DOS SANTOS PAES, L. E. Stability analysis of the Cold Metal Transfer (CMT) brazing process for galvanized steel plates with ZnAl4 filler metal. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 5–8, p. 2485–2494, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03702-5>

VILLANUEVA, D. M. E.; JUNIOR, F. C. P.; PLAUT, R. L.; PADILHA, A. F. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex. **Materials Science and Technology**, v. 22, n. 9, p. 1098–1104, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/174328406X109230>

WANG, C.; LIU, T. G.; ZHU, P.; LU, Y. H.; SHOJI, T. Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 796, n. June, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140006>

WANG, C.; LIU, T. G.; ZHU, P.; LU, Y. H.; SHOJI, T. Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing. **Materials Science and Engineering A**, v. 796, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140006>

WANG, C.; ZHU, P.; LU, Y. H.; SHOJI, T. Effect of heat treatment temperature on microstructure and tensile properties of austenitic stainless 316L using wire and arc additive manufacturing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 832, n. November 2021, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142446>

WANG, L.; WU, C. S.; GAO, J. Suppression of humping bead in high speed GMAW with external magnetic field. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 21, p. 1362171815Y.000, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000074>

WANG, L.; XUE, J.; WANG, Q. Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 751, p. 183–190, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.078>

WANG, P.; NAI, M. L. S.; TAN, X.; SIN, W. J.; TOR, S. B.; WEI, J. Anisotropic Mechanical Properties in a Big-Sized Ti-6Al-4V Plate Fabricated by Electron Beam Melting BT - TMS 2016 145th Annual Meeting & Exhibition. *In*: 2016, Cham. **Anais [...]**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 5–12.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, p. 1–10, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>

WU, B.; DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H.; HAN, J.; FEI, Z. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 250, p. 304–312, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>

WU, W.; XUE, J.; WANG, L.; ZHANG, Z.; HU, Y.; DONG, C. Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing. **Metals**, v. 9, n. 1, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9010109>

WU, W.; XUE, J.; WANG, L.; ZHANG, Z.; HU, Y.; DONG, C. Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing. **Metals**, v. 9, n. 1, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9010109>

XIA, C.; PAN, Z.; POLDEN, J.; LI, H.; XU, Y.; CHEN, S.; ZHANG, Y. A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 57, n. August, p. 31–45, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>

XIAO, X.; WADDELL, C.; HAMILTON, C.; XIAO, H. Quality Prediction and Control in Wire Arc Additive Manufacturing via Novel Machine Learning Framework. **Micromachines**, v. 13, n. 1, p. 137, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mi13010137>

XIE, B.; XUE, J.; REN, X.; WU, W.; LIN, Z. A comparative study of the CMT+P process on 316L stainless steel additive manufacturing. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 9, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10093284>

XIONG, J.; LI, Y.; LI, R.; YIN, Z. Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 252, p. 128–136, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2017.09.020>. Acesso em: 7 set. 2023.

YANG, D.; WANG, G.; ZHANG, G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 244, p. 215–224, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>

YOGANANDH, J. ; KANNAN, T. ; KUMARESH, B. ; ; NATARAJAN, S. Optimization of GMAW Process Parameters in Austenitic Stainless Steel Cladding Using Genetic Algorithm Based Computational Models. **Experimental Techniques**, v. 37, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2011.00803.x>

YUAN, L.; PAN, Z.; DING, D.; YU, Z.; VAN DUIN, S.; LI, H.; LI, W.; NORRISH, J. Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 63, n. March, p. 24–34, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.018>

ZHANG, C.; LI, Y.; GAO, M.; ZENG, X. Wire Arc Additive Manufacturing of Al-6Mg alloy Using Variable Polarity Cold Metal Transfer Arc as Power Source. **Materials Science and Engineering: A**, v. 711, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.084>

ZHANG, Z.; SHEN, J.; HU, S.; CHEN, Y.; YIN, C.; BU, X. Optimization of CMT Characteristic Parameters for Swing Arc Additive Manufacturing of AZ91 Magnesium Alloy Based on Process Stability Analysis. **Materials**, v. 16, n. 8, 2023 a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16083236>

ZHANG, Z.; SUN, C.; XU, X.; LIU, L. Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminium alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 1, n. 2, p. 89–95, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.005>

ZHANG, Z.; YAN, J.; LU, X.; ZHANG, T.; WANG, H. Optimization of porosity and surface roughness of CMT-P wire arc additive manufacturing of AA2024 using response surface methodology and NSGA- II . **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 6923–6941, 2023 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.259>

ZHONG, Y.; ZHENG, Z.; LI, J.; WANG, C. Fabrication of 316L nuclear nozzles on the main pipeline with large curvature by CMT wire arc additive manufacturing and self-developed slicing algorithm. **Materials Science and Engineering A**, v. 820, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141539>

ZHOU, W.; LONG, T. Z.; MARK, C. K. Hot cracking in tungsten inert gas welding of magnesium alloy AZ91D. **Materials Science and Technology**, v. 23, n. 11, p. 1294–1299, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/174328407X213026>

APÊNDICE A – TESTE E FABRICAÇÃO DE REDUÇÃO CONCÊNTRICA

Para a validação e teste de funcionalidade dos parâmetros selecionados neste trabalho, foram produzidas duas peças de diferentes geometrias por MADA. Em razão das excelentes características e propriedades do aço ER316LSi, como alta resistência a corrosão e boa resistência mecânica, foram propostas peças que possuam aplicações plausíveis para a indústria de Petróleo & Gás.

Na Figura A1, é possível observar a primeira peça obtida por MADA neste trabalho. A peça produzida é uma redução concêntrica.

Figura A1 - Redução concêntrica produzida por MADA

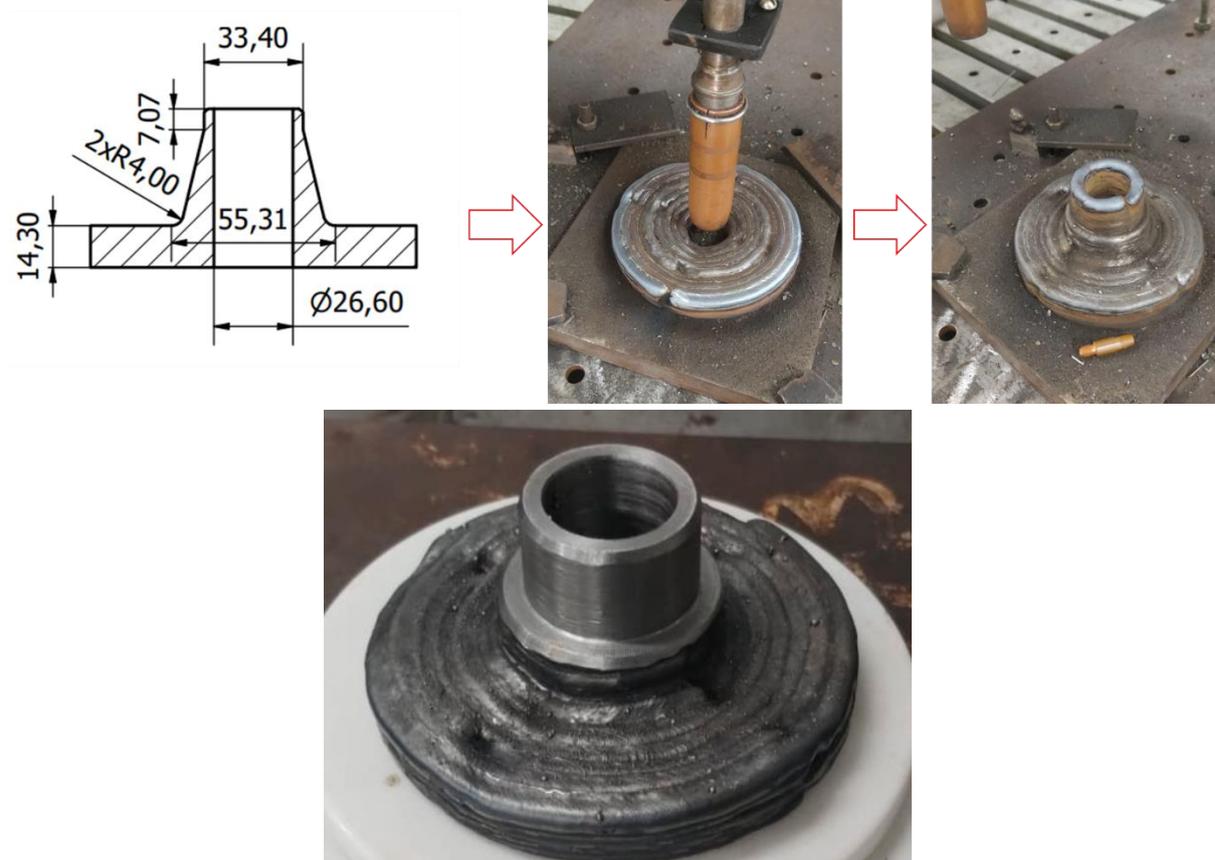


Fonte: O Autor (2023).

APÊNDICE B – TESTE E FABRICAÇÃO DE FLANGE

Na Figura B1, é possível observar a segunda peça obtida por MADA neste trabalho. A peça produzida em questão, é de uma peça de flange para o setor de Petróleo&Gás.

Figura B1 - Flange produzida por MADA



Fonte: O Autor (2023).

Ambas peças produzidas apresentaram pouca ou nenhuma distorção geométrica decorrente do processo de fabricação, bom aspecto superficial, baixa quantidade de rejeito para acabamento de usinagem e ausência de defeitos superficiais visíveis, tais como: fissuras, falta de fusão, porosidades, entre outros.