

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Rogério Ferreira Rezende

MANUFATURA ADITIVA BASEADA EM GMA PULSADO DE AÇO INOXIDÁVEL
308 L: um estudo sobre a influência dos modos de destacamento de gotas nas
propriedades mecânicas e na geometria do material depositado

Belo Horizonte
2025

Rogério Ferreira Rezende

**MANUFATURA ADITIVA BASEADA EM GMA PULSADO DE AÇO INOXIDÁVEL
308 L: um estudo sobre a influência dos modos de destacamento de gotas nas
propriedades mecânicas e na geometria do material depositado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Ariel Rodríguez Arias

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo José Lima II

Belo Horizonte
2025

R467m	Rezende, Rogério Ferreira. Manufatura aditiva baseada em GMA pulsado de aço inoxidável 308 L [recurso eletrônico] : um estudo sobre a influência dos modos de destacamento de gotas nas propriedades mecânicas e na geometria do material depositado / Rogério Ferreira Rezende. – 2025. 1 recurso online (111 f. : il., color.) : pdf. Orientador: Ariel Rodríguez Arias. Coorientador: Eduardo José Lima II. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Inclui bibliografia. 1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Manufatura aditiva – Teses. 3. Arco de soldagem a gás de metal – Teses. 4. Análise geométrica – Teses. 5. Aço inoxidável – Teses. I. Rodríguez Arias, Ariel. II. Lima II, Eduardo José. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título. CDU: 621(043)
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"MANUFATURA ADITIVA BASEADA EM GMA PULSADO DE AÇO INOXIDÁVEL 308 L – UM ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS MODOS DE DESTACAMENTO DE GOTAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA GEOMETRIA DO MATERIAL DEPOSITADO"

ROGÉRIO FERREIRA REZENDE

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores Dr. Ariel Rodriguez Arias (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica-UFMG), Dr. Eduardo José Lima II (Coorientador- Departamento de Engenharia Mecânica-UFMG), Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (Aposentado do Departamento de Engenharia Mecânica-UFMG), Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Universidade Federal de Uberlândia -UFU), Dr. Luiz Eduardo dos Santos Paes (Universidade Federal de Uberlândia-UFU) e Dr. Fagner Guilherme Ferreira Coelho (Pesquisador no CIT-SENAI), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Doutor em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **" Engenharia de Manufatura e Materiais "**.

Tese aprovada no dia 25 de abril de 2025.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Chefe de departamento**, em 26/05/2025, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Jose Lima II, Professor do Magistério Superior**, em 26/05/2025, às 18:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Membro**, em 29/05/2025, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Usuário Externo**, em 02/06/2025, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo dos Santos Paes, Usuário Externo**, em 03/06/2025, às 14:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fagner Guilherme Ferreira Coelho, Usuário Externo**, em 04/06/2025, às 12:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4213439** e o código CRC **55BAF08A**.

Referência: Processo nº 23072.230141/2025-73

SEI nº 4213439

Dedico este trabalho à minha esposa Rejaine e ao meu filho Lucas, pelo apoio, paciência e incentivo. Aos meus pais Romeu (in memoriam) e Leila e ao meu irmão Evandro pelas referências e base familiar. À Vó Geni, minha sogra Dona Zinha e (in memoriam): Vô Tião, Vô Juca, Vó Maria e ao meu sogro Sr. Evandro, pelos exemplos de vida de dedicação à família e ao trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e aos espíritos protetores pelas orientações e inspirações positivas na condução da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Ariel Rodríguez Arias e coorientador Prof. Eduardo José Lima II, pelos ensinamentos e direcionamentos que contribuíram para meu crescimento acadêmico.

Aos colegas do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS), demais alunos e professores da pós-graduação da UFMG, à secretária do PPGMEC Marina, aos colegas do IFMG campus Betim e IFSC campus Xanxerê por todo apoio e parcerias.

Ao LRSS da UFMG pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e ao IFSC – Campus Xanxerê pela infraestrutura disponibilizada para os ensaios mecânicos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo. Mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim”.

Chico Xavier

RESUMO

Estudos recentes apontam boas perspectivas para a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) baseada no processo *Gas Metal Arc* (GMA) pulsado, devido à elevada taxa de deposição, alta eficiência energética e baixo custo operacional, em comparação com outros processos como LASER e feixe de elétrons. Além disso, a transferência do metal do tipo goticular projetada é considerada ideal, pois proporciona o desprendimento regular de gotas com tamanho uniforme e poucos respingos. Entretanto, no processo GMA convencional, a elevada intensidade de corrente necessária para a obtenção da transferência do metal do tipo goticular gera um elevado aporte térmico. Neste sentido, o processo GMA pulsado pode ser utilizado com um aporte térmico reduzido. Assim, este estudo possui como objetivo apresentar os resultados obtidos na MADA baseada em GMA pulsado, a partir da análise da influência dos diferentes modos de destacamento de gotas nas características geométricas e nas propriedades mecânicas do metal depositado. Foram analisados os modos de destacamento de uma gota por múltiplos pulsos (UGMP), uma gota por pulso (UGPP) e múltiplas gotas por pulso (MGPP). Os experimentos foram realizados por meio da deposição de pré-formas, com arame de aço inoxidável 308 L de diâmetro 1,0 mm sobre um substrato de aço inoxidável 316 L. A caracterização dos modos de destacamento de gotas foi realizada durante a deposição, por meio da utilização de câmera de alta velocidade em conjunto com um sistema de aquisição de dados. Após a caracterização, selecionou-se os parâmetros de pulso para a deposição de três pré-formas de cada modo de destacamento de gotas. A análise geométrica das pré-formas foi realizada a partir do processo de fotogrametria. As propriedades mecânicas foram analisadas por meio de ensaios de tração e dureza. Observou-se um aporte térmico maior no modo de UGMP. Os modos de MGPP e UGPP proporcionaram a fabricação de pré-formas mais delgadas e de melhor acabamento superficial. Além disso, o modo de MGPP, gerou melhores resultados nas pré-formas fabricadas, com menor dureza e maior resistência à tração. O modo de UGMP levou a resultados relativamente inferiores, com paredes de maior largura, maior ondulação superficial e menor resistência à tração. Entretanto, a modelagem e análise estatística demonstraram predições inconsistentes e inconclusivas, devido principalmente à limitação de amostras. Espera-se por meio dos resultados desta pesquisa, fornecer subsídios técnico-científicos, que poderão contribuir para o desenvolvimento do processo de fabricação por MADA baseada no processo GMA pulsado, especialmente para aplicações de aço inoxidável.

Palavras-chave: manufatura aditiva; GMA pulsado; transferência do metal; análise geométrica; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Recent studies point to promising prospects for pulsed gas metal arc (GMA)-based wire arc additive manufacturing (WAAM) process, due to its high deposition rate, energy efficiency, and low operational cost, when compared to other processes such as LASER and electron-beam. Furthermore, the projected spray metal transfer is considered ideal, as it ensures a regular detachment of droplets with uniform size and minimal spatter. However, in the conventional GMA process, the high current intensity required to achieve spray metal transfer generates significant heat input. In this regard, the pulsed GMA process can be employed with reduced heat input. Thus, this study aimed to present the results obtained in pulsed GMA-based WAAM for the deposition of 308 L stainless steel, based on the analysis of the influence of different droplet detachment modes on the geometric characteristics and mechanical properties of the deposited metal. The detachment modes of one drop per multiple pulses (ODMP), one drop per pulse (ODPP), and multiple drops per pulse (MDPP) were analyzed. The experiments were performed by depositing preforms using 308 L stainless steel wire with a diameter of 1.0 mm on a 316 L stainless steel substrate. Characterization of the droplet detachment modes was performed during deposition, using a high-speed camera and data acquisition system. After characterization, the pulse parameters were selected for the deposition of three identical preforms for each droplet detachment mode. Geometric analysis of the preforms was performed by photogrammetry. The mechanical properties were analyzed through tensile and hardness tests. A greater heat input was observed in the ODMP mode. The MDPP and ODPP modes produced thinner preforms with a better surface finish. In addition, the MDPP mode generated better results in the manufactured preforms, with lower hardness and higher tensile strength. The ODMP mode led to relatively poorer results, with wider walls, greater surface waviness, and lower tensile strength. Nevertheless, the statistical modeling and analysis yielded inconsistent and inconclusive predictions, mainly because of limited sample sizes. The results of this research are expected to provide technical and scientific support for the development of the manufacturing process by pulsed GMA-based WAAM, especially for stainless steel applications.

Keywords: additive manufacturing; pulsed GMA; metal transfer; geometric analysis; mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aplicação da manufatura aditiva por setores	16
Figura 2 – Medidas de desempenho da MADA	17
Figura 3 – Diagrama de rede de citações do software VOSviewer®	22
Figura 4 – Tendência de publicações de MADA baseada em GMA de aço inoxidável.	23
Figura 5 – Seção transversal da deposição de camadas sobrepostas de material	25
Figura 6 – Equipamentos básicos de um sistema de MADA baseada em GMA	27
Figura 7 – Etapas do processo de MADA	28
Figura 8 – Processo GMA (CC+).....	29
Figura 9 – Diferentes modos de transferência do metal: a) Globular; b) Curto circuito	30
Figura 10 – Formas de transferência do metal do tipo goticular: a) projetada, b) com alongamento e c) rotacional.....	31
Figura 11 – Sinais de pulsos durante a transferência do metal.....	33
Figura 12 – Processo GMA – Forças que influenciam o destacamento das gotas	34
Figura 13 – Curvas da constante de destacamento do processo GMA pulsado	37
Figura 14 – Transferência de calor na pré-forma durante o processo de deposição	41
Figura 15 – Impacto da temperatura intercamada na rugosidade superficial e altura das camadas. Parâmetros: $v_a = 3,73$ m/min e v_d 30 cm/min	42
Figura 16 – Efeitos das variáveis do processo sobre a largura da camada.....	43
Figura 17 – Efeitos das variáveis do processo sobre a altura da camada	44
Figura 18 – a) Efeito predominante de degraus e b) Efeito suavizado de degraus.....	44
Figura 19 – Efeitos da velocidade de deslocamento sobre a rugosidade superficial e a altura da camada	45
Figura 20 – Respingos em excesso na superfície da parede.....	45
Figura 21 – Variação na altura da pré-forma.....	46
Figura 22 – Aumento gradual da largura da parede	47
Figura 23 – Análise geométrica da parede por escaneamento.....	47
Figura 24 – Sistema montado para fotogrametria	48
Figura 25 – a) Tela do software Meshroom® e b) Modelo 3D da peça.....	48
Figura 26 – Plano de ensaios e extração dos corpos de prova.....	49
Figura 27 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração	49
Figura 28 – Plano de extração e dimensões dos corpos de prova.....	50
Figura 29 – Plano de extração e dimensões dos corpos de prova.....	50
Figura 30 – Plano dos ensaios de micro dureza na seção transversal.....	51
Figura 31 – a) Plano de extração dos corpos de provas; b) dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração	51
Figura 32 – Sistema MADA baseado em GMA pulsado	53
Figura 33 – a) Sistema de fixação da tocha; b) Fixação do substrato	53
Figura 34 – a) Câmera de alta velocidade instalada em frente ao sistema de MADA;	54
Figura 35 – Modos de destacamento de gotas	55
Figura 36 – Curvas dos modos de destacamento de gotas.	57
Figura 37 – Tela de calibração dimensional da imagem da câmera de alta velocidade	57
Figura 38 – Transferência de calor na pré-forma durante o processo de deposição	58
Figura 39 – Monitoramento da temperatura intercamada durante o processo de deposição....	59
Figura 40 – Dimensões da seção transversal do substrato	60
Figura 41 – Trajetória de deposição e dimensões finais das pré-formas.....	60
Figura 42 – a) Localização dos furos no substrato para fixação dos termopares;	61
Figura 43 – Curva do ciclo térmico durante a deposição de uma camada	62

Figura 44 – Montagem dos equipamentos para a realização da fotogrametria	63
Figura 45 – a) Imagem 3D gerada no Meshroom®; b) Corte da seção transversal central no Blender®; c) Seção transversal obtida para medição; d) Medição no Image J®	63
Figura 46 – Parâmetros geométricos analisados na seção transversal da pré-forma.....	64
Figura 47 – Plano de extração dos corpos de prova	65
Figura 48 – Dimensões [mm] dos corpos de prova: a) ensaio de tração; b) ensaio de dureza ..	66
Figura 49 – a) Máquina de ensaio de tração; b) Detalhe da fixação do corpo de prova	66
Figura 50 – Marcação no comprimento útil do corpo de prova	67
Figura 51 - Durômetro.....	67
Figura 52 – Plano dos ensaios de dureza (dimensões em mm)	68
Figura 53 – Imagens do modo de destacamento de UGMP com as respectivas formas de onda de corrente e tensão	70
Figura 54 – Imagens do modo de destacamento de UGPP com as respectivas formas de onda de corrente e tensão	71
Figura 55 – Imagens do modo de destacamento de MGPP com as respectivas formas de onda de corrente e tensão	72
Figura 56 – Temperaturas medidas no substrato	73
Figura 57 – Taxas de aquecimento e resfriamento no substrato.....	73
Figura 58 – Posições da gota no modo de UGPP: a) posição inicial da gota após o destacamento; b) posição final da gota antes de tocar a poça de fusão	76
Figura 59 – Sequência de tempo das imagens dos modos de destacamento de gotas	77
Figura 60 – Dureza média medida em diferentes seções e regiões das pré-formas - UGMP ..	80
Figura 61 – Resistência à tração com diferentes modos de destacamento de gotas nas direções vertical e horizontal	82
Figura 62 – Deformação máxima com diferentes modos de destacamento de gotas nas direções vertical e horizontal.....	82
Figura 63 – Tensão de escoamento [MPa] dos diferentes modos de destacamento de gotas nas direções vertical e horizontal.....	83
Figura 64 – Influência do aporte térmico na resistência à tração	84
Figura 65 – Modelagem e análise estatística para os resultados de dureza.....	86
Figura 66 – Modelagem e análise estatística para os resultados de tensão máxima.....	87
Figura 67 – Modelagem e análise estatística para os resultados de tensão de escoamento.....	88
Figura 68 – Modelagem e análise estatística para os resultados de deformação máxima.....	89
Figura 69 – Modelagem e análise estatística para os resultados de módulo de elasticidade....	90
Figura 70 – Modelagem e análise estatística para os resultados de altura média das camadas.....	91
Figura 71 – Modelagem e análise estatística para os resultados de largura média das camadas.....	92
Figura 72 – Modelagem e análise estatística para os resultados de índice de ondulação.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Energia de MADA baseada em GMA de aços inoxidáveis 316 L e 308 L	18
Tabela 2 – Filtros de palavras-chave aplicados na base de dados Scopus	21
Tabela 3 – Processo de seleção de artigos conforme a RSL	23
Tabela 4 – Alguns estudos sobre MADA baseada em GMA de aços inoxidáveis.....	24
Tabela 5 – Correntes de transição para arames de aço inoxidável	37
Tabela 6 – Correntes de transição de diferentes materiais	37
Tabela 7 – Parâmetros de pulso para arame ER316 L SI (aço inoxidável) com diâmetro de 1,2 mm – Fonte de soldagem MTE Digitec – IMC	40
Tabela 8 – Composições químicas do arame e do substrato	52
Tabela 9 – Parâmetros fixos para a deposição das pré-formas.....	55
Tabela 10 – Parâmetros selecionados para os modos de destacamento de gotas	58
Tabela 11 – Tempos intercamada durante a deposição	59
Tabela 12 – Dados dos parâmetros de pulso coletados pelo sistema de aquisição	69
Tabela 13 – Dados das temperaturas do substrato coletadas nos termopares	74
Tabela 14 – Energia gerada pelos modos de destacamento de gotas	75
Tabela 15 – Número de gotas e pulsos e diâmetro médio de gotas.....	76
Tabela 16 – Velocidade média das gotas de acordo com o modo de destacamento	76
Tabela 17 – Ciclo médio e frequência média de destacamento de gotas dos diferentes modos	77
Tabela 18 – Massa média das gotas de acordo com o modo de destacamento	78
Tabela 19 – Pressão de impacto das gotas sobre a poça de fusão conforme o modo de destacamento	78
Tabela 20 – Valores médios dos parâmetros geométricos das amostras de acordo com o modo de destacamento de gotas	79
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de dureza	80
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de tração	81
Tabela 23 – Propriedades mecânicas obtidas de diferentes pesquisas, a partir de amostras de MADA com aço inoxidável 308 L	84
Tabela 24 – Parâmetros de entrada e saída dos modos de destacamento de gotas.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM.....	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DBCP	Distância do Bico de Contato à Peça
GMA	<i>Gas Metal Arc</i>
GTA	<i>Gas Tungsten Arc</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MADA.....	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MGPP	Múltiplas Gotas por Pulso
NIAC	<i>Near Immersion Active Cooling</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
UGMP	Uma Gota por Múltiplos Pulso
UGPP	Uma Gota por Pulso

SUMÁRIO

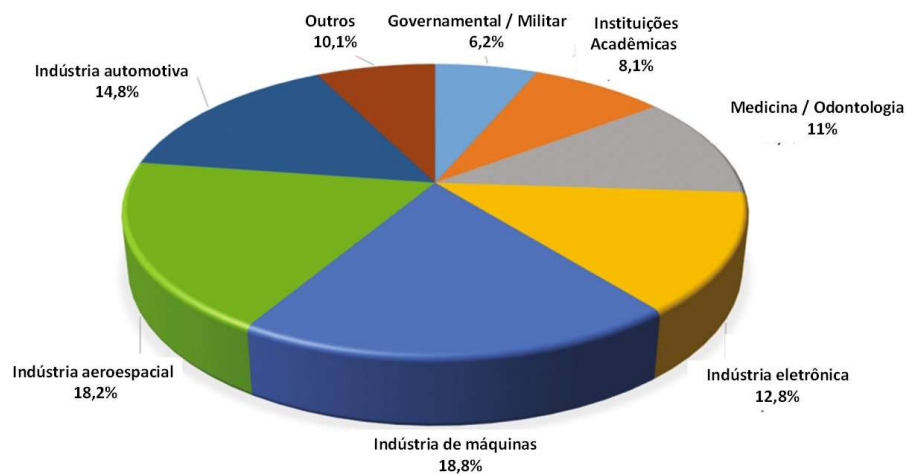
1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Objetivos	20
1.1.1.	Objetivo Geral	20
1.1.2.	Objetivos Específicos	20
2.	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1.	Processo de Revisão Sistemática de Literatura	21
2.2.	Tendências de Publicações	23
2.3.	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)	25
2.4.	Transferência do metal no processo GMA	28
2.4.1.	Transferência do metal do tipo globular	29
2.4.2.	Transferência do metal por curto-circuito	29
2.4.3.	Transferência do metal do tipo curto-circuito controlado	30
2.4.4.	Transferência do metal do tipo goticular	31
2.5.	GMA pulsado	32
2.5.1.	Principais parâmetros de GMA pulsado	32
2.5.2.	Modos de Destacamento de Gotas obtidos do GMA pulsado	33
2.5.3.	Caracterização do Modo de Destacamento de Gotas	40
2.6.	Influência da energia e temperatura intercamada na MADA	40
2.7.	Análise das Características Geométricas dos Materiais Fabricados por MADA	42
2.7.1.	Métodos de análise geométrica para a MADA	47
2.8.	Análise das Propriedades Mecânicas dos Materiais Fabricados por MADA	48
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	52
3.1.	Materiais e equipamentos	52
3.1.1.	Sistema de MADA baseada em GMA pulsado	52
3.1.2.	Câmera de alta velocidade	54
3.1.3.	Dispositivo de aquisição de dados	54
3.2.	Caracterização dos modos de destacamento de gotas	54
3.3.	Definição dos parâmetros operacionais da MADA baseada em GMA pulsado	55
3.3.1.	Definição dos valores dos parâmetros de pulso	56
3.4.	Seleção dos parâmetros de pulso para deposição das pré-formas	58
3.5.	Definição da temperatura e tempo intercamada	58
3.6.	Deposição das pré-formas de múltiplas camadas	59
3.7.	Análise do ciclo térmico durante a deposição	61
3.7.1.	Análise e processamento dos dados do ciclo térmico	61
3.7.2.	Energia	62
3.8.	Medição das gotas durante o destacamento	62
3.9.	Análise geométrica das pré-formas	62

3.10.	Análise das propriedades mecânicas das pré-formas	65
3.10.1.	Ensaio de resistência à tração.....	66
3.10.2.	Ensaio de dureza	67
4.	RESULTADOS.....	69
4.1.	Caracterização dos modos de destacamento de gotas	69
4.1.1.	Análise dos parâmetros	69
4.1.2.	Análise dos modos de destacamento de gotas conforme parâmetros de pulso	69
4.2.	Influência do modo de destacamento de gotas no aporte térmico e no acúmulo de calor da pré-forma 72	
4.2.1.	Ciclo térmico durante a deposição das camadas das pré-formas	73
4.2.2.	Energia	74
4.3.	Influência do modo de destacamento de gotas na geometria das pré-formas	75
4.4.	Influência do modo de destacamento de gotas nas propriedades mecânicas da pré-forma.....	79
4.4.1.	Resultados dos ensaios de dureza.....	79
4.4.2.	Resultados dos ensaios de tração	81
4.5.	Modelagem e Análise Estatística dos Resultados	84
5.	CONCLUSÕES	95
	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICES.....	107

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é um método de fabricação que tem destacado interesse de pesquisadores, pelo fato de utilizar a fabricação baseada na deposição sucessiva de camadas a partir de um modelo 3D, o qual pode apresentar certa complexidade para produção utilizando outro método de fabricação. A ampla aplicação desta tecnologia é impulsionada por aplicações de engenharia inovadoras, conforme Figura 1, no setor de saúde, aeroespacial, automotivo, indústria de máquinas, indústria eletrônica e no setor militar (Ding *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2020; Ščetinec *et al.*, 2021; Singh & Khanna, 2021).

Figura 1 – Aplicação da manufatura aditiva por setores



Fonte: adaptado de (Szymczyk *et al.*, 2019)

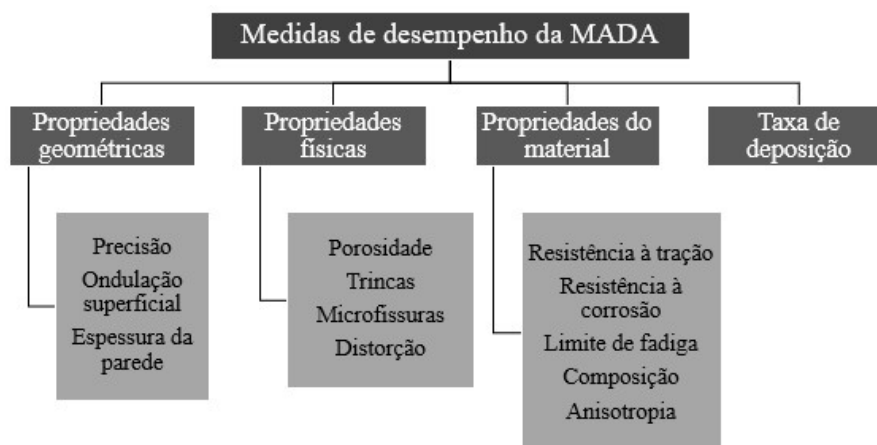
A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) pode reduzir a quantidade necessária de material para fabricar um componente, produzindo peças semiacabadas que são usinadas nas dimensões finais (McAndrew *et al.*, 2018; Dirisu *et al.*, 2020). A manufatura aditiva fabrica produtos próximos às dimensões finais e, portanto, leva a uma redução na taxa de remoção de material e nos possíveis custos subsequentes (Tanvir *et al.*, 2021). A manufatura aditiva pode reduzir quase 50% dos custos de usinagem de ligas de alta resistência (Brice *et al.*, 2015; Singh & Khanna, 2021)

Pesquisadores estimam que a manufatura aditiva promoverá um profundo impacto econômico na indústria de manufatura e certamente na sociedade em geral (Baumers *et al.*, 2016).

Na análise de desempenho da MADA, alguns requisitos são levados em consideração,

como o tipo de material, propriedades geométricas, propriedades do material, taxa de deposição e, principalmente, custos operacionais. A Figura 2 apresenta medidas de desempenho relevantes aplicadas à MADA (Cunningham *et al.*, 2018).

Figura 2 – Medidas de desempenho da MADA



Fonte: adaptado de Cunningham *et al.* (2018)

De acordo com Ríos *et al.* (2018); Singh e Khanna (2021) a MADA baseada no processo *Gas Metal Arc* (GMA) apresenta-se como uma boa alternativa com alta taxa de deposição, alta eficiência energética e baixo custo operacional, principalmente para aço e alumínio, se comparada a outros processos. A taxa de deposição da MADA baseada no processo GMA (1-10 kg/h) é 2 a 3 vezes maior do que outros processos MADA baseada em *Gas Tungsten Arc* (GTA) e *Plasma Arc* (PA) (Williams *et al.*, 2016; Aldalur *et al.*, 2020).

Entretanto, ainda existem algumas limitações e desafios que precisam ser considerados no desenvolvimento e avanço da MADA, como controle da dinâmica da poça de fusão, deformação, porosidade interna, estrutura heterogênea, tensão residual, distorção, rugosidade superficial e trincas no material, que geralmente estão relacionados ao processo de deposição e aporte térmico (Rodrigues *et al.*, 2019; Thapliyal, 2019; Wang *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2020; K. Li *et al.*, 2021; Singh & Khanna, 2021). A energia e o calor acumulado pela deposição de camadas sobrepostas levam a um aumento da temperatura média e a um longo tempo de solidificação, o que pode afetar a microestrutura do material, oxidação, formação de defeitos e consequentemente, afetam as propriedades mecânicas e a precisão dimensional (Åkerfeldt *et al.*, 2016; B. Wu, Pan, Ding, Cuiuri, & Li, 2018; B. Wu, Pan, Li, *et al.*, 2018; Jia *et al.*, 2020).

Estudos recentes sobre a MADA baseada em GMA de aço inoxidável já apresentaram alguns resultados relacionados ao processo de deposição e à energia, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Energia de MADA baseada em GMA de aços inoxidáveis 316 L e 308 L

Processo de MADA	Material	Diâmetro do arame [mm]	Corrente média [A]	Tensão [V]	Energia [J/mm]	Ref.
GMA	316 L	1,2	300	28,0	670	Chen <i>et al.</i> , 2017
GMA	316 L	1,2	160	16,4	500	Kannan <i>et al.</i> , 2021
GMA	308 L	1,2	158	15,5	391	Nagasai <i>et al.</i> , 2022
GMA-CMT	308 L	1,2	132	14,6	308	
GMA-CMT	316 L	1,2	144	19,0	360	J. Chen <i>et al.</i> , 2021

Fonte: o autor (2024)

Além disso, outros estudos analisaram as propriedades mecânicas das pré-formas fabricadas, utilizando arame de aço inoxidável 308 L com diâmetro de 1,0 mm, apresentando os seguintes resultados: resistência à tração (472 a 553 MPa), deformação (40 a 55%) e tensão de escoamento (272 a 353 MPa) (Le & Mai, 2020; Le *et al.*, 2020b; Le, Mai, Doan, *et al.*, 2021a;).

Os resultados do processo de MADA (material depositado com geometria uniforme, boas propriedades mecânicas e livre de defeitos) dependem de variáveis primárias (corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, vazão do gás de proteção, velocidade de deslocamento) e variáveis secundárias (por exemplo: taxa de deposição, aporte térmico) que devem ser controladas no processo. Além disso, defeitos potenciais como porosidade, trincas e distorções devem ser evitados.

O principal desafio da MADA é estabelecer métodos e parâmetros que garantam um equilíbrio entre uma alta taxa de deposição, controle geométrico e mínimo aporte térmico.

O modo de transferência do metal, obtido a partir do ajuste das variáveis primárias, possui grande influência na taxa de deposição, no comportamento da poça de fusão, no aporte térmico e na geometria do material depositado. Segundo Panchenko *et al.* (2020), o ajuste da transferência do metal é uma tendência no desenvolvimento da MADA, uma vez que a unidade de potência de soldagem é projetada principalmente para a soldagem e não para a manufatura aditiva.

O metal de adição no processo GMA pode ser transferido para a poça de fusão por três modos básicos de transferência do metal: globular, curto-circuito e goticular. Além disso, considera-se também as variações de processos como projetado e curto-circuito controlado (Pattanayak & Sahoo, 2021). Segundo Zhai, Xue, Wang, Tao, *et al.* (2020) na transferência do metal por curto-circuito, sob a condição de arco curto e baixa intensidade de corrente, os respingos são inevitavelmente produzidos. A aplicação do processo GMA pulsado pode superar

esta desvantagem, devido à forma de onda do pulso e ao modo de destacamento de gotas. Além disso, o GMA pulsado também oferece vantagens, como a redução do aporte térmico.

De acordo com Zhang *et al.* (1998); Zhiyong *et al.* (2009); Zhai *et al.* (2020), além da transferência do metal por curto-circuito, o GMA pulsado pode produzir diferentes modos de destacamento de gotas, de acordo com o ajuste dos parâmetros de pulso: uma gota por múltiplos pulsos (UGMP), uma gota por pulso (UGPP) e múltiplas gotas por pulso (MGPP). O modo UGPP tem sido reconhecido como ideal por muitas referências, focando principalmente na estabilidade do processo de soldagem (Pal & Pal, 2011; Zhai *et al.*, 2020). Entretanto, os efeitos dos modos de destacamento de gotas no objetivo final da deposição a arco ainda são pouco compreendidos e não são totalmente claros, especialmente para aplicações na MADA.

Li *et al.* (2019) apresentam um estudo de MADA em 12 diferentes tipos de materiais, como aços, ligas de alumínio e titânio, superligas, compósitos à base de metal e compósitos de matriz cerâmica. Entretanto, grande parte das pesquisas de MADA são apresentadas para aplicações de aço carbono. Existem pesquisas de MADA para aplicações de aço inoxidável, principalmente aços inoxidáveis 316 L e 304 L (Abioye *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2019; Le *et al.*, 2021a; Andrade *et al.*, 2024). As pesquisas de MADA sobre o aço inoxidável 308 L aumentaram, principalmente a partir de 2021, mas ainda são em menor quantidade.

Neste sentido, propõe-se investigar a MADA utilizando o aço inoxidável 308 L, que é um aço inoxidável austenítico com menor teor de carbono, propriedades mecânicas elevadas, com alta resistência à corrosão e que possui aplicações importantes e relevantes na indústria, em diversos setores como mineração, óleo e gás, construção naval e indústria automotiva (Le & Mai, 2020; Le, Mai, & Paris, 2021; Le *et al.*, 2021a).

Segundo Pattanayak & Sahoo (2021), os resultados do processo de manufatura aditiva baseada em GMA como características geométricas, propriedades mecânicas e qualidade da superfície são influenciados por variáveis e parâmetros como polaridade, modo de transferência do metal, tipo de gás de proteção, ângulo da tocha, trajetória de deposição do material e tipo de arame eletrodo. Assim, o presente estudo possui como escopo principal a análise dos modos de destacamento de gotas no processo de manufatura aditiva baseada em GMA pulsado e os efeitos resultantes na fabricação aditiva do aço inoxidável 308 L.

Portanto, propõe-se responder à seguinte questão: Qual a influência dos modos de destacamento de gotas na geometria e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável 308 L fabricado pelo processo de MADA baseado em GMA pulsado? Espera-se também fornecer subsídios técnico-científicos que possam acelerar o desenvolvimento de novos processos de manufatura aditiva para peças de aço inoxidável, que são de grande importância para diversas

indústrias.

A relevância deste estudo é destacada pela inovação, o aprofundamento da pesquisa acadêmica em engenharia mecânica e uma abordagem científica e técnica para o desenvolvimento e avanço tecnológico da MADA. Além disso, espera-se incentivar e viabilizar novas pesquisas de manufatura aditiva que poderão impactar positivamente a indústria de manufatura metal mecânica.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência dos modos de destacamento de gotas na geometria e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável 308 L fabricado por MADA baseada em GMA pulsado.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir e ajustar os principais parâmetros de controle do processo de MADA baseada em GMA pulsado;
- Caracterizar os modos de destacamento de gotas (UGMP, UGPP e MGPP);
- Desenvolver uma análise da influência dos modos de destacamento de gotas nas características geométricas das pré-formas depositadas;
- Analisar os efeitos dos modos de destacamento de gotas nas propriedades mecânicas das pré-formas depositadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Processo de Revisão Sistemática de Literatura

A revisão de literatura foi realizada aplicando metodologias e processos de pesquisa apresentados por Ponis *et al.* (2021) e Rosli *et al.* (2021). O escopo da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) concentrou-se nos modos de transferência do metal da MADA baseada no processo GMA pulsado para aço inoxidável 308 L. A pesquisa da literatura foi realizada utilizando-se a base de dados Scopus. Na primeira pesquisa, utilizou-se as seguintes palavras-chave / filtros: “*pulsed GMAW*”; “*wire arc additive manufacturing*” and “*stainless steel*”; “*additive manufacturing*” and “*GMAW*”.

Apesar do grande número de artigos encontrados, após a análise dos resumos, observou-se que em torno de 50% não correspondiam aos objetivos da pesquisa. Assim, definiu-se novas palavras-chave mais específicas: “*droplet*” and “*GMAW*” and “*pulsed*”; “*additive manufacturing*” and “*stainless steel*” and “*GMAW*”; “*additive manufacturing*” and “*GMAW*” and “*pulsed*”; “*wire arc additive manufacturing*” and “*deposition*” and “*width*” and “*height*”, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Filtros de palavras-chave aplicados na base de dados Scopus

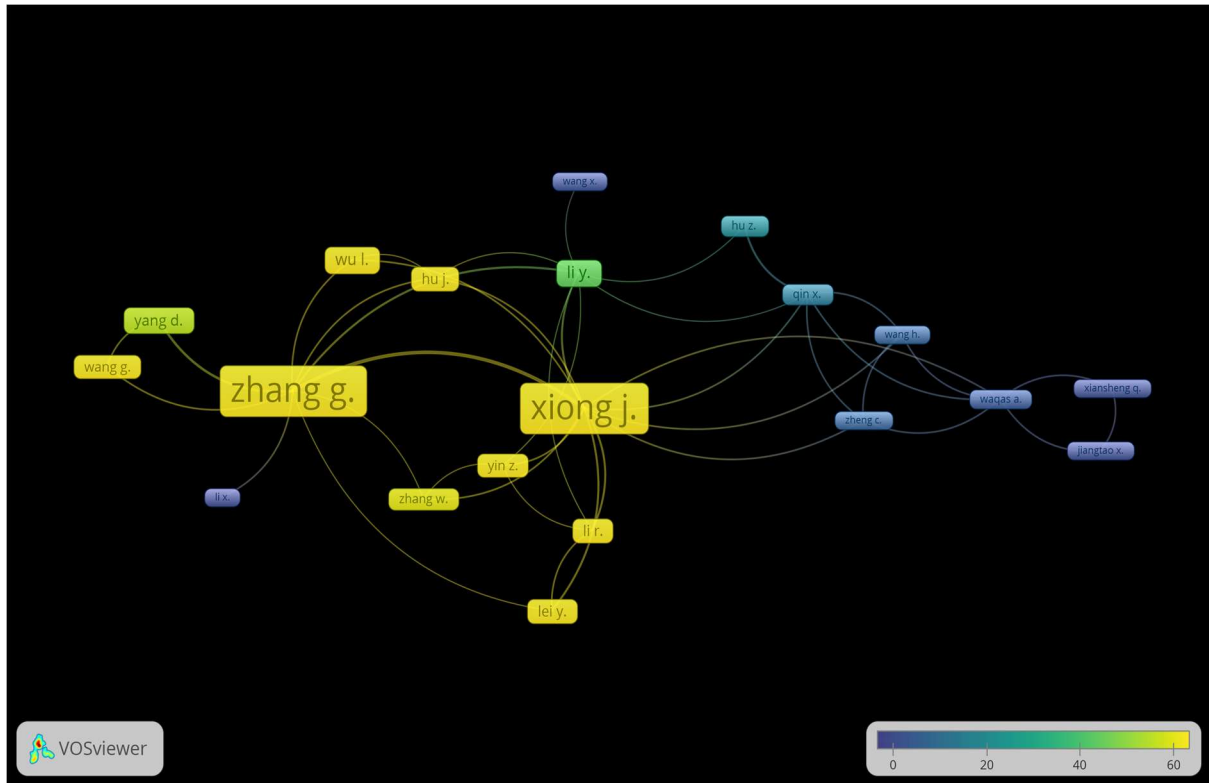
Filtro	Palavras chave / filtros	Quantidade de artigos
1	TITLE-ABS-KEY ("pulsed GMAW")	190
2	TITLE-ABS-KEY ("wire arc additive manufacturing" AND "stainless steel")	137
3	TITLE-ABS-KEY ("additive manufacturing" AND "GMAW")	185
4	"droplet" AND "GMAW" AND "pulsed" Outros filtros: "Drops"; "Droplet Transfer"; "Pulsed GMAW"; "Drop Formation"; "Droplet Detachment"); "P-GMAW"); "Pulsed Current"; "Droplet"; "Droplet Impingement"	89
5	"additive manufacturing" AND "stainless steel" AND "GMAW"	24
6	"additive manufacturing" AND "GMAW" AND "pulsed"	9
7	"wire arc additive manufacturing" AND "deposition" AND "width" AND "height"	30

Fonte: o autor (2024)

A primeira seleção de artigos foi definida de acordo com os filtros 4, 5, 6 e 7, conforme destacado na Tabela 2. Observou-se que o número de artigos de aplicação de aço inoxidável em manufatura aditiva baseada em GMA e GMA pulsado ainda é limitado.

Além disso, o software VOSviewer® foi utilizado para identificar os autores mais relevantes, conforme mostrado no exemplo da Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de rede de citações do software VOSviewer®



Fonte: o autor (2024)

O exemplo do diagrama de rede de citações do VOSviewer® na Figura 3 mostra as citações entre os autores e a relevância dos mesmos, de acordo com as palavras-chave/filtros: "additive manufacturing" and "GMAW". A escala mostra o número de citações entre os autores.

Com base na seleção inicial dos artigos e após a exclusão dos artigos duplicados, um total de 152 artigos foram pré-selecionados. Após a análise dos resumos, 65 artigos foram escolhidos com base no escopo da pesquisa e na disponibilidade de acesso aberto. A etapa final de seleção foi realizada pela análise do texto completo e relevância dos autores, com 50 artigos selecionados. Além disso, outras referências dos artigos foram selecionadas e, finalmente, um total de 103 artigos foram considerados para a revisão da literatura. Posteriormente selecionou-se outros 11 artigos durante a análise dos resultados e conclusões. O processo de seleção é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Processo de seleção de artigos conforme a RSL

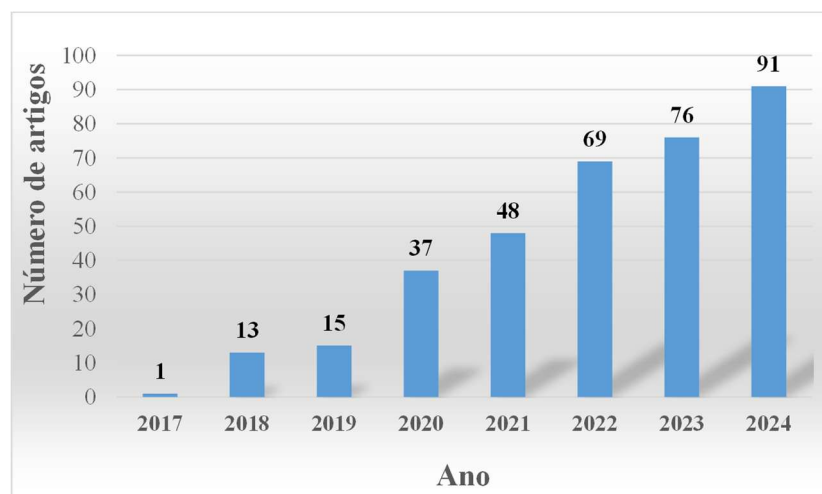
Revisão Sistemática de Literatura (RSL)				
Critério – Palavras chave / Filtros (artigos duplicados excluídos)				
"droplet" AND "GMAW" AND "pulsed"	"additive manufacturing" AND "stainless steel" AND "GMAW"	"additive manufacturing" AND "GMAW" AND "pulsed"	"wire arc additive manufacturing" AND "deposition" AND "width" AND "height"	Total
Other filters: "Drops" ; "Droplet Transfer" ; "Pulsed GMAW" ; "Drop Formation"; "Droplet Detachment") ; "P-GMAW"); "Pulsed Current"; "Droplet"; "Droplet Impingement"				
89	24	9	30	152
Critério – Análise do resumo / Disponibilidade do artigo completo				
30	12	5	18	65
Critério – Análise completa do artigo e relevância dos autores (VOSviewer)				
24	8	3	15	50
Referências adicionais (dos artigos selecionados)				
8	22	20	3	53
Total de artigos selecionados				103

Fonte: o autor (2024)

2.2. Tendências de Publicações

As publicações sobre MADA baseada em GMA de aço inoxidável tiveram uma tendência ascendente nos últimos anos, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Tendência de publicações de MADA baseada em GMA de aço inoxidável. Base de dados Scopus, palavras-chave: "WAAM" and "stainless steel" and "GMAW"



Fonte: o autor (2024)

Estudos recentes sobre MADA baseada em GMA de diferentes aços inoxidáveis são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Alguns estudos sobre MADA baseada em GMA de aços inoxidáveis

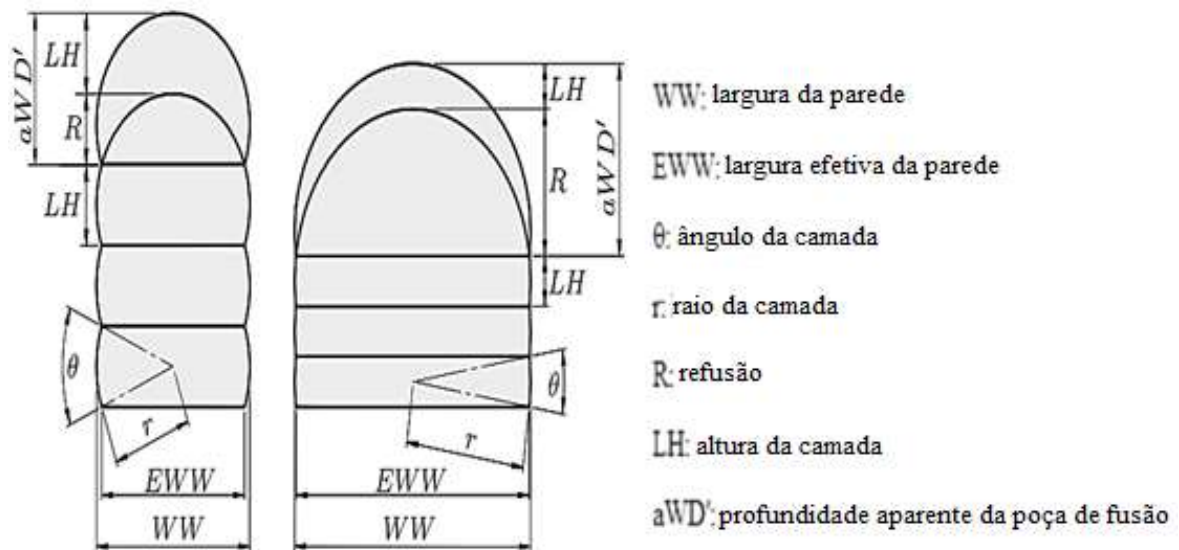
It.	Título do artigo	Material do arame	Processo de MADA	Autores/Ano
1	Investigation of tensile and fatigue properties of an austenitic stainless steel part fabricated by WAAM	ER308L stainless steel diameter 1.2 mm	GMA	(Ayan & Kahraman, 2024)
2	Mechanical properties and microstructural characteristics of wire arc additive manufactured 308 L stainless steel cylindrical components made by gas metal arc and cold metal transfer arc welding processes	ER308L stainless steel diameter 1.2 mm	GMA GMA - CMT	(Nagasai <i>et al.</i> , 2022)
3	Experimental investigations on mechanical properties of multi-layered structure fabricated by GMAW-based WAAM of SS316L	ER316L stainless steel diameter of 1.2 mm	GMA	(Vora, Parmar, <i>et al.</i> , 2022)
4	Optimization of the pulsed arc welding parameters for wire arc additive manufacturing in austenitic steel applications	Austenitic stainless steel diameter of 1.2 mm	PA-GMA	(Zavdoveev <i>et al.</i> , 2022)
5	Wire + Arc Additive Manufacturing and Heat Treatment of Super Martensitic Stainless Steel with a Refined Microstructure and Excellent Mechanical Properties	Super martensitic stainless steel diameter of 1.2 mm	GMA	(Zou <i>et al.</i> , 2022)
6	Experimental validation of numerical simulation on deformation behaviour induced by wire arc additive manufacturing with feedstock SS316L on substrate S235	ER316LSi diameter of 1.2 mm	GMA	(Ahmad <i>et al.</i> , 2022)
7	Microstructure and high temperature performance of 321 SS wall manufactured through wire + arc additive manufacturing	ER321 stain less steel diameter of 1.2 mm	GMA	(Mohan Kumar <i>et al.</i> , 2022)
8	Parametric study and optimization of GMAW based AM process for multi-layer bead deposition	ER304L stainless steel diameter of 0.8 mm	GMA	(Kumar <i>et al.</i> , 2022)
9	Investigation of Path Planning to Reduce Height Errors of Intersection Parts in Wire-Arc Additive Manufacturing	ER304L stainless steel diameter of 1.2 mm	GMA - CMT	(Song <i>et al.</i> , 2021)
10	Effect of interlayer delay on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured wall structures	ER316L stainless steel diameter of 1.2 mm	GMA	(Singh & Khanna, 2021)
11	Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties	ER308L stainless steel diameter of 1.0 mm	GMA	(Le, Mai, Doan, <i>et al.</i> , 2021b)
12	Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing	ER308L stainless steel diameter of 1.0 mm	GMA	(Le & Mai, 2020)
13	Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)	ER316L stainless steel diameter of 1.0 mm	GMA	(Duarte <i>et al.</i> , 2020)

Fonte: o autor (2024)

2.3. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)

A manufatura aditiva consiste na construção de peças por deposição de camadas sobrepostas de material a partir de um substrato (Ríos *et al.*, 2018). Os principais parâmetros geométricos para controle são a largura efetiva da pré-forma e a altura da camada, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Seção transversal da deposição de camadas sobrepostas de material



Fonte: adaptado de (Ríos *et al.*, 2018)

As dimensões das camadas na MADA estão relacionadas à poça de fusão, de forma semelhante ao reforço em um cordão de solda. O resultado obtido depende da interação entre a energia do arco, velocidade de deslocamento, taxa de deposição, temperatura entre passes e propriedades do material (Ríos *et al.*, 2018).

No processo de MADA, a fonte de fornecimento de calor é um arco elétrico gerado através da unidade de potência de soldagem, enquanto a poça de metal líquido é obtida pelo aquecimento e fusão do arame (Singh & Khanna, 2021).

As tecnologias associadas à MADA encontram-se em desenvolvimento e passam por uma transição do processo de soldagem para a manufatura aditiva. Neste sentido, algumas fontes de soldagem são adaptadas e parametrizadas para que funcionem de forma dedicada à MADA. Alguns pesquisadores como, Ding *et al.* (2015) e Nguyen *et al.* (2020) já substituíram o termo “fonte de soldagem” por “fonte de energia” ou “fonte de arco”.

Langelandsvik *et al.* (2021) argumentam que os equipamentos convencionais da MADA (robô, fonte de energia e arame de alimentação) possuem baixo custo em relação aos

sistemas baseados em *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (LASER) e feixe de elétrons. O processo de MADA é largamente aplicado em manufatura aditiva, principalmente devido ao baixo custo de equipamento, maior taxa de produção, menor consumo de material e melhor fusão das camadas depositadas (Ríos *et al.*, 2018; Singh & Khanna, 2021).

A MADA é geralmente aplicada na fabricação de grandes componentes de pré-formas finas, como vasos de pressão. Para peças de formato complexo que são frequentemente utilizadas na indústria aeroespacial, a usinagem é normalmente empregada, no entanto, o processo de MADA pode ser utilizado como uma alternativa para reduzir a relação *buy-to-fly* (razão entre a massa da matéria prima bruta e a massa do produto final) (Lam *et al.*, 2020; Ščetinec *et al.*, 2021). A MADA pode ser aplicada até mesmo em pequenas oficinas de usinagem para serviços de fabricação e reparo. Além disso, os arames estão prontamente disponíveis no mercado a baixo custo e são fáceis de manusear em comparação com os pós metálicos (Warsi *et al.*, 2022).

Entretanto, existem preocupações importantes, como tensões residuais, deformações por acúmulo do aporte térmico e rugosidade superficial, que levam à necessidade de ajustes para estabilizar o processo de MADA (Singh & Khanna, 2021).

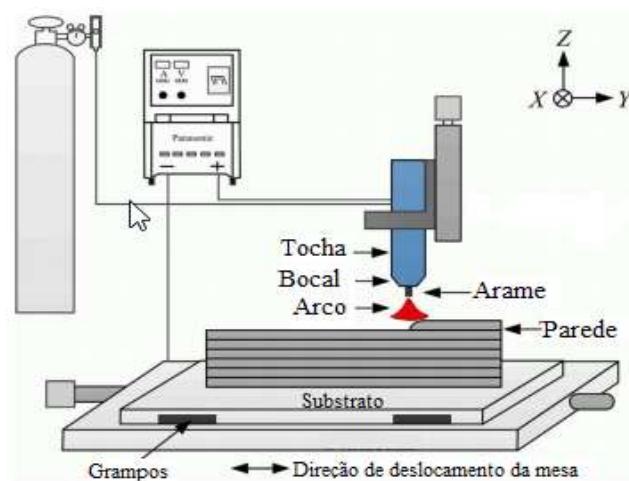
Os principais processos de deposição aplicados na MADA são o GMA, *Gas Tungsten Arc* (GTA) (Palmeira Belotti *et al.*, 2022), e *Plasma Arc* (PA), os quais possuem diferentes equipamentos e tecnologias (Rodriguez *et al.*, 2019; Ahsan *et al.*, 2021).

Os melhores resultados dependem não somente dos equipamentos e tecnologias, mas também de vários parâmetros físicos e operacionais como material, composição do gás de proteção, corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, etc.). Considerando-se os processos convencionais, o processo de alimentação do arame na MADA baseada em GTAW e PAW pode variar e impactar na qualidade da deposição, tornando o controle do processo mais complexo (Ding *et al.*, 2015; B. Wu, Pan, Ding, Cuiuri, & Li, 2018). Entretanto, a MADA baseada em GTA apresenta maior estabilidade e melhor qualidade superficial em comparação à MADA baseada em GMA, que apresenta maior quantidade de respingos e fumos metálicos (Tripathi *et al.*, 2022).

Em contraste, a MADA baseada em GMA proporciona as maiores taxas de deposição em comparação com outros processos de MADA, como PA ou GTA. A taxa de deposição de processos de MADA baseada em GMA (1-10 kg/h) é 2 a 3 vezes maior do que outros processos de MADA baseada em GTA e PA (Williams *et al.*, 2016; Aldalur *et al.*, 2020). Além disso, o processo de MADA baseada em GMA na configuração tandem, que consiste na

combinação de duas tochas de GMA, pode aumentar ainda mais a taxa de deposição (Wu, Pan, Ding, Cuiuri, Li, *et al.*, 2018; Veiga *et al.*, 2022). A Figura 6 mostra os equipamentos que compõem um sistema de MADA baseada em GMA.

Figura 6 – Equipamentos básicos de um sistema de MADA baseada em GMA



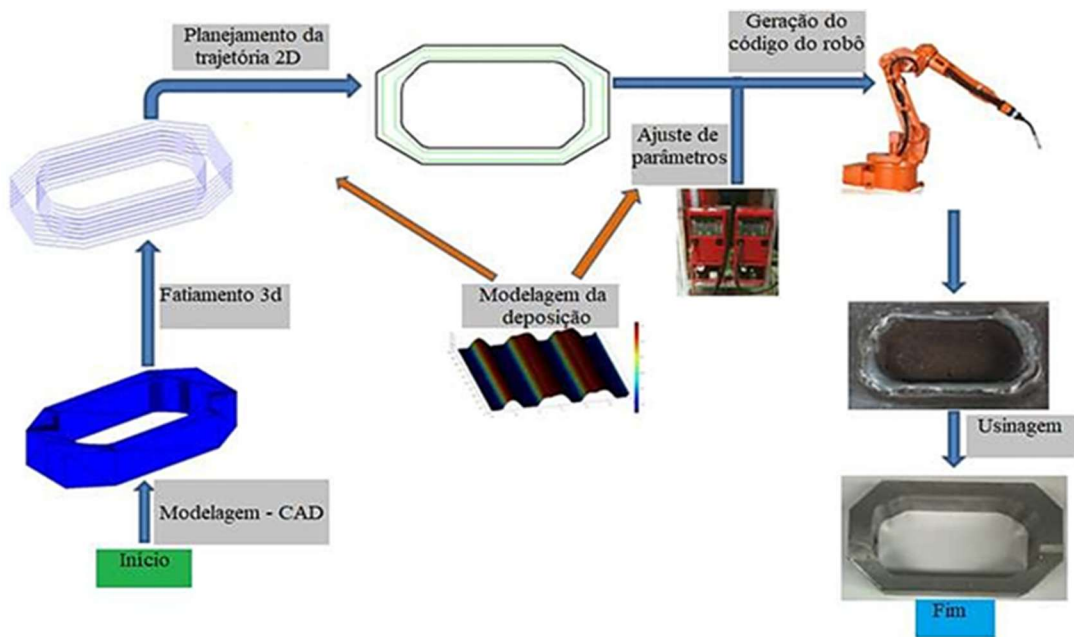
Fonte: adaptado de Xiong *et al.* (2018)

A operação do processo de MADA é realizada principalmente por robôs ou máquinas-ferramenta integrados com software CAD-CAM (do inglês: *Computer Aided Design – Computer Aided Manufacturing*: Desenho Assistido por Computador – Manufatura Assistida por Computador), daí o avanço da manufatura aditiva levou ao desenvolvimento de sistemas de automação cada vez mais inteligentes (Singh & Khanna, 2021). Coelho *et al.* (2021) apresentam um processo de MADA baseada em GMA pulsado com robôs colaborativos que aplicam lógica de feedback de informações durante o processo de deposição.

O processo de MADA inclui três fases básicas: planejamento do processo, deposição e pós-processamento. A primeira ação é criar uma representação geométrica 3D (tridimensional) do modelo de deposição de metal (geometria da peça a ser fabricada), usando CAD ou engenharia reversa. A partir daí, o software converte o modelo 3D em um modelo 2D (bidimensional) composto por camadas com espessura que pode ser depositada com precisão (Singh & Khanna, 2021). A deposição de cada camada é simulada por um software que determina os parâmetros ideais para a deposição do material, como velocidade de alimentação do arame, velocidade de deslocamento, corrente do arco, vazão de gás, trajetória de deposição e aporte térmico. Esta etapa é seguida pela geração do código de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Após o ajuste dos parâmetros, inicia-se a fabricação do produto pela deposição de camadas sobrepostas, sendo o primeiro depósito realizado sobre o substrato, com

deposições sucessivas, incrementando a altura da pré-forma. Assim, a trajetória de deposição continua até a obtenção do produto final. O acabamento superficial final é obtido por processo de usinagem, conforme mostrado na Figura 7. Em alguns casos, dependendo do material e das propriedades mecânicas necessárias, um tratamento térmico pode ser aplicado após o término do processo de fabricação.

Figura 7 – Etapas do processo de MADA



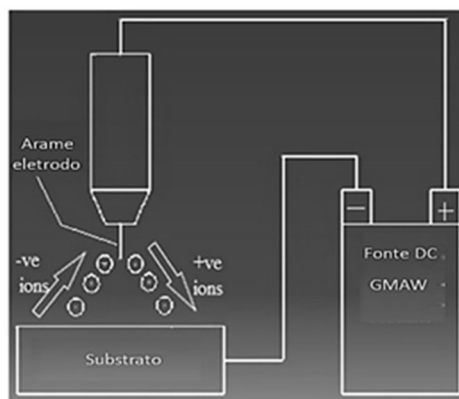
Fonte: Ding *et al.* (2016)

2.4. Transferência do metal no processo GMA

Zhang, Ligu e Kovacevic (1998) argumentam que o processo de transferência do metal influencia diretamente na estabilidade do arco elétrico e na qualidade final do metal depositado.

De acordo com Pattanayak & Sahoo (2021), a MADA baseada em GMA aplica comumente polaridade inversa de corrente contínua (CC+), onde o eletrodo é conectado ao terminal positivo e o substrato é conectado ao terminal negativo da fonte de alimentação, conforme mostrado na Figura 8. Nestas condições, segundo Modenesi & Uribe (2022), o processo apresenta um arco mais estável e uma maior penetração. Ainda segundo Pattanayak & Sahoo (2021), os elétrons são acelerados do substrato em direção ao eletrodo, e os íons carregados positivamente são movidos da superfície do eletrodo em direção ao substrato.

Figura 8 – Processo GMA (CC+)



Fonte: adaptado de Pattanayak & Sahoo (2021)

Segundo Souza *et al.* (2009), no processo GMA em CC+, aproximadamente 30% do calor gerado no arco é transferido ao eletrodo e o restante (aproximadamente 70%) ao substrato, o que resulta em uma menor taxa de deposição, maior aporte térmico no substrato e maior penetração. Resultados estes que, de forma controlada na MADA, podem favorecer a refusão entre as camadas depositadas. Alguns autores detalham os principais modos de transferência do metal.

2.4.1. Transferência do metal do tipo globular

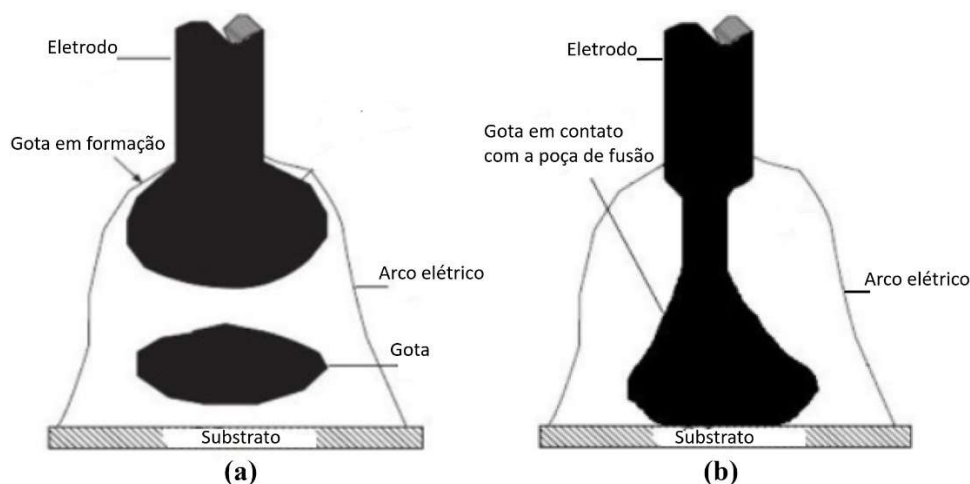
Esta forma de transferência é caracterizada por baixa intensidade de corrente e elevada tensão (grande comprimento de arco). A transferência do metal do tipo globular ocorre quando a intensidade de corrente não é suficiente para criar uma força eletromagnética capaz de destacar a gota. Assim, a gota continua a aumentar e pode ultrapassar o diâmetro do arame, conforme mostrado na Figura 9(a). O desprendimento das gotas é principalmente induzido pela gravidade. A transferência globular tende a ser muito instável devido às perturbações causadas ao arco pelo destacamento de grandes gotas e a ocorrência de respingos. Além disso, proporciona uma elevada taxa de deposição, porém com um aporte térmico considerável (Modenesi & Uribe, 2022).

2.4.2. Transferência do metal por curto-circuito

A transferência do metal por curto-circuito ocorre sob baixa intensidade de corrente e baixa tensão (comprimento de arco curto). O metal fundido na extremidade do arame é transferido para a poça de fusão quando o mesmo toca a superfície da poça, gerando um curto-circuito, conforme mostrado na Figura 9(b). A transferência por curto-circuito gera um aporte

térmico reduzido, porém, proporciona uma baixa taxa de deposição. Observa-se a ocorrência de respingos em um nível elevado, particularmente ao final de cada curto-circuito (Zhai, Xue, Wang, Tao, *et al.*, 2020; Pattanayak & Sahoo, 2021).

Figura 9 – Diferentes modos de transferência do metal: a) Globular; b) Curto circuito



Fonte: adaptado de Pattanayak & Sahoo (2021)

Além disso, segundo Zhiyong *et al.* (2009); Zhai *et al.* (2020), o curto-circuito em GMA com corrente pulsada difere do curto-circuito em GMA de corrente contínua. Durante a transferência por curto-circuito em GMA pulsado, a região de “estrangulamento” da gota é formada entre a gota e a ponta do eletrodo, antes do curto-circuito. No processo GMA de corrente contínua, a região de “estrangulamento” da gota é formada na ponte líquida, após o curto-circuito.

2.4.3. Transferência do metal do tipo curto-circuito controlado

Nas últimas décadas, o desenvolvimento tecnológico permitiu a evolução da transferência do metal com o curto-circuito controlado (do inglês: *Controlled Short-Circuiting* - CSC), cujas principais vantagens são o baixo aporte térmico, redução significativa de respingos e a alta estabilidade do processo (Pattanayak & Sahoo, 2021).

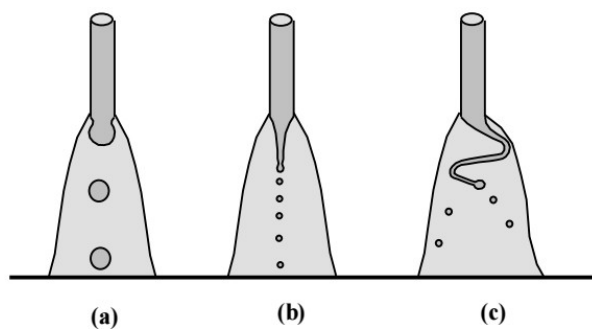
Segundo Santhakumari *et al.* (2024), demandas do setor industrial relacionadas à produtividade e qualidade, levaram ao desenvolvimento de fontes de energia com controle eletrônico do processo, com transferência controlada de metal. Como exemplos comerciais de diferentes fabricantes, cita-se as tecnologias CMT (*Cold Metal Transfer*), RMD (*Regulated Metal Deposition*), STT (*Surface Tension Transfer*), C.A. (*Cold Arc*), Steel Root e outras. O

curto-circuito controlado é obtido não somente por meio do controle eletrônico da forma de onda do arco, mas também por controles mecânicos dinâmicos no sistema de alimentação de arame. Assim, a transferência do metal torna-se mais suave, com menor aporte térmico e a redução de gotas repelidas e respingos.

2.4.4. Transferência do metal do tipo goticular

A transferência do metal do tipo goticular (do inglês: *spray*) ocorre quando a corrente é elevada além do nível da corrente de transição (limite entre a transferência globular e a transferência goticular). A transferência goticular é geralmente estável e com poucos respingos, embora o elevado aporte térmico limite o uso deste tipo de transferência do metal, principalmente para materiais sensíveis ao calor. Além disso, a transferência do metal do tipo goticular pode ser classificada como goticular projetada (*projected spray*), goticular com alongamento (*streaming spray*) e goticular rotacional (*rotational spray*), conforme Figura 10 (Pattanayak & Sahoo, 2021; Modenesi & Uribe, 2022).

Figura 10 – Formas de transferência do metal do tipo goticular: a) projetada, b) com alongamento e c) rotacional.



Fonte: (Modenesi & Uribe, 2022)

De acordo com Modenesi & Uribe (2022), a transferência goticular projetada ocorre com correntes pouco superiores à corrente de transição e é caracterizada por um pequeno estrangulamento da seção do eletrodo, com o diâmetro das gotas similar ao diâmetro do arame. Além disso, apresenta uma ótima estabilidade do arco e baixo nível de respingos e fumos. Para correntes superiores à corrente de transição, ocorre a transferência goticular com alongamento que é caracterizada pela formação de um filamento líquido na ponta do arame eletrodo, onde formam-se pequenas gotas que são transferidas axialmente para a peça. Eventualmente, quando o filamento líquido se torna muito longo e toca a poça de fusão, ocorrem curtos-circuitos que

tornam o processo instável. A transferência goticular rotacional ocorre com correntes ainda maiores, caracterizada quando a transferência deixa de ser axial e o filamento líquido passa a girar.

Segundo Zhang, Liguó e Kovacevic (1998) a transferência goticular com alongamento é considerada um processo estável e é caracterizada pela transferência direcional de gotas e pela frequência de transferência muito alta. Entretanto, devido ao impacto das gotas na poça de fusão, pode produzir penetração em forma de dedo, o que pode afetar as propriedades mecânicas. Portanto, a transferência goticular projetada é frequentemente considerada o processo ideal de transferência do metal devido ao tamanho uniforme das gotas, desprendimento regular, transferência direcional de gotas e poucos respingos. Por outro lado, no processo GMA convencional, devido à alta intensidade de corrente, o aporte térmico é muito elevado e se torna um problema, principalmente para materiais sensíveis ao calor.

2.5. GMA pulsado

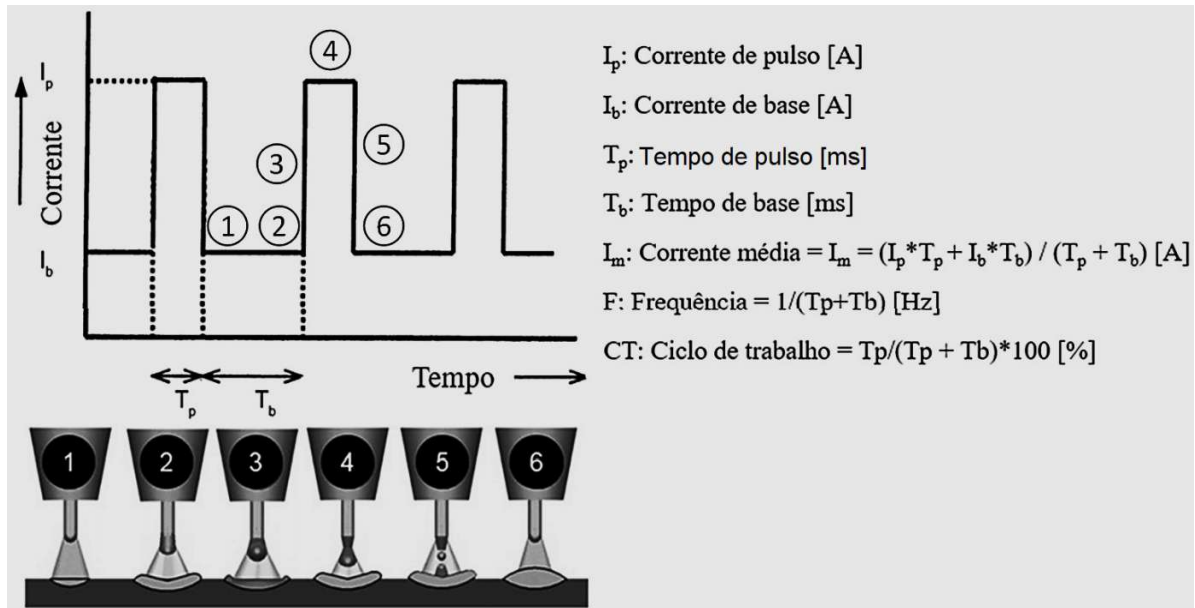
De acordo com Palani & Murugan (2006), o GMA com corrente pulsada proporciona uma transferência do metal goticular modificada, que foi desenvolvido para superar as limitações do processo GMA convencional. Segundo Zhang, Liguó e Kovacevic (1998) o processo GMA pulsado é caracterizado por uma baixa intensidade de corrente, apenas para manter o arco elétrico, e um pulso de corrente para fundir o arame e desprender a gota. Assim, a corrente média é reduzida e, consequentemente, o aporte térmico é minimizado, o que permite controlar a distorção e operar em velocidades de alimentação de arame mais baixas.

Sinais pulsados são utilizados para obter-se uma transferência do metal mais controlada, por meio de diferentes modos de destacamento de gotas, conforme parâmetros do processo (C. S. Wu *et al.*, 2005; Aldalur *et al.*, 2021).

2.5.1. Principais parâmetros de GMA pulsado

Palani & Murugan (2006) afirmam que o GMA pulsado é caracterizado por seis parâmetros essenciais: corrente de pulso, corrente de base, tempo de pulso, tempo de base, frequência de pulso e ciclo de trabalho, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Sinais de pulsos durante a transferência do metal



Fonte: adaptado de (Aldalur *et al.*, 2021)

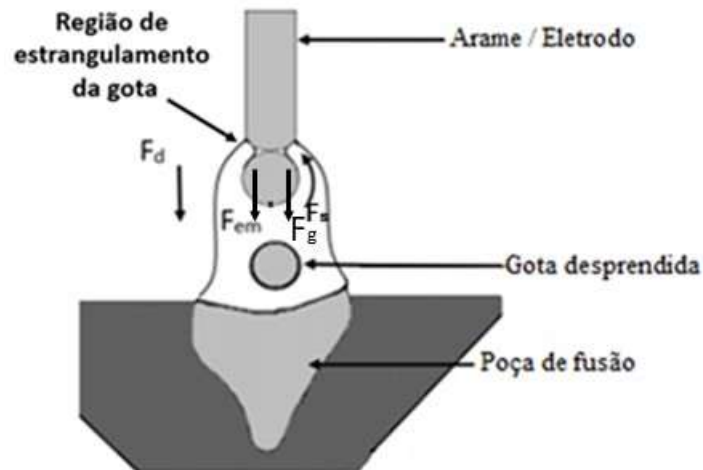
- Corrente de pulso (I_p): é o nível de corrente mais alto. A transferência do metal do tipo goticular é alcançada no pico da corrente quando as gotas são comprimidas e impulsionadas em direção à poça de fusão;
- Corrente de base (I_b): é o nível de corrente mais baixo na forma de onda pulsante. Esta é a corrente que mantém o arco elétrico estabelecido com baixa energia, embora não seja suficiente para produzir a transferência do metal;
- Tempo de pulso (T_p): Representa a largura do pulso e é o período de tempo entre o momento em que a corrente começa a aumentar e o momento em que começa a diminuir no final do pulso;
- Tempo de base (T_b): Representa a duração da corrente de base;
- Frequência do pulso (F): Representa o número de pulsos de corrente, que ocorrem em um segundo (pulsos por segundo) e é dado pelo inverso do tempo de ciclo (T) em segundos. O tempo de ciclo (T) é definido como o período desde o início de um pulso até o final do tempo de base imediatamente antes do próximo pulso;
- Ciclo de trabalho (CT): É definido como a razão entre o tempo de pulso e o tempo de ciclo.

2.5.2. Modos de Destacamento de Gotas obtidos do GMA pulsado

Segundo Hu & Tsai (2006); Mvola *et al.* (2018), a dinâmica da formação de gotas é definida pelo efeito geral das forças associadas, conforme mostrado na Figura 12. A força

gravitacional (F_g), a força eletromagnética (F_{em}) e a força de arrasto do plasma (F_d) atuam como forças de desprendimento. A tensão superficial (F_s) atua como força de retenção, principalmente em baixas correntes, que prendem a gota ao arame. Por outro lado, em alta corrente, a força eletromagnética atua para desprender pequenas gotas do arame.

Figura 12 – Processo GMA – Forças que influenciam o destacamento das gotas



Fonte: adaptado de Mvola *et al.* (2018)

Zhang *et al.* (1998) argumentam que durante o tempo de pulso no processo GMA pulsado, enquanto o eletrodo é fundido, uma gota continua crescendo. A geometria e a dinâmica da gota são progressivamente alteradas pela força gravitacional e pelo aumento do volume da gota. Além disso, a força de separação e a força de retenção mantêm-se equilibradas até que a gota se desprenda. De acordo com o material e o diâmetro do arame, existe uma tensão superficial máxima, que prende a gota ao arame. Quando a tensão superficial ultrapassa esse máximo, a gota se desprende. Além disso, tanto as forças de desprendimento quanto as de retenção dependem de vários parâmetros e condições que exigem um processo de controle complexo.

Scotti e Ponomarev (2008), afirmam que o destacamento da gota deve ocorrer no início da fase de base, logo após a fase de pulso. Neste caso, o destacamento forma uma gota quase esférica, sem a ocorrência de pequenas gotas sequenciais.

A corrente de pulso e o tempo de pulso são considerados os parâmetros críticos que determinam os modos de destacamento de gotas (Modenesi & Uribe, 2022). Zhang, Liguó e Kovacevic (1998) argumentam que o GMA pulsado pode produzir diferentes modos de destacamento de gotas de acordo com o ajuste dos parâmetros de pulso:

- UGMP

Segundo Modenesi & Uribe (2022), um tempo de pulso mais curto é insuficiente para promover o destacamento do metal fundido na ponta do eletrodo. Assim, o desprendimento de uma gota só ocorre após vários pulsos de corrente, o que caracteriza o modo destacamento de UGMP.

- UGPP

O modo de destacamento de UGPP pode ser obtido selecionando o tempo de pulso adequado. Além disso, a corrente de pulso deve ser maior que o nível de corrente de transição para induzir o desprendimento da gota em cada pulso e, assim, evitar UGMP. Quando a corrente de pulso é muito maior que a corrente de transição, as gotas são formadas e desprendidas muito rapidamente. Assim, o modo de destacamento de UGPP é obtido em uma faixa limitada de tempo de pulso.

- MGPP

Se o tempo de pulso for maior, a transferência goticular (com gotas menores do que o diâmetro do arame) pode ser obtida e caracterizada como um modo de destacamento de MGPP.

Segundo Palani & Murugan (2006), a aplicação do processo GMA pulsado depende do entendimento da relação entre vários parâmetros e os resultados desejados. Além disso, na prática, é muito complexo ajustar os parâmetros para uma determinada condição de trabalho. Nesse sentido, a interdependência dos parâmetros tem sido estudada por vários autores e alguns parâmetros teóricos foram definidos:

- Corrente de base (I_b) e Tempo de base (T_b)

A corrente de base mantém o arco elétrico, porém a energia produzida não é suficiente para induzir a transferência do metal. A transferência do metal é induzida principalmente por parâmetros de pulso e o tamanho da gota é influenciado principalmente pelas condições de base.

A baixa corrente de base é ajustada para reduzir o aporte térmico. Valores de corrente de base para diferentes materiais são apresentados pelos autores: aço carbono (30 a 50 A) e aço inoxidável austenítico (50 A).

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), os valores baixos da corrente de base influenciam pouco no destacamento das gotas. Entretanto, segundo estudos recentes, o tamanho da gota e a taxa de fusão podem ser fortemente influenciados pela intensidade e duração da corrente de base. O ajuste dos parâmetros de base possui como principal objetivo obter uma corrente média com valores inferiores aos valores da corrente de

transição. Desta forma, é possível se obter uma transferência goticular controlada, com um aporte térmico reduzido. A definição dos valores de I_b e T_b é baseada nos valores da corrente de pulso e tempo de pulso, com o objetivo de obter-se a corrente média desejada.

▪ Corrente de pulso (I_p) e Tempo de pulso (T_p)

As condições de pulso e de base foram relacionadas por uma combinação de funções exponenciais e Lorentzianas, conforme mostrado na Equação 1 (Palani & Murugan, 2006).

$$T_p = \left[(496.1 \times (1 - e^{-0.003 \times I_b T_b})) + \frac{270.1}{\frac{(I_b T_b - 188.2)^2}{8423.5}} \right] / I_p \quad \text{Equação 1}$$

A Equação 1 define um valor teórico aproximado para o tempo de pulso mínimo necessário para o desprendimento da gota em uma corrente de pulso específica.

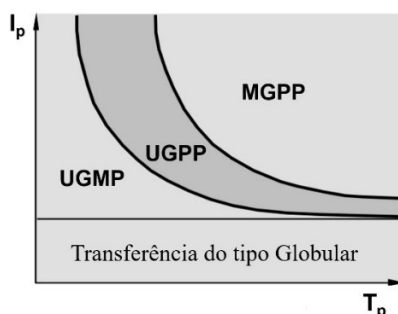
Agrawal e Kumar (2016) argumentam que a relação entre a corrente de pulso e a corrente de base (I_p/I_b) deve ser menor do que 10, para que proporcione um arco elétrico mais estável. Além disso, a energia consumida durante o pulso representada pelo produto $I_p \times T_p$ é o principal fator que define o destacamento das gotas (Scotti e Ponomarev, 2008).

Segundo Quintino & Allum (1984); Modenesi & Uribe (2022), a faixa de corrente de pulso e tempo de pulso para obter o modo de destacamento de UGPP pode ser definida de acordo com a Equação 2, considerando que os demais parâmetros são fixos.

$$I_p^n \cdot T_p = D \quad \text{Equação 2}$$

Onde D, identificado como a constante de destacamento, é um valor que depende do diâmetro do arame, tipo de material e gás de proteção; n é um coeficiente que tipicamente varia entre 1,1 e 2,0 (Norrish, 2006). Alguns autores consideram $n = 2$ como uma aproximação. Segundo Modenesi & Uribe (2022), observou-se a partir de experimentos, que a faixa de valores de I_p e T_p para a obtenção de UGPP é aproximadamente hiperbólica. As curvas da constante de destacamento delimitam os modos de destacamento de gotas do processo de GMA pulsado, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Curvas da constante de destacamento do processo GMA pulsado



Fonte: adaptado de Modenesi & Uribe (2022)

Considerando-se que a corrente de pulso deve ser maior que a corrente de transição (I_c) para a obtenção de UGPP, os valores de corrente de transição para arames de aço inoxidável são apresentados na Tabela 5 como referência.

Tabela 5 – Correntes de transição para arames de aço inoxidável

Diâmetro do arame [mm]	Corrente de transição [A]	Gás de proteção	Material
0,9	150	Ar - 1%O ₂	Aço inoxidável austenítico
1,2	195		
1,6	265		

Fonte: adaptado de (Modenesi & Uribe, 2022)

Nesse sentido, Agrawal e Kumar (2016) também apresentam a corrente de transição para diferentes materiais e diâmetros de arame, conforme mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Correntes de transição de diferentes materiais

Diâmetro do arame [mm]	Corrente de transição [A]		
	Alumínio	Aço carbono	Aço inoxidável
1	110	120	180
1,2	140	200	230
1,6	190	260	285

Fonte: adaptado de Agrawal e Kumar (2016)

Scotti e Ponomarev (2008) discordam da abordagem da constante de destacamento, considerada um método seguro por alguns autores, para extrapolar e definir valores de parâmetros de pulso. Nesse sentido, a definição de I_p e T_p pode ser realizada pela fixação de um ou mais valores de I_p , com a variação dos valores de T_p para cada I_p . Assim, torna-se possível caracterizar os modos de destacamento de gotas e

delimitar as regiões de UGMP, UGPP e MGPP. A corrente de base (I_b) e o tempo de base (T_b) são definidos constantes, para manter a corrente média (I_m) constante. Recomenda-se que I_b seja superior a 35-40 A, para a manutenção do arco elétrico.

- Corrente média (I_m)

Assumindo-se um formato de onda retangular, a corrente média pode ser calculada, conforme a Equação 3.

$$I_m = \frac{I_p T_p + I_b T_b}{T_p + T_b} \quad \text{Equação 3}$$

No processo GMA pulsado, quando a corrente média é maior que a corrente de transição (I_c), é possível obter melhores características de deposição.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), quanto maior I_m , o modo de UGPP é obtido em uma faixa mais estreita do tempo de pulso, principalmente para valores elevados da corrente de pulso.

- Tempo de ciclo (T)

O tempo de ciclo (T) pode ser calculado de acordo com o diâmetro de gota desejado, o diâmetro do arame-eletrodo e a velocidade de alimentação do arame, conforme mostrado na Equação 4.

$$T = \frac{240V_{gota}}{\pi d_e^2 v_a} \quad \text{Equação 4}$$

Onde V_{gota} é o volume da gota ($V_{gota} = (\pi d_g^3)/6$), d_g é o diâmetro da gota, d_e é o diâmetro do eletrodo e v_a é a velocidade de alimentação do arame. Além disso, o tempo de ciclo (T) pode ser calculado como $T = T_p + T_b$.

- Velocidade de alimentação do arame (v_a)

A estabilidade do arco é diretamente afetada pela velocidade de alimentação do arame, que deve estar alinhada com a taxa de fusão do arame. A fusão do arame no bico de contato pode ser causada pela baixa velocidade de alimentação do arame e a instabilidade do arco devido ao curto-circuito pode ser causada pela alta velocidade de alimentação do arame.

- Gás de proteção

A aplicação do processo GMA pulsado é restringida pelo tipo de gás de proteção.

A transferência do metal do tipo goticular pode ser obtida em GMA pulsado principalmente pelo uso de gás argônio como base das misturas gasosas. Modos estáveis de transferência do metal com um arco constrito podem ser obtidos usando a mistura de gás Argônio + O₂. A adição de O₂ pode melhorar a molhabilidade da poça de fusão. A recomendação de gás de proteção para aço inoxidável austenítico foi apresentada como Ar + 2% O₂ ou Ar + 2–3% CO₂, considerando uma vazão de gás de 12-16 L/min.

Segundo Modenesi & Uribe (2022), a adição de O₂ na mistura do gás de proteção até aproximadamente 5% pode reduzir a corrente de transição. Zhao *et al.* (2018) realizaram experimentos de deposição de cordões com GMA pulsado utilizando arame ER50-6 com diâmetro de 1,2 mm e compararam os resultados da transferência do metal com a aplicação de diferentes misturas de gases de proteção. Os autores citam que a adição de O₂ (2% – 5%) em uma mistura rica em Ar pode reduzir o coeficiente de tensão superficial do metal líquido.

Assim, devido à diminuição da tensão superficial na ponta do eletrodo, as gotas são desprendidas mais rapidamente, o que leva à redução do tamanho das mesmas na transferência do metal. Além disso, segundo Cunningham *et al.* (2018), no processo de MADA, a vazão adequada do gás garante a proteção da região da poça de fusão, o que minimiza a formação de óxidos, nitretos e porosidade.

- Distância do bico de contato à peça (DBCP)

Para a condição de UGPP, além do ajuste dos parâmetros de pulso conforme o diâmetro do arame, sua composição e tipo de gás de proteção, adota-se uma DBCP entre 15 e 18 mm (Scotti e Ponomarev, 2008).

Os parâmetros de pulso aplicados para o aço inoxidável ER316 L SI são apresentados no manual do fabricante da fonte de soldagem MTE Digitec – IMC, conforme Tabela 7. Os valores dos parâmetros consideram diâmetro do arame de 1,2 mm e gás de proteção 98%Ar + 2% O₂ para obter um diâmetro de gota de 1,35 mm.

Tabela 7 – Parâmetros de pulso para arame ER316 L SI (aço inoxidável) com diâmetro de 1,2 mm – Fonte de soldagem MTE Digitec – IMC

1	2	3	4	5	6	7	8
I_m (A)	I_{ef} (A)	I_p (I_a) (A)	t_p (t_a) (ms)	I_b (I_3) (A)	t_b (t_3) (ms)	v_a (m/min)	U_p (volt)
40	83	300	4.5	20	58.3	1.1	35.1
50	93	300	4.5	25	45.8	1.3	35.1
60	103	300	4.5	31	37.4	1.6	35.1
70	112	300	4.5	37	31.4	1.9	36.4
80	120	300	4.5	43	26.9	2.2	36.4
90	129	300	4.5	50	23.4	2.4	37.0
100	137	300	4.5	56	20.6	2.7	37.0
110	145	300	4.5	63	18.4	3.0	37.0
120	153	300	4.5	71	16.4	3.2	38.2
130	160	300	4.5	78	14.8	3.5	38.2
140	168	300	4.5	86	13.5	3.8	38.2
150	175	300	4.5	95	12.3	4.0	37.4
160	183	300	4.5	104	11.2	4.3	37.4
170	191	300	4.5	113	10.3	4.6	37.4
180	198	300	4.5	123	9.5	4.9	36.0
190	206	300	4.5	133	8.7	5.1	36.0
200	214	300	4.5	144	8.1	5.4	36.0
210	221	300	4.5	156	7.5	5.7	36.0
220	229	300	4.5	168	6.9	6.0	36.0
230	237	300	4.5	181	6.4	6.2	36.0

Fonte: Dutra *et al.*, 2002 (2002)

2.5.3. Caracterização do Modo de Destacamento de Gotas

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), a caracterização do modo de destacamento de UGPP é complexa e depende de experimentos laboratoriais como forma segura. Teoricamente, o instante de destacamento da gota poderia ser identificado pela presença de um pico na curva de tensão, devido ao aumento da resistência elétrica causado pelo estrangulamento da gota. Entretanto, o destacamento da gota pode ser mascarado por ruídos elétricos na aquisição da tensão. Nos métodos mais utilizados, além da aquisição de dados dos principais parâmetros, realiza-se uma filmagem com câmera de alta velocidade, para facilitar a observação da transferência da gota.

2.6. Influência da energia e temperatura intercamada na MADA

Segundo Andrade *et al.* (2024), o aporte térmico na MADA é um importante fator na determinação da geometria, da microestrutura e consequentemente das propriedades mecânicas do material depositado. Segundo Mohd Mansor *et al.* (2024), a corrente, a tensão e a velocidade de deslocamento são os principais parâmetros que determinam a energia no processo de MADA. Assim, a energia é tipicamente medida em J/mm e é calculada conforme a Equação 5:

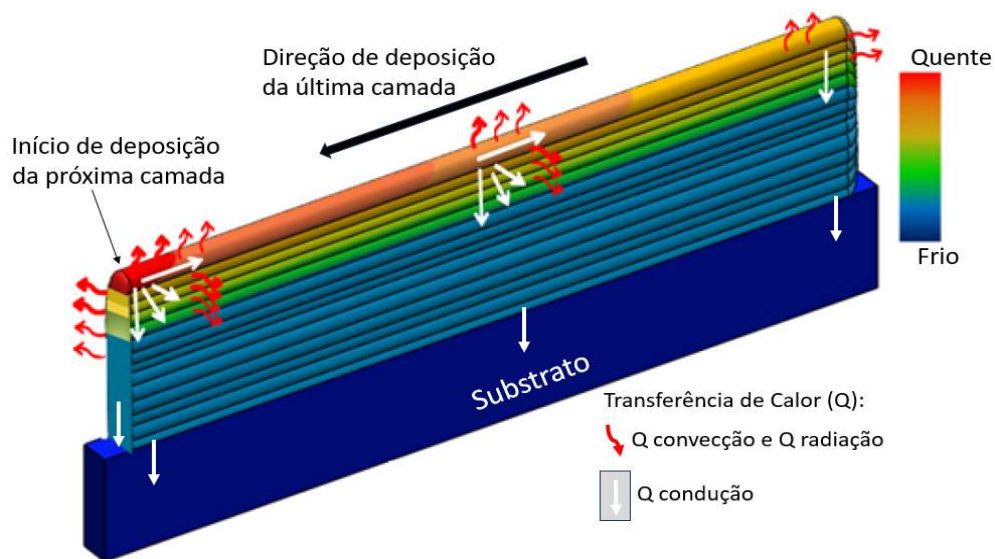
$$H = \frac{VxI}{v_d}$$

Equação 5

Onde, H representa a energia [J/mm], V é a tensão [V], I é a corrente [A], v_d é a velocidade de deslocamento [mm/s].

Andrade *et al.* (2024), ainda afirmam que, o substrato exerce influência relevante sobre a dissipação de calor da pré-forma durante a deposição de material, principalmente nas primeiras camadas, próximas do substrato com um elevado gradiente de temperatura, que acelera a transferência de calor por condução, conforme Figura 14.

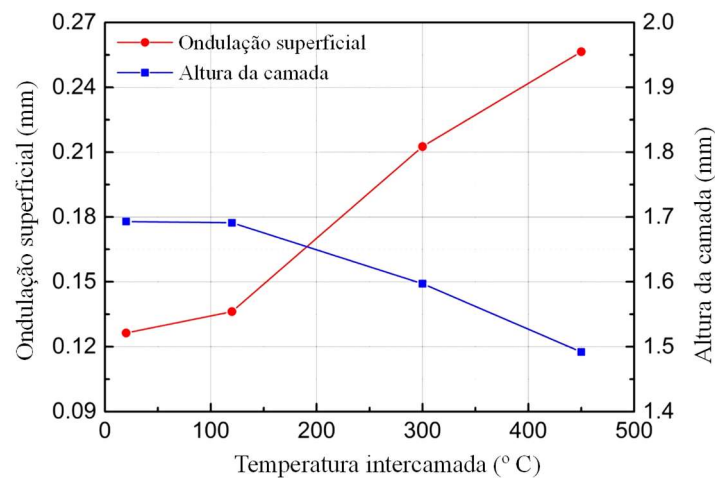
Figura 14 – Transferência de calor na pré-forma durante o processo de deposição



Fonte: adaptado de (Jorge *et al.*, 2022)

Neste sentido, Xiong *et al.* (2018), em uma pesquisa de MADA com aço de baixa liga H08Mn2Si, afirmam que quando a temperatura intercamada é mantida em um valor reduzido, a poça de fusão fica mais estável. Entretanto, se a temperatura intercamada for muito elevada, a transferência de calor por condução para as camadas inferiores é muito reduzida. Assim, o calor excessivo gera uma grande instabilidade na superfície da poça de fusão, com uma maior fluidez e tempo de solidificação, o que impacta no aumento da rugosidade superficial e na redução da altura das camadas, conforme Figura 15.

Figura 15 – Impacto da temperatura intercamada na rugosidade superficial e altura das camadas. Parâmetros: $v_a = 3,73$ m/min e $v_d = 30$ cm/min .



Fonte: adaptado de Xiong *et al.* (2018)

Em uma pesquisa de MADA utilizando arame de 1,2 mm de aço inoxidável duplex, Knezovic *et al.* (2020), afirmam que temperaturas intercamadas mais elevadas (em torno de 150° C), minimizam a ocorrência de porosidades, devido à redução do tempo para a formação de inclusões gasosas durante a solidificação do metal.

A partir de outra pesquisa de MADA em pré-forma delgada de aço inoxidável 316 L, Cunningham *et al.* (2019) observaram que o elevado aporte térmico provocou um efeito significativo nos resultados dos ensaios, com o módulo de elasticidade médio de 164,3 GPa, comparado ao módulo de elasticidade médio de 127,7 GPa, obtido com uma deposição de baixo aporte térmico. Além disso, os autores afirmam que o tempo de resfriamento intercamada pode minimizar a distorção das peças produzidas, e que uma temperatura intercamada de 160° C reduz a tensão induzida do substrato.

2.7. Análise das Características Geométricas dos Materiais Fabricados por MADA

De acordo com o objetivo e aplicação, a geometria exigida do metal depositado no processo MADA é diferente da geometria exigida do cordão nos processos de soldagem. Parâmetros geométricos como altura e largura da camada, penetração, rugosidade e ondulação da superfície foram estudados como parâmetros de saída do processo de MADA em pesquisas recentes (Ren *et al.*, 2019; Zhao, Lee, *et al.*, 2019; da Silva *et al.*, 2020; Singh & Khanna, 2021; Song *et al.*, 2021; Thien *et al.*, 2022; Xiao *et al.*, 2022).

Os principais parâmetros geométricos de saída do processo de MADA citados pelos autores foram a altura e a largura da camada. Entretanto, Aldalur, Suárez e Veiga (2021)

argumentam que a penetração adequada tem um papel importante para peças que requerem integridade metalúrgica.

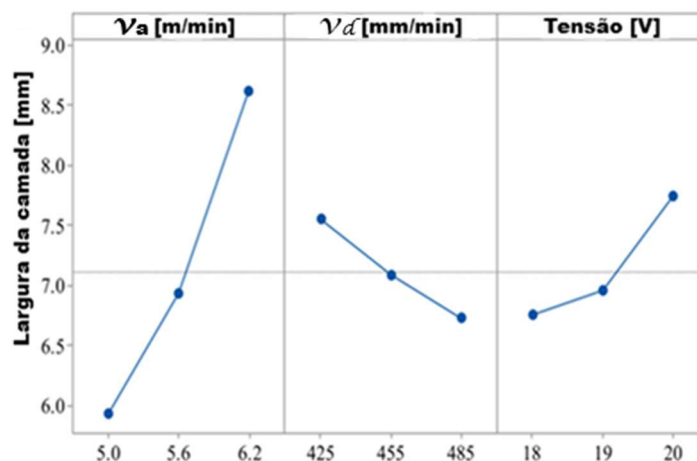
Normalmente, o processo de MADA é ajustado para obter altura máxima e largura mínima. Neste sentido, Zhiyong *et al.* (2009) argumentam que a menor altura da camada leva à demanda por um tempo de construção mais longo e camadas mais largas podem exigir mais pós-processamento para remoção de material. Entretanto, segundo Zhao *et al.* (2019) há um conflito natural entre alguns parâmetros e objetivos. Os autores citam um exemplo de que camadas de baixa altura podem produzir paredes com melhor qualidade superficial, apesar de aumentar o número de camadas e, consequentemente, reduzir a produtividade.

De acordo com o objetivo deste estudo, além dos parâmetros de pulso, é essencial compreender a influência das variáveis do processo no modo de destacamento de gotas e na geometria final. Descobertas recentes de MADA sobre interdependências entre as variáveis do processo e os principais parâmetros geométricos foram apresentados:

- A largura e a altura da camada aumentam à medida que a corrente aumenta (Xiao *et al.*, 2022). Por outro lado, o aumento da tensão e do comprimento do arco produz gotas maiores que impactam no aumento da largura da camada e na redução da altura (Vora, Parikh, *et al.*, 2022).

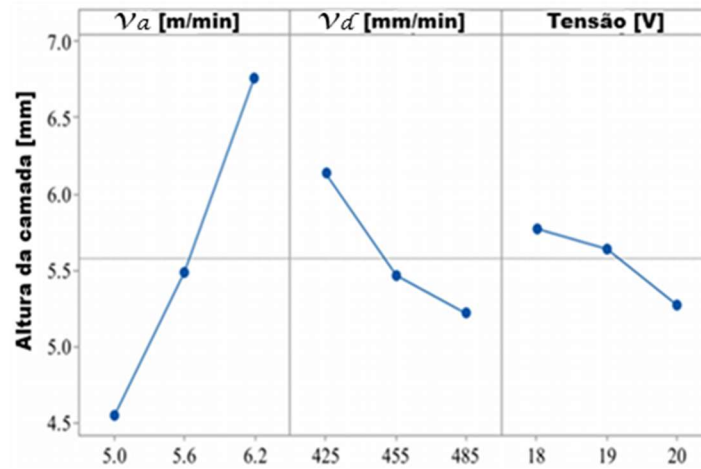
- A largura e a altura da camada aumentam devido ao aumento da velocidade de alimentação do arame e à elevada deposição de material. Além disso, a largura e a altura da camada diminuem à medida que a velocidade de deslocamento aumenta e uma quantidade menor de material é depositada, conforme mostrado na Figura 16 e na Figura 17 (Vora, Parikh, *et al.*, 2022).

Figura 16 – Efeitos das variáveis do processo sobre a largura da camada



Fonte: adaptado de Vora *et al.* (2022)

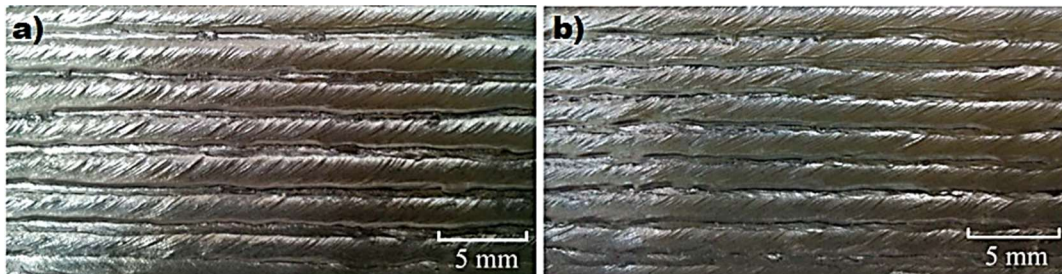
Figura 17 – Efeitos das variáveis do processo sobre a altura da camada



Fonte: adaptado de Vora *et al* (2022)

Em contraste, a rugosidade superficial é reduzida pelo aumento da velocidade de deslocamento. Neste caso, devido à menor altura da camada, o efeito de degrau entre as camadas depositadas é minimizado, conforme mostrado na Figura 18.

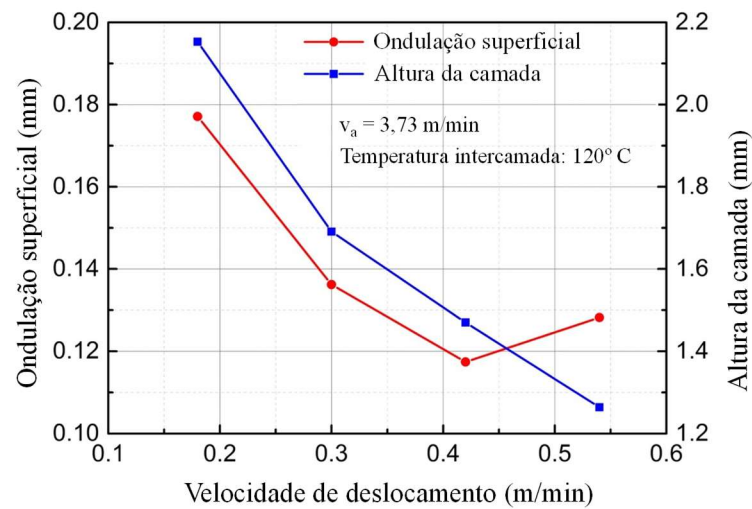
Figura 18 – a) Efeito predominante de degraus e b) Efeito suavizado de degraus



Fonte: adaptado de Xiong *et al.* (2018)

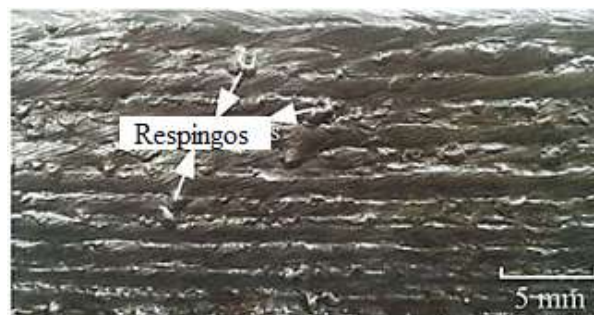
Entretanto, uma velocidade de deslocamento mais alta pode produzir arco instável e respingos em excesso, o que leva a um aumento na rugosidade superficial, conforme mostrado na Figura 19 e na Figura 20 (Xiong *et al.*, 2018).

Figura 19 – Efeitos da velocidade de deslocamento sobre a rugosidade superficial e a altura da camada



Fonte: Xiong *et al.* (2018)

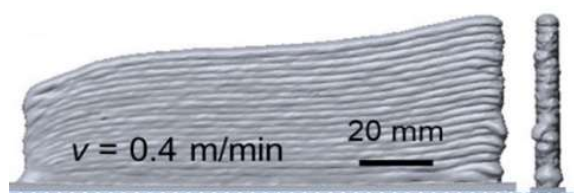
Figura 20 – Respingos em excesso na superfície da parede



Fonte: (Xiong *et al.* (2018)

▪ A precisão geométrica da deposição do metal pode ser reduzida devido ao planejamento inadequado da trajetória de sobreposição (Song *et al.*, 2021). A precisão geométrica da camada depositada conforme planejado reduz o consumo de material, pós-processamento de usinagem e, conseqüentemente, o custo (Bendia *et al.*, 2021). A deposição de sentido único pode causar uma variação na altura da pré-forma, como mostrado na Figura 21. Este fenômeno ocorre devido à deposição de metal na posição de estabelecimento do arco ser maior do que na região estável (Le *et al.*, 2020a). A trajetória de deposição em zigue-zague é geralmente aplicada para obter altura regular da pré-forma (Le *et al.*, 2022).

Figura 21 – Variação na altura da pré-forma



Fonte: Le *et al.* (2022)

▪ Segundo Xiong *et al.* (2018), valores de rugosidade superficial baixos são alcançados com maior número de camadas, e consequentemente, a altura de cada camada é menor. Por outro lado, a elevada rugosidade superficial é causada pelo aquecimento excessivo da poça de fusão e seu transbordamento lateral, devido ao calor acumulado na deposição das camadas sobrepostas. O aumento da largura da camada também é afetado pelo acúmulo de calor que aumenta a poça de fusão (da Silva *et al.*, 2020). Estes problemas podem ser superados pelo tempo de espera entre as camadas durante o processo de deposição (Xiong *et al.*, 2018; Singh & Khanna, 2021). Além disso, o tempo de espera entre camadas é aplicado para manter a altura regular da parede, devido ao calor acumulado na deposição bidirecional multicamadas (da Silva *et al.*, 2020).

▪ A DBCP pode ser alterada durante o processo de deposição devido à altura irregular da parede e, consequentemente, causar respingos, possível alteração do modo de transferência, além da variação da largura (Bendia *et al.*, 2021).

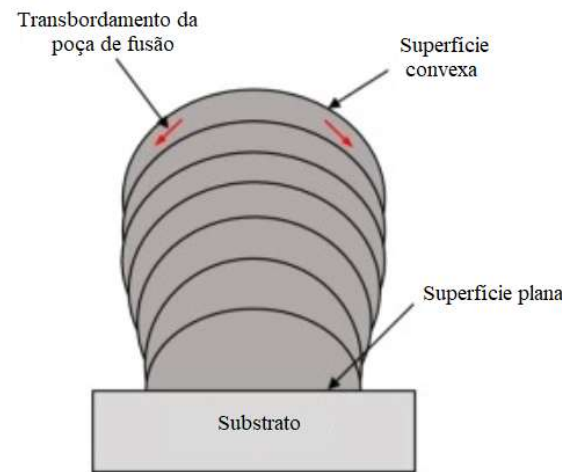
▪ A modelagem da deposição de camada única é essencial para obter uma superfície plana precisa, previsível e controlável e, assim, leva a produtos de qualidade com a geometria desejada (Sood & Karmuhilan, 2018).

▪ Segundo Wu *et al.* (2017); Coelho *et al.* (2022), o acúmulo de calor na deposição sucessiva de camadas do processo de MADA, leva à redução da taxa de transferência de calor do metal na poça de fusão.

Bai *et al.* (2018); Corradi *et al.* (2020); Coelho *et al.* (2022) ainda afirmam que, a primeira camada é depositada em uma superfície plana sobre o substrato, porém, as demais camadas sobrepostas são depositadas sobre uma superfície convexa. Assim, à medida que a altura da parede aumenta, o metal líquido flui por mais tempo em uma superfície convexa, o que gera o efeito do transbordamento e consequentemente, o aumento gradual da largura da parede, conforme mostrado na Figura 22. Além disso, a cada deposição de uma nova camada, a camada anterior é parcialmente refundida,

causando assim um aumento no volume da poça de fusão que contribui para o problema de transbordamento.

Figura 22 – Aumento gradual da largura da parede

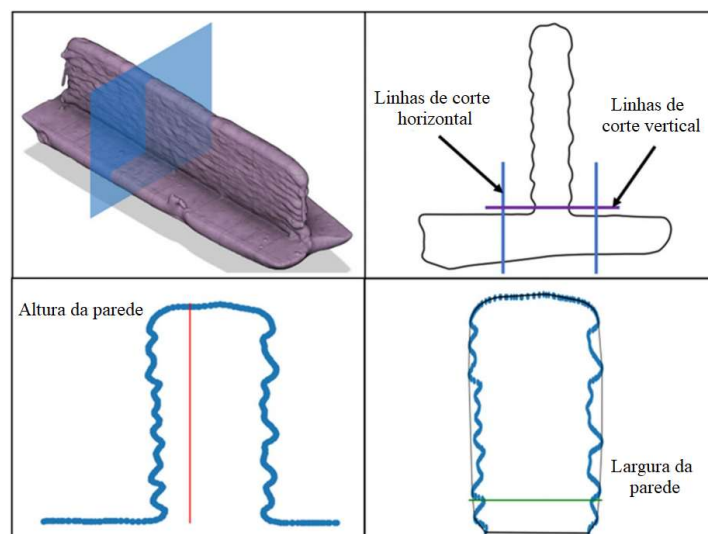


Fonte: adaptado de Corradi *et al.* (2020)

2.7.1. Métodos de análise geométrica para a MADA

Thien *et al.* (2022) apresentam uma análise geométrica de paredes depositadas por MADA baseada em GMA, com arame de aço ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. Após a fabricação, as paredes foram escaneadas por um dispositivo LASER FARO®. O processo de escaneamento permitiu a análise geométrica das paredes, conforme Figura 23, eliminando a necessidade de se realizar um corte transversal nas amostras.

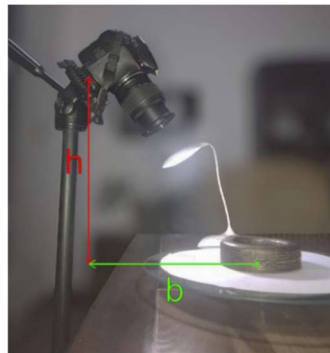
Figura 23 – Análise geométrica da parede por escaneamento



Fonte: adaptado de Thien *et al.* (2022)

Segundo de Moraes Coelho *et al.* (2022), o método de fotogrametria pode ser uma alternativa viável e de baixo custo para a inspeção visual e análise geométrica de componentes fabricados por manufatura aditiva. A peça utilizada para a inspeção visual foi fabricada por MADA baseada em GMA, com arame de aço ER70S-6. O processo de fotogrametria foi realizado com a peça montada sobre uma mesa giratória e uma câmera fotográfica digital posicionada, conforme Figura 24.

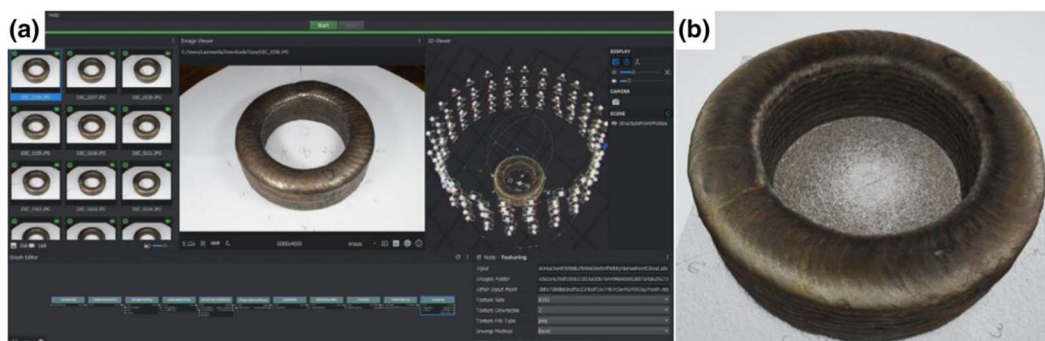
Figura 24 – Sistema montado para fotogrametria



Fonte: adaptado de (de Moraes Coelho *et al.*, 2022)

Foram capturadas 24 imagens a cada rotação completa, em um total de 7 rotações completas, obtendo assim um total de 168 imagens. O software Meshroom® (gratuito e de código aberto) foi utilizado para processar as imagens e gerar o modelo 3D, conforme Figura 25.

Figura 25 – a) Tela do software Meshroom® e b) Modelo 3D da peça



Fonte: adaptado de de Moraes Coelho *et al.* (2022)

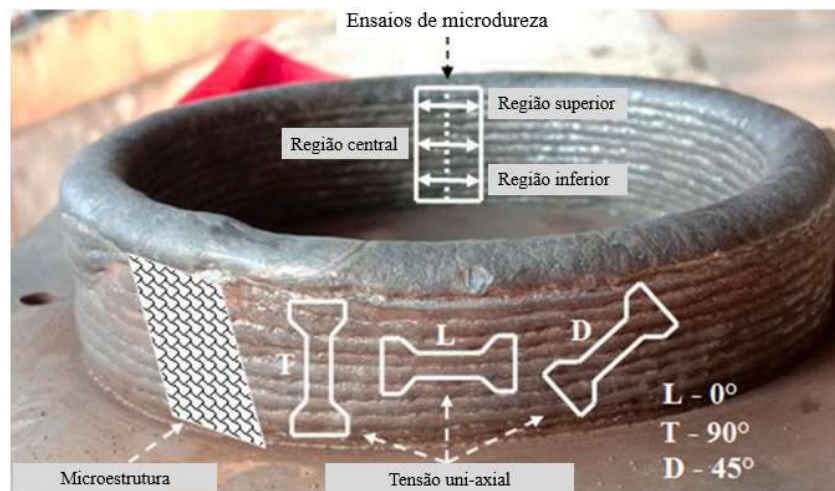
2.8. Análise das Propriedades Mecânicas dos Materiais Fabricados por MADA

Apesar da existência da norma ISO/ASTM TR 52905 para ensaios não destrutivos de peças fabricadas por MADA, ainda não existem procedimentos específicos que estabeleçam os

ensaios, preparo de corpos de prova e dimensões recomendadas. Estudos recentes da MADA têm utilizado procedimentos e dimensões de corpo de prova adaptados de acordo com a geometria da pré-forma.

Nagasai, Malarvizhi e Balasubramanian (2022) apresentam um estudo de paredes cilíndricas depositadas pelos processos GMA e CMT utilizando arame de aço inoxidável AWS ER 308L, com diâmetro de 1,2 mm. As propriedades mecânicas foram obtidas por meio de ensaios de tração uniaxial e micro dureza. Os corpos de prova para ensaio de tração foram extraídos em três orientações conforme mostrado na Figura 26. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, com uma velocidade de 0,6 mm/min.

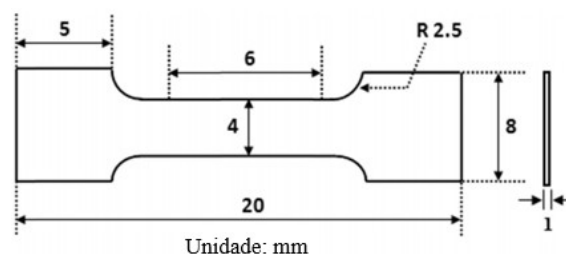
Figura 26 – Plano de ensaios e extração dos corpos de prova



Fonte: adaptado de Nagasai, Malarvizhi e Balasubramanian (2022)

Os autores utilizaram o padrão ASTM E8/E8M como referência e citam que o corpo de prova miniaturizado conforme mostrado na Figura 27 é aplicado em peças pequenas, para ensaios de tração em manufatura aditiva metálica, principalmente baseada em LASER.

Figura 27 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Nagasai, Malarvizhi e Balasubramanian (2022)

Da Silva *et al.* (2020) apresentam um estudo de deposição multicamada sob um sistema de resfriamento denominado *Near Immersion Active Cooling* (NIAC). O processo de deposição foi realizado pelo processo CMT utilizando arame AWS ER 5356, com diâmetro de 1,0 mm. As propriedades mecânicas foram caracterizadas por ensaios de tração. Os corpos de prova foram extraídos da região central da pré-forma, considerando as direções de deposição longitudinal e vertical, conforme mostrado na Figura 28. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, com uma velocidade de 1 mm/min.

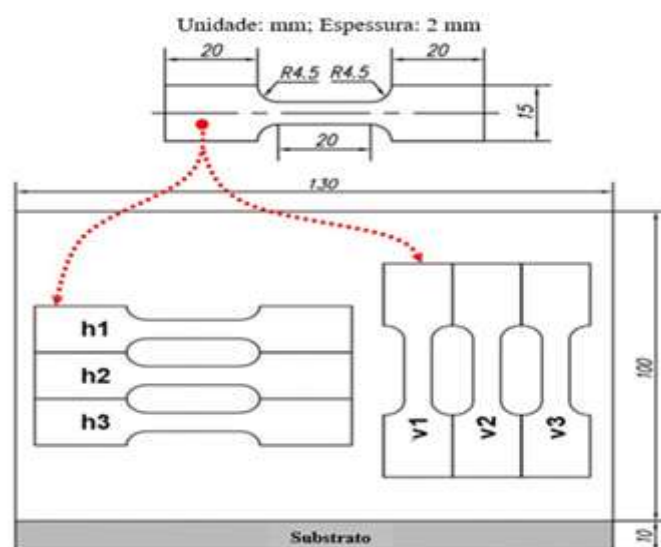
Figura 28 – Plano de extração e dimensões dos corpos de prova



Fonte: Da Silva *et al.* (2020)

Le, Mai e Hoang (2020) apresentam um estudo de deposição multicamada executada pelo processo GMA utilizando arame de aço AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm. As propriedades mecânicas foram caracterizadas por ensaios de tração e micro dureza. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram extraídos em duas orientações, conforme mostrado na Figura 29. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, com uma velocidade de 1,2 mm/min.

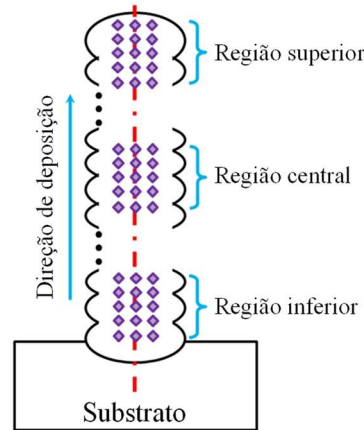
Figura 29 – Plano de extração e dimensões dos corpos de prova



Fonte: adaptado de Le, Mai e Hoang (2020)

Os ensaios de micro dureza foram realizados em três regiões da seção transversal conforme mostrado na Figura 30.

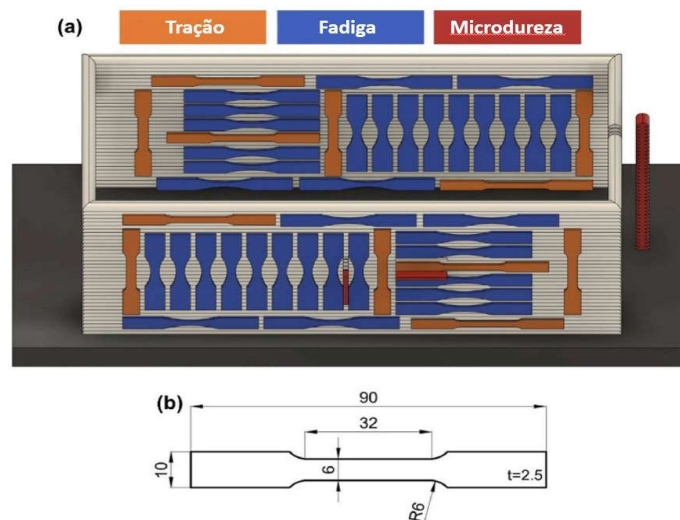
Figura 30 – Plano dos ensaios de micro dureza na seção transversal



Fonte: adaptado de Le, Mai e Hoang (2020)

Em um estudo de MADA baseada em GMA, os autores (Ayan & Kahraman, 2024), utilizaram arame de aço inoxidável AWS ER 308LSi, com diâmetro de 1,2 mm. As propriedades mecânicas foram caracterizadas por ensaios de tração, fadiga e micro dureza. Os corpos de prova foram extraídos em diferentes orientações, conforme mostrado na Figura 31. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, com uma velocidade de 2 mm/min.

Figura 31 – a) Plano de extração dos corpos de provas; b) dimensões dos corpos de prova para o ensaio de tração



Fonte: adaptado de (Ayan & Kahraman, 2024)

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1. Materiais e equipamentos

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), campus Xanxerê. Os seguintes equipamentos e materiais foram aplicados:

- Fonte de potência MTE Digitec 600 - IMC;
- Arame de aço inoxidável ER 308L, com diâmetro de 1.0 mm;
- Substrato de aço inoxidável 316L (comprimento:180 mm, altura: 20 mm, espessura:10 mm);
- Gás de proteção 98% Ar, 2% O₂;
- Bancada com dispositivo de movimentação bidirecional Tartílope – V1 IMC;
- Sistema de aquisição de dados - SAP®-V4;
- Software Sinal® – Versão 2.0 – LRSS – UFMG;
- Câmera de alta velocidade – CMOS – Phantom® Miro® Lab-110, com lente-filtro 632 nm;
- Software Phantom® *Camera Control* (PCC) – *Version 3.8*;
- Câmera digital DSLR Canon® EOS Rebel T7 com lente de 18-55 mm;
- Software Meshroom® – *Version 2023.2.0*;
- Software Blender® - *Version 3.6.12*;
- Software Image J® - *Version 1.54h*;
- Máquina universal de ensaio de materiais - WDW-100 E – Time Group®;
- Durômetro Modelo LHR-150A - Leeb®;
- Software Minitab® 22.3 (64-bit).

As composições químicas do arame e do substrato são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Composições químicas do arame e do substrato

Materiais	Composição química (% em peso)									
	C	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Mn	Si	Fe
Arame ER 308 L	0,02	-	-	20,49	8,11	-	-	1,78	0,37	69,23
Substrato 316 L	0,016	0,03	0,001	16,63	10,99	2,05	0,26	1,25	0,5	68,27

Fonte: o autor (2024)

3.1.1. Sistema de MADA baseada em GMA pulsado

O sistema de MADA baseada em GMA pulsado é composto por uma fonte GMA e um

dispositivo de movimento bidirecional, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Sistema MADA baseado em GMA pulsado



Fonte: o autor (2024)

A tocha possui um ajuste manual de altura, e a base de fixação do substrato foi acoplada ao dispositivo de movimento bidirecional, conforme mostrado na Figura 33a. O substrato foi fixado nas extremidades, conforme mostrado na Figura 33b, para minimizar possíveis distorções causadas pelo ciclo térmico de aquecimento e resfriamento durante o processo de deposição de material.

Figura 33 – a) Sistema de fixação da tocha; b) Fixação do substrato

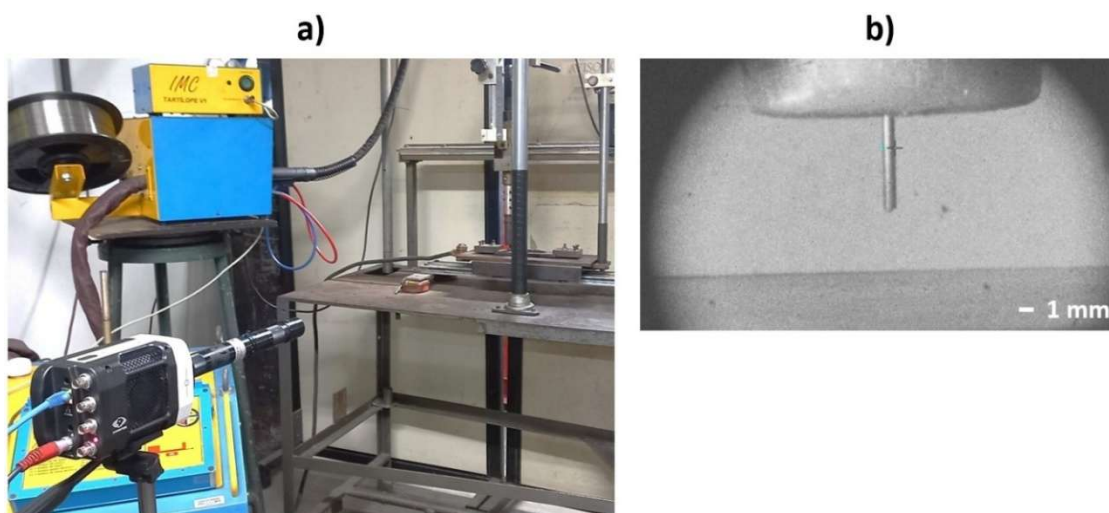


Fonte: o autor (2024)

3.1.2. Câmera de alta velocidade

As imagens dos modos de destacamento foram obtidas por meio de uma câmera de alta velocidade, modelo Phantom® Miro® Lab-110 com resolução máxima de 1280 x 800 (1 Mpx) a 1600 fps. A câmera foi ajustada com uma resolução de 512 x 384 pixels, com uma taxa de amostragem de 1000 pps e tempo de exposição de 2 μ s. Além disso, utilizou-se uma lente com filtro de comprimento de onda de 632 nm para limitar a luminosidade sobre o sensor da câmera. A câmera foi instalada em uma posição fixa, em frente ao sistema de MADA, no mesmo nível da deposição sobre o substrato, conforme mostrado na Figura 34a. O foco da imagem da câmera foi ajustado para cobrir a região entre o bocal da tocha e o substrato, conforme mostrado na Figura 34b, a fim de capturar a imagem do destacamento de gotas.

Figura 34 – a) Câmera de alta velocidade instalada em frente ao sistema de MADA;
b) Foco da imagem da câmera de alta velocidade



Fonte: o autor (2024)

3.1.3. Dispositivo de aquisição de dados

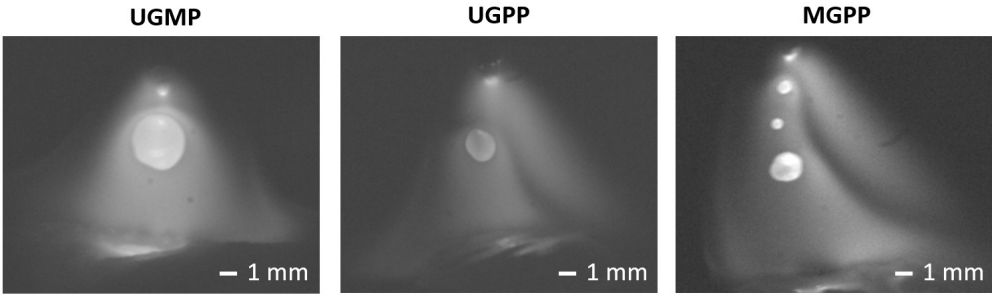
Durante o processo de deposição, os equipamentos do sistema de MADA foram conectados a um dispositivo de aquisição de dados SAP®-V4, para coletar e analisar os principais parâmetros do processo (corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e temperatura). Os dados coletados no dispositivo de aquisição foram processados e analisados por meio do software Sinal®.

3.2. Caracterização dos modos de destacamento de gotas

Para caracterizar os modos de destacamento de gotas (UGMP, UGPP e MGPP),

utilizou-se a câmera de alta velocidade para observar o momento do destacamento, durante o processo de deposição, conforme mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Modos de destacamento de gotas



Fonte: o autor (2024)

Além das imagens dos modos de destacamento, realizou-se a coleta dos principais parâmetros de pulso durante o processo, por meio do sistema de aquisição de dados. Desta forma, foi possível validar a caracterização dos modos de destacamento de gotas, não somente pelas imagens, mas por meio da análise simultânea dos parâmetros de pulso, compreendendo assim, a influência dos parâmetros do processo na transferência do metal.

3.3. Definição dos parâmetros operacionais da MADA baseada em GMA pulsado

Os modos de destacamento de gotas são fortemente influenciados por alguns parâmetros. Assim, identificaram-se os principais parâmetros que influenciam os modos de destacamento de gotas. De acordo com (Palani & Murugan, 2006; Modenesi & Uribe, 2022), selecionou-se os parâmetros de pulso que podem influenciar os modos de destacamento de gotas: corrente de pulso (I_p), tempo de pulso (T_p), corrente de base (I_b), tempo de base (T_b) e velocidade de alimentação do arame (W), enquanto os demais parâmetros foram fixados durante os experimentos, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros fixos para a deposição das pré-formas

Parâmetros	Valor	Ref.
Vazão do Gás de proteção (98% Ar + 2% O ₂) [L/min]	18	(Palani & Murugan, 2006)
Distância do bico de contato à peça (DBCP) [mm]	21	(Butola <i>et al.</i> , 2017)
Comprimento do arco [mm]	8	(Zhai, Xue, Wang, Chen, <i>et al.</i> , 2020)
Ângulo da tocha [°]	90	(Xiong <i>et al.</i> , 2018)
Trajetória de deposição	zig-zag	(Le <i>et al.</i> , 2022)
Velocidade de deslocamento [m/min]	0,18	(Xiong <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: o autor (2024)

Antes do processo de deposição, cada substrato foi limpo mecanicamente e polido para remover qualquer camada de sujeira e óxido. Os experimentos foram realizados por meio da deposição de camadas sobrepostas (pré-formas) sobre um substrato, através do processo GMA pulsado (CC+), utilizando arame de aço inoxidável ER 308 L, com diâmetro de 1,0 mm.

3.3.1. Definição dos valores dos parâmetros de pulso

Inicialmente, para a definição e cálculo dos parâmetros de pulso de referência, estabeleceu-se a corrente média de 120 A, considerando-se este valor menor do que a corrente de transição de 150 A, conforme (Modenesi & Uribe, 2022). Além disso, de acordo com os parâmetros indicados para aço inoxidável no manual da fonte GMA (Dutra *et al.*, 2002), estabeleceu-se a frequência de pulso de 60 Hz, a velocidade de alimentação do arame de 4,35 m/min e o tempo de pico de 4 ms. Devido ao menor diâmetro do arame utilizado neste experimento (1,0 mm) em relação ao diâmetro do arame indicado no manual (1,2 mm), considerou-se uma corrente de pulso de 250 A.

O tempo de ciclo (T) foi calculado conforme a Equação 4, sendo: $T = \frac{240V_{gota}}{\pi d_e^2 W}$.

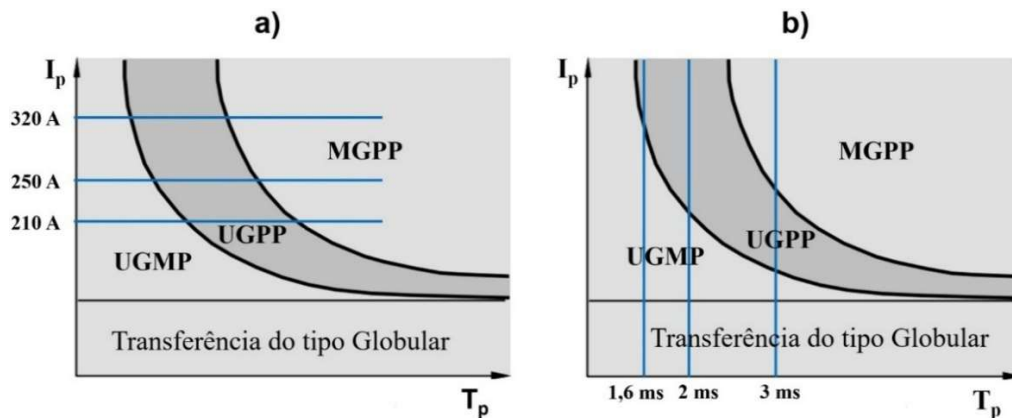
Considerou-se o diâmetro da gota de 1,22 mm, próximo ao diâmetro do eletrodo de 1 mm (Dutra *et al.*, 2002; Scotti *et al.*, 2012; Zhao, Lee, *et al.*, 2019). Assim, obteve-se um tempo de ciclo (T) de 16,7 ms que foi aplicado de forma constante, para manter a frequência de pulso constante de 60 Hz. O valor da corrente de base foi definido para manter a corrente média de 120 A. Os demais parâmetros foram ajustados para obter a corrente média e a frequência de pulso estabelecidas.

Com o objetivo de definir mais parâmetros de pulso para obter os modos de destacamento de gotas, estabeleceu-se variações da corrente de pulso e do tempo de pulso por meio da projeção de pontos sobre as curvas da constante de destacamento (Modenesi & Uribe, 2022), conforme apresentado na seção 2.5.2.

A partir dos parâmetros de referência definidos inicialmente, estabeleceu-se três níveis de corrente de pulso constante (210 A, 250 A e 320 A), com o tempo de pulso variando em oito níveis, gerando assim, linhas horizontais traçadas sobre as curvas da constante de destacamento, conforme Figura 36a. Em seguida, estabeleceu-se três níveis de tempo de pulso constante (1,6 ms; 2,0 ms e 3,0 ms), com a corrente de pulso variando em oito níveis, gerando assim, linhas verticais traçadas sobre as curvas da constante de destacamento, conforme Figura 36b.

Figura 36 – Curvas dos modos de destacamento de gotas.

a) Correntes de pulso constantes; b) Tempos de pulso constantes

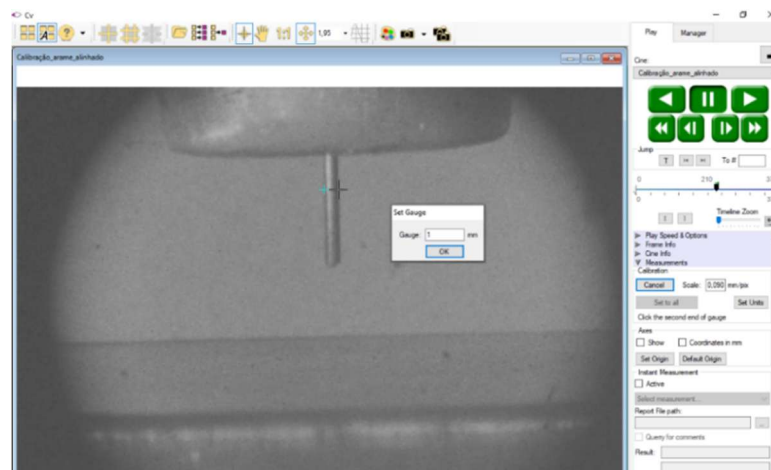


Fonte: o autor (2024)

Além disso, para manter o comprimento do arco de 8 mm, a velocidade de alimentação do arame foi ajustada e fixada para obter os três modos de destacamento de gotas.

Durante os experimentos, o comprimento do arco foi medido por meio do software da câmera de alta velocidade Phantom® Camera Control (PCC) – Version 3.8. A dimensão da imagem (pixels) foi calibrada com a dimensão conhecida do diâmetro do arame de 1 mm, conforme Figura 37.

Figura 37 – Tela de calibração dimensional da imagem da câmera de alta velocidade



Fonte: o autor (2023)

Assim, realizou-se 48 experimentos com diferentes combinações de parâmetros de pulso. Os valores dos parâmetros de pulso utilizados e os modos de destacamento de gotas obtidos nos experimentos são apresentados nos Apêndices A e B.

3.4. Seleção dos parâmetros de pulso para deposição das pré-formas

A partir dos experimentos realizados e dos resultados obtidos, selecionou-se os parâmetros de pulso para cada modo de destacamento de gotas, considerando-se como critério de seleção, uma intensidade de corrente de pulso intermediária e a estabilidade obtida no modo de destacamento de gotas. Os parâmetros selecionados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros selecionados para os modos de destacamento de gotas

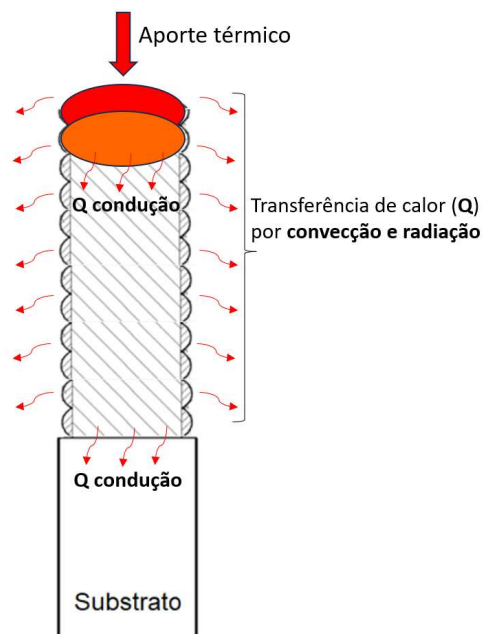
Parâmetros de pulso							Comprimento do arco [mm]	Modo de destacamento de gotas
I_p [A]	T_p [ms]	I_b [A]	T_b [ms]	W [m/min]	Frequência de pulso [Hz]	Corrente média [A]		
210	1,6	110,5	15,1	4,2	60	120	8,1	UGMP
250	2,4	98,3	14,3	5,3	60	120	8,0	UGPP
285	3,0	84,1	13,7	5,2	60	120	7,6	MGPP

Fonte: o autor (2024)

3.5. Definição da temperatura e tempo intercâmara

Considerou-se o resfriamento passivo das pré-formas durante a deposição, com a ocorrência de transferência de calor por condução, radiação e convecção natural, conforme Figura 38.

Figura 38 – Transferência de calor na pré-forma durante o processo de deposição



Fonte: o autor (2023)

Para minimizar o acúmulo de calor gerado pelo aporte térmico durante a deposição das camadas, estabeleceu-se uma temperatura intercamada de 150°C antes da deposição da camada subsequente (Knezovic *et al.*, 2020). Assim, durante a deposição da primeira pré-forma, a temperatura intercamada foi monitorada utilizando um pirômetro infravermelho posicionado a uma distância de 75 mm. O feixe do pirômetro foi direcionado na face superior central após a deposição de cada camada, conforme Figura 39.

Figura 39 – Monitoramento da temperatura intercamada durante o processo de deposição



Fonte: o autor (2023)

Além disso, mediu-se o tempo de resfriamento de cada camada depositada até a temperatura de 150° C. Houve um aumento do tempo (entre 1 min e 2,5 min) com maior variação até a camada 20. A partir da camada 21, o tempo intercamada continuou aumentando, com uma taxa reduzida. A partir da camada 30, o tempo necessário para o resfriamento foi de aproximadamente 4,5 min. Assim, estabeleceu-se faixas de tempo intercamada conforme Tabela 11, que foram utilizados na deposição das demais pré-formas.

Tabela 11 – Tempos intercamada durante a deposição

Camada	Tempo intercamada até 150° C
1 a 20	2 min
21 a 35	3,5 min
36 em diante	4,5 min

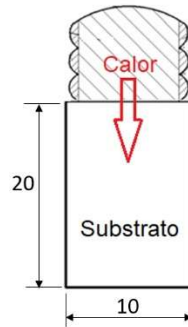
Fonte: o autor (2024)

3.6. Deposição das pré-formas de múltiplas camadas

Para garantir a repetibilidade estatística do processo, definiu-se fabricar três amostras iguais de cada modo de destacamento de gotas, totalizando 9 amostras.

A deposição foi realizada sobre o substrato fixado de forma a simular uma pré-forma existente de 20 mm de altura e 10 mm de espessura, conforme Figura 40.

Figura 40 – Dimensões da seção transversal do substrato

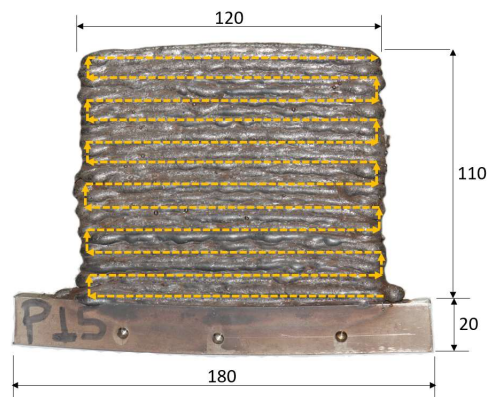


Fonte: o autor (2024)

Buscou-se assim, durante o processo de deposição, garantir que a área de transferência de calor por condução das primeiras camadas fosse aproximadamente igual às demais camadas subsequentes.

O processo de deposição foi realizado de acordo com a trajetória em zigue-zague, alternando o ponto inicial entre as extremidades opostas da parede, em camadas sucessivas, para obter uma altura regular da parede. Para manter uma DBCP constante no processo de deposição das camadas, foi utilizado um gabarito de 21 mm de altura. Além disso, o dispositivo de fixação da tocha possuía uma escala milimetrada de referência para a movimentação vertical. As pré-formas foram depositadas com um comprimento de 120 mm e uma altura de 110 mm, conforme Figura 41.

Figura 41 – Trajetória de deposição e dimensões finais das pré-formas



Fonte: o autor (2024)

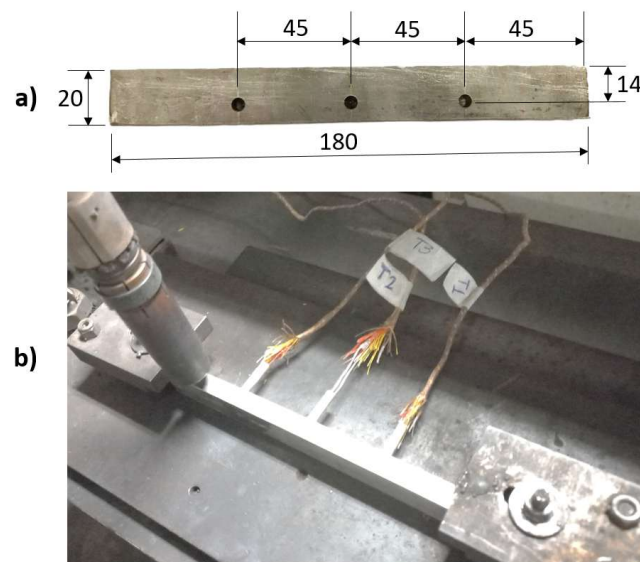
Considerando a manutenção dos parâmetros estabelecidos para cada camada, assumiu-se que os modos de destacamento de gotas permanecem consistentes ao longo de todo o processo de deposição da pré-forma.

3.7. Análise do ciclo térmico durante a deposição

O ciclo térmico nas pré-formas foi monitorado de forma indireta por meio da fixação de três termopares do tipo k no substrato, conforme Figura 42.

Figura 42 – a) Localização dos furos no substrato para fixação dos termopares;

b) Termopares fixados no substrato

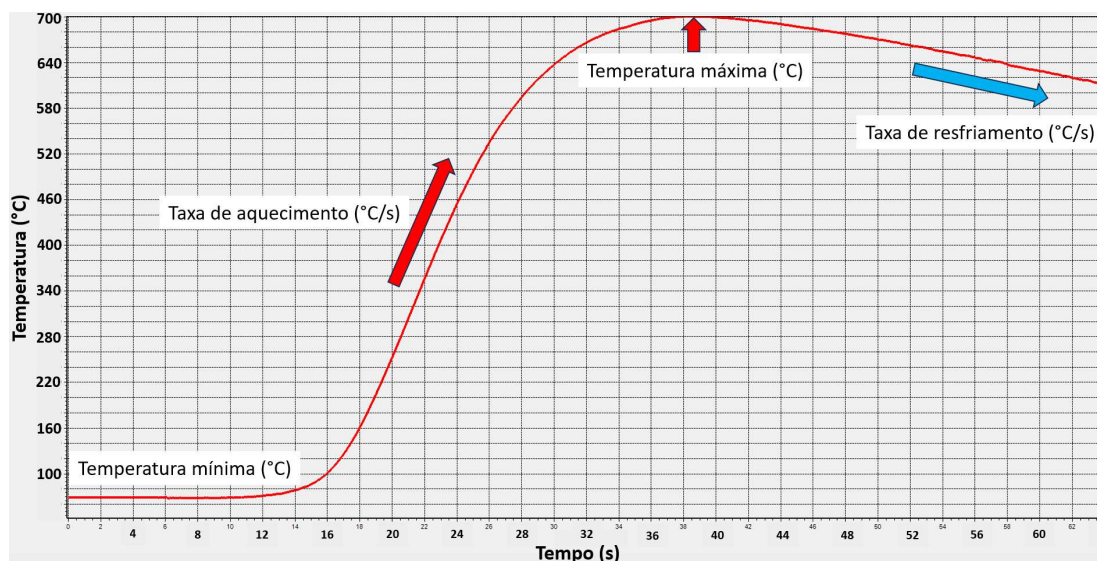


Fonte: o autor (2024)

3.7.1. Análise e processamento dos dados do ciclo térmico

Os dados de temperatura dos termopares foram coletados durante o processo de deposição das camadas, por meio do dispositivo de aquisição de dados. Posteriormente, os dados de temperatura foram processados no software Sinal®. Assim, realizou-se a análise dos ciclos térmicos correspondentes à deposição de cada camada, considerando-se os seguintes dados: temperatura mínima, taxa de aquecimento, temperatura máxima e taxa de resfriamento, conforme Figura 43.

Figura 43 – Curva do ciclo térmico durante a deposição de uma camada



Fonte: o autor (2024)

A partir dos dados correspondentes de cada camada, calculou-se a média dos parâmetros para grupos de camadas e assim possibilitou-se uma comparação dos resultados entre os diferentes modos de destacamento de gotas.

3.7.2. Energia

Além da análise do ciclo térmico, calculou-se a energia gerada pelos diferentes modos de destacamento de gotas, aplicando-se a Equação 5: $H = \frac{VxI}{v_d}$

3.8. Medição das gotas durante o destacamento

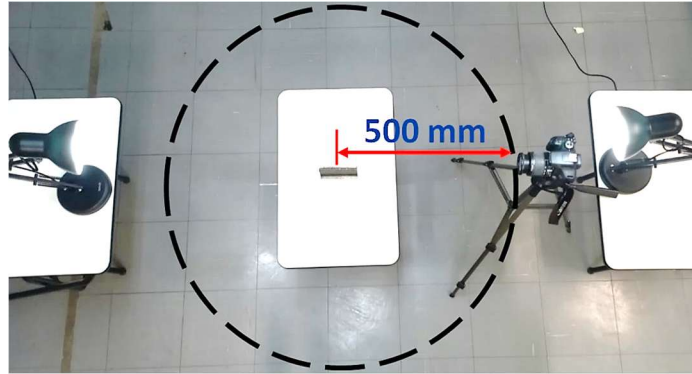
Para compreender melhor os efeitos dos modos de destacamento de gotas na geometria das pré-formas, realizou-se análises dimensionais e medições da velocidade das gotas através do arco elétrico, utilizando o software PCC da câmera de alta velocidade.

3.9. Análise geométrica das pré-formas

A geometria das amostras de pré-formas foi detalhada e analisada por meio do processo de fotogrametria, conforme apresentado na seção 2.7.1. Ao término de cada deposição, as amostras foram limpas e posicionadas sobre uma mesa. A captura das imagens foi realizada utilizando-se uma câmera digital Canon®. Posicionava-se a câmera digital alinhada frontalmente com a amostra e realizava-se a captura de 60 fotos, deslocando-se o tripé sobre

uma circunferência (15 fotos em cada quadrante de 90°), a uma distância de 500 mm da peça, conforme Figura 44.

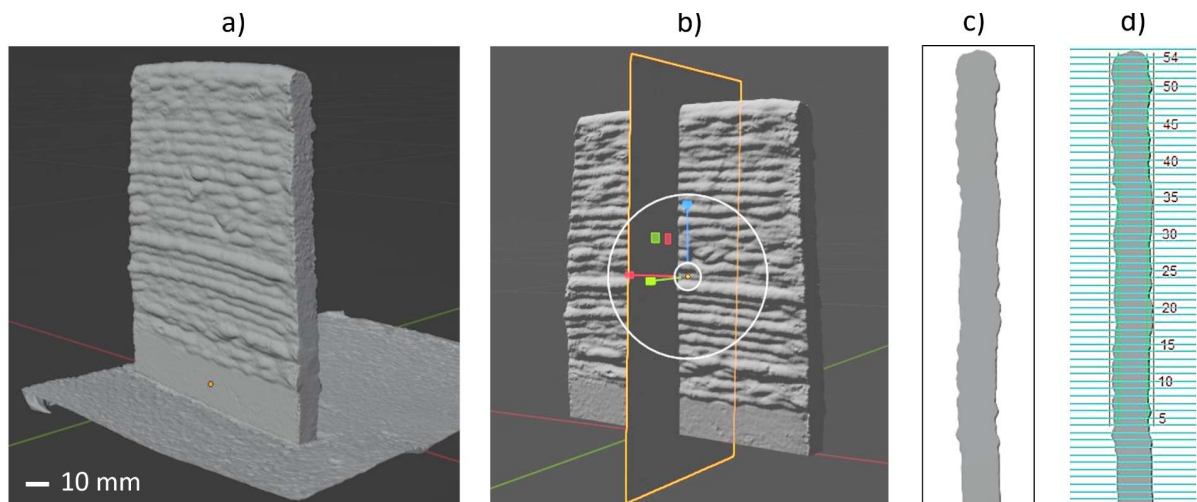
Figura 44 – Montagem dos equipamentos para a realização da fotogrametria



Fonte: o autor (2024)

Em seguida, na mesma circunferência, reposicionou-se a câmera em um ângulo de 45° acima da peça, para que a superfície superior da mesma fosse obtida. Realizou-se assim, a captura de mais 16 fotos (4 fotos em cada quadrante de 90°). Após a captura das fotos, descarregou-se as mesmas no software Meshroom® para o processamento e geração do modelo 3D. Na sequência, utilizou-se o software de edição de imagens Blender® para realizar o corte nas seções transversais e o software Image J® para a medição, conforme etapas mostradas na Figura 45.

Figura 45 – a) Imagem 3D gerada no Meshroom®; b) Corte da seção transversal central no Blender®; c) Seção transversal obtida para medição; d) Medição no Image J®

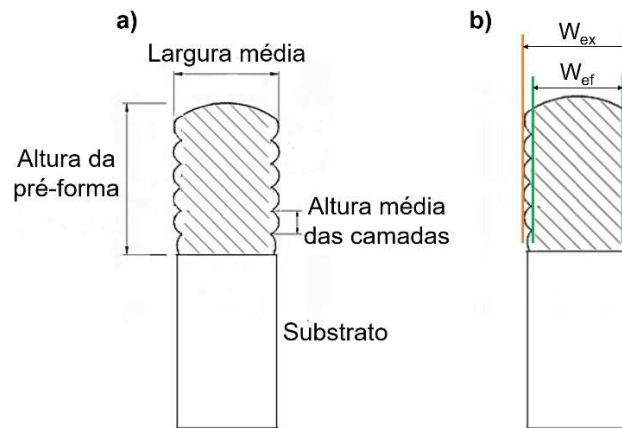


Fonte: o autor (2024)

Foram analisadas três seções transversais de cada pré-forma, considerando-se as duas seções das extremidades e a seção central. O ajuste da escala no software Image J® foi realizado por meio da definição das dimensões conhecidas do substrato.

Na análise geométrica, foram avaliadas a altura total das pré-formas, o número de camadas, a altura média das camadas e a largura média das camadas, conforme mostrado na Figura 46a. Além disso, para avaliar e comparar a ondulação da superfície lateral das pré-formas, as distâncias máximas totais de pico a vale foram medidas (JAFARI *et al.*, 2021), considerando-se a largura externa máxima (W_{ex}) e a largura efetiva mínima (W_{ef}), conforme mostrado na Fig. 46b.

Figura 46 – Parâmetros geométricos analisados na seção transversal da pré-forma



Fonte: adaptado de Zhao, Li, *et al.* (2019)

Desta forma, calculou-se o índice de ondulação superficial (SW_{index}), considerando a diferença entre a área total da seção transversal e a área efetiva da seção transversal das pré-formas, dividida pela altura analisada. Considerando-se que ambos os lados da pré-forma devem ser usinados para eliminar a ondulação, o resultado final deve ser dividido por 2, conforme a Equação 6 (Yehorov *et al.*, 2019; Dahat *et al.*, 2020).

$$SW_{index} = \frac{\text{Área } W_{ex} - \text{Área } W_{ef}}{2 \times \text{altura analisada}} \quad \text{Equação 6}$$

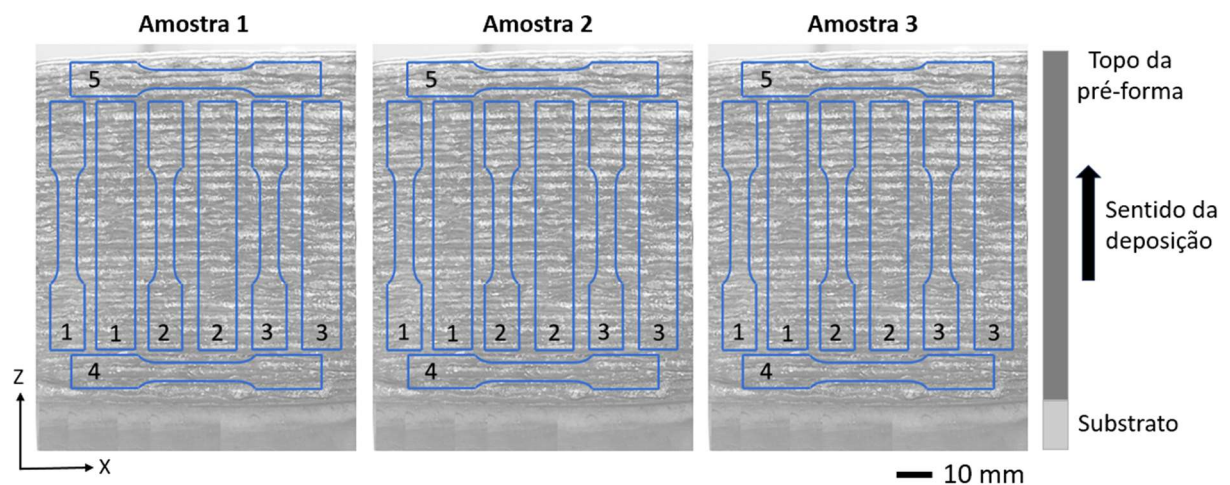
Uma altura de 60 mm foi analisada na região central das pré-formas, pois essa área é considerada a de maior estabilidade e homogeneidade durante a deposição. O SW_{index} representa tanto a ondulação da superfície quanto a quantidade de material a ser removido durante o pós-processamento após a deposição. Portanto, quanto menor o SW_{index} , menos material precisa ser removido.

Por fim, para a análise comparativa dos resultados, obteve-se a média dos valores das seções de cada amostra de pré-forma e em seguida a média dos valores obtidos entre as três amostras de cada modo de destacamento de gotas.

3.10. Análise das propriedades mecânicas das pré-formas

A análise das propriedades mecânicas foi obtida por meio da realização de ensaios de resistência à tração e dureza. Os corpos de prova foram extraídos de três amostras de cada modo de destacamento, conforme Figura 47. Os perfis dos corpos de prova foram posicionados verticalmente (eixo z) ao longo da trajetória de deposição, contemplando regiões distintas da pré-forma (lateral esquerda, região central e lateral direita). Além disso, extraiu-se corpos de prova para ensaio de tração, posicionados horizontalmente (eixo x) nas regiões inferior e superior das amostras.

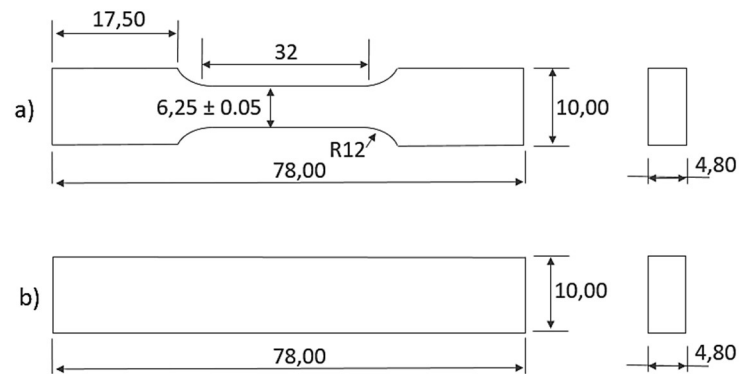
Figura 47 – Plano de extração dos corpos de prova



Fonte: o autor (2024)

As pré-formas foram fresadas na espessura de 4,8 mm, considerando o aproveitamento do material depositado e a norma ASTM A370-23. Após o fresamento, os corpos de prova foram cortados em eletroerosão a fio, conforme dimensões apresentadas na Figura 48.

Figura 48 – Dimensões [mm] dos corpos de prova: a) ensaio de tração; b) ensaio de dureza



Fonte: o autor (2024)

Após a usinagem, observou-se os corpos de prova densos, sem defeitos como poros ou trincas.

3.10.1. Ensaio de resistência à tração

Os procedimentos dos ensaios de tração foram definidos conforme normas ASTM A370-23 / ASTM E8M. Os ensaios de tração foram realizados sob temperatura ambiente (em torno de 25° C), em uma Máquina Universal WDW-100 E – Time Group, com capacidade de 100 kN, conforme Figura 49.

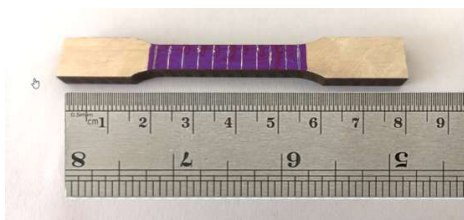
Figura 49 – a) Máquina de ensaio de tração; b) Detalhe da fixação do corpo de prova



Fonte: o autor (2024)

Antes da realização dos ensaios, cada corpo de prova foi medido e as dimensões foram registradas no software de controle da máquina universal. A velocidade de ensaio foi ajustada para 2 mm/min. A medição da deformação foi realizada pelo cálculo da diferença entre o comprimento final e inicial do corpo de prova. Assim, realizou-se a marcação de dez divisões iguais sobre o comprimento útil dos corpos de prova, conforme Figura 50.

Figura 50 – Marcação no comprimento útil do corpo de prova



Fonte: o autor (2024)

3.10.2. Ensaio de dureza

Os procedimentos dos ensaios de dureza foram definidos conforme normas ASTM A370-23 / ASTM E18. Os ensaios de dureza foram realizados sob temperatura ambiente (em torno de 25 ° C), em um Durômetro Modelo LHR-150A - Leeb®, com capacidade de 150 kgf, conforme Figura 51.

Figura 51 – Durômetro



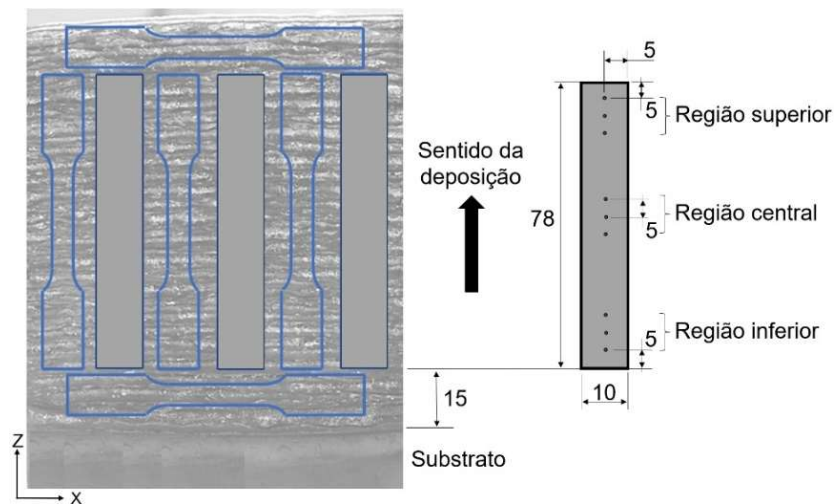
Fonte: o autor (2024)

Estabeleceu-se a escala de Dureza Rockwell B (HRB) e assim, foi utilizada a esfera de 1/16'' como indentador. Além disso, ajustou-se a carga prévia de 10 kgf e a carga total de 100 kgf para a realização dos ensaios.

Para analisar os efeitos do acúmulo de calor durante a deposição, estabeleceu-se três regiões nos corpos de prova (inferior, central e superior), com 3 pontos de medição em cada

região. Foram retirados três corpos de prova de cada pré-forma, sendo dois das laterais e um da área central, conforme Figura 52. De acordo com a norma ASTM E18, as indentações do ensaio devem ter distanciamento suficiente em relação à borda do corpo de prova (maior ou igual a 2,5 vezes o diâmetro da indentação) e entre as respectivas indentações de ensaio (maior ou igual a 3 vezes o diâmetro da indentação). Assim, os pontos de medição foram definidos com uma distância mínima de 5 mm das bordas e entre as indentações. Além disso, para evitar a influência da diluição das primeiras camadas com o substrato nos resultados do ensaio, o primeiro ponto de medição na região inferior foi posicionado à uma distância de 20 mm do substrato (equivalente à aproximadamente 8 camadas de deposição).

Figura 52 – Plano dos ensaios de dureza (dimensões em mm)



Fonte: o autor (2024)

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização dos modos de destacamento de gotas

A validação da caracterização dos modos de destacamento de gotas foi realizada durante o processo de deposição, por meio das imagens da câmera de alta velocidade, juntamente com a análise dos dados coletados.

4.1.1. Análise dos parâmetros

Os dados da corrente pulsada e a velocidade de alimentação do arame foram coletados pelo sistema de aquisição SAP®-V4 durante a deposição, em um intervalo total de 40 s. Após o processamento dos dados no software Sinal®, obteve-se os resultados conforme apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados dos parâmetros de pulso coletados pelo sistema de aquisição

Modo de destacamento de gotas	Parâmetros de pulso								W [m/min]	
	V [V]	I _m [A]	I _p		T _p		I _b			T _b
			[A]		[ms]		[A]			[ms]
			Valor méd.	Valor máx.	Valor méd.	Valor méd.	Valor mín.	Valor méd.		
UGMP	30,88	130,08	202,49	228,46	2,06	119,94	115,58	14,64	5,46	
UGPP	29,37	132,28	248,99	275,06	2,78	108,97	103,84	13,94	5,49	
MGPP	28,02	128,97	282,60	309,45	3,33	90,81	85,85	13,38	5,50	

Fonte: o autor (2024)

Observou-se que os valores reais medidos pelo sistema de aquisição foram ligeiramente diferentes dos valores ajustados na fonte de energia. O que pode ter sido causado por interferências no sistema de aquisição de dados.

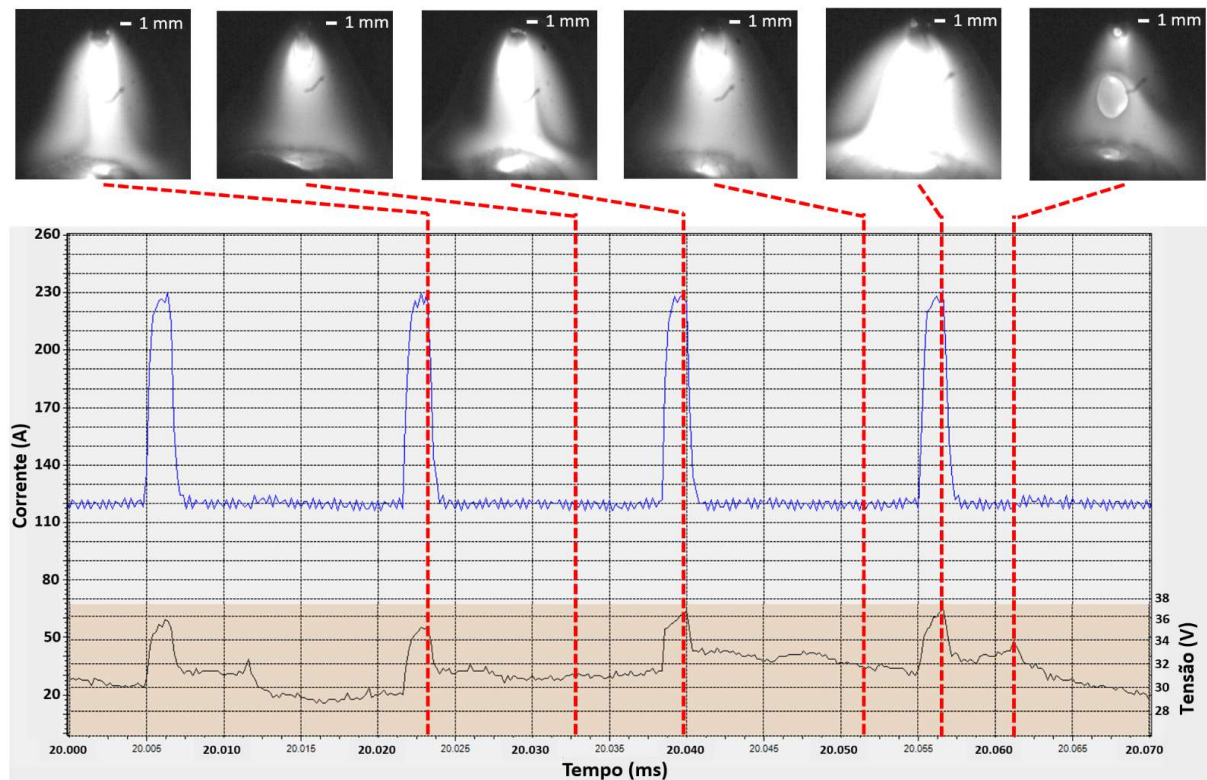
Para a análise gráfica dos parâmetros de pulso, selecionou-se um período de estabilidade dos processos, com 30 pulsos, correspondente à um intervalo de 500 ms. Os gráficos de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame dos modos de destacamento de gotas são apresentados nos Apêndices C, D e E.

4.1.2. Análise dos modos de destacamento de gotas conforme parâmetros de pulso

Para validar os modos de destacamento de gotas, selecionou-se um período de estabilidade do processo correspondente a um intervalo de 8 s, a partir das imagens obtidas pela câmera de alta velocidade. O período das imagens foi sincronizado baseado no tempo dos sinais de corrente e tensão.

Apresenta-se na Figura 53 um período de 70 ms do modo de destacamento de UGMP, na qual detalha-se os momentos de formação e o destacamento de uma gota no período de três pulsos.

Figura 53 – Imagens do modo de destacamento de UGMP com as respectivas formas de onda de corrente e tensão

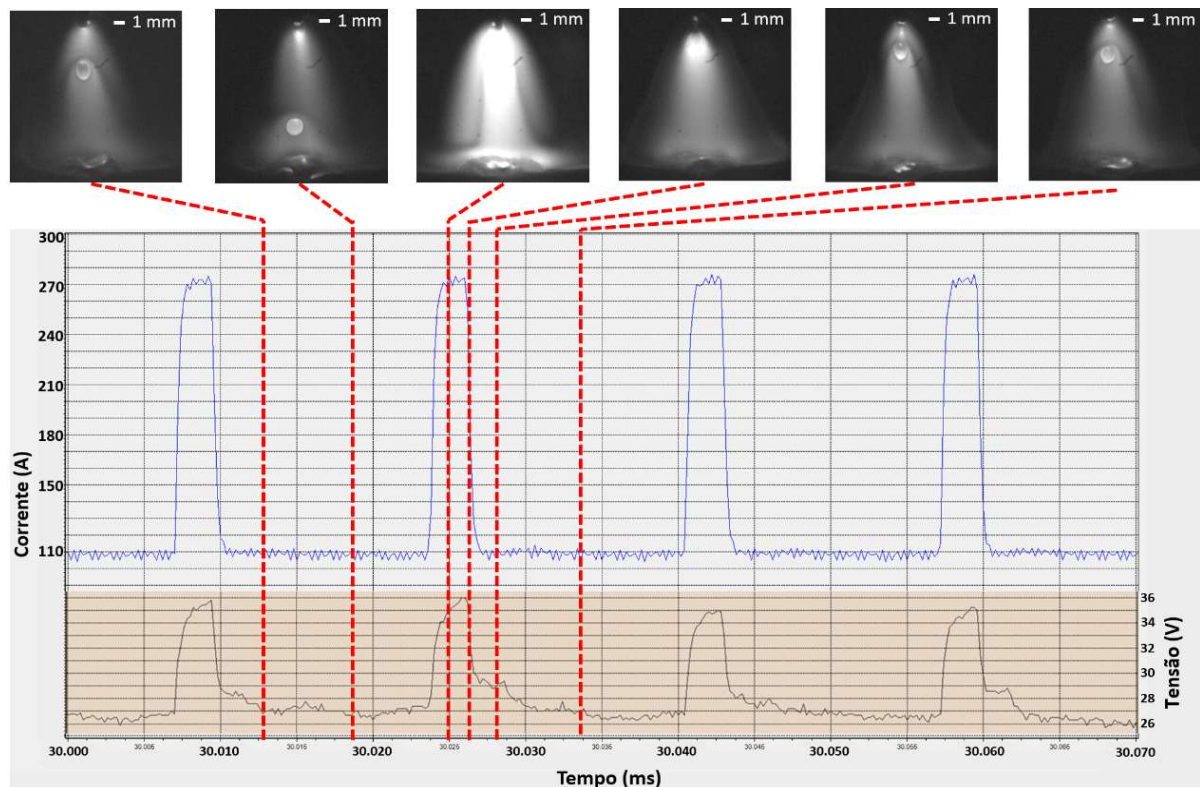


Fonte: o autor (2024)

Observa-se na Figura 53, que devido à corrente e tempo de pulso menores, a gota cresce gradativamente, tornando-se bem maior que o diâmetro do arame e é destacada somente após o terceiro pulso, entre o fim do pulso e o início da corrente de base.

Apresenta-se na Figura 54 um período de 70 ms do modo de destacamento de UGPP, na qual detalha-se os momentos de formação e o destacamento de uma gota no período de 1 pulso, no início da corrente de base.

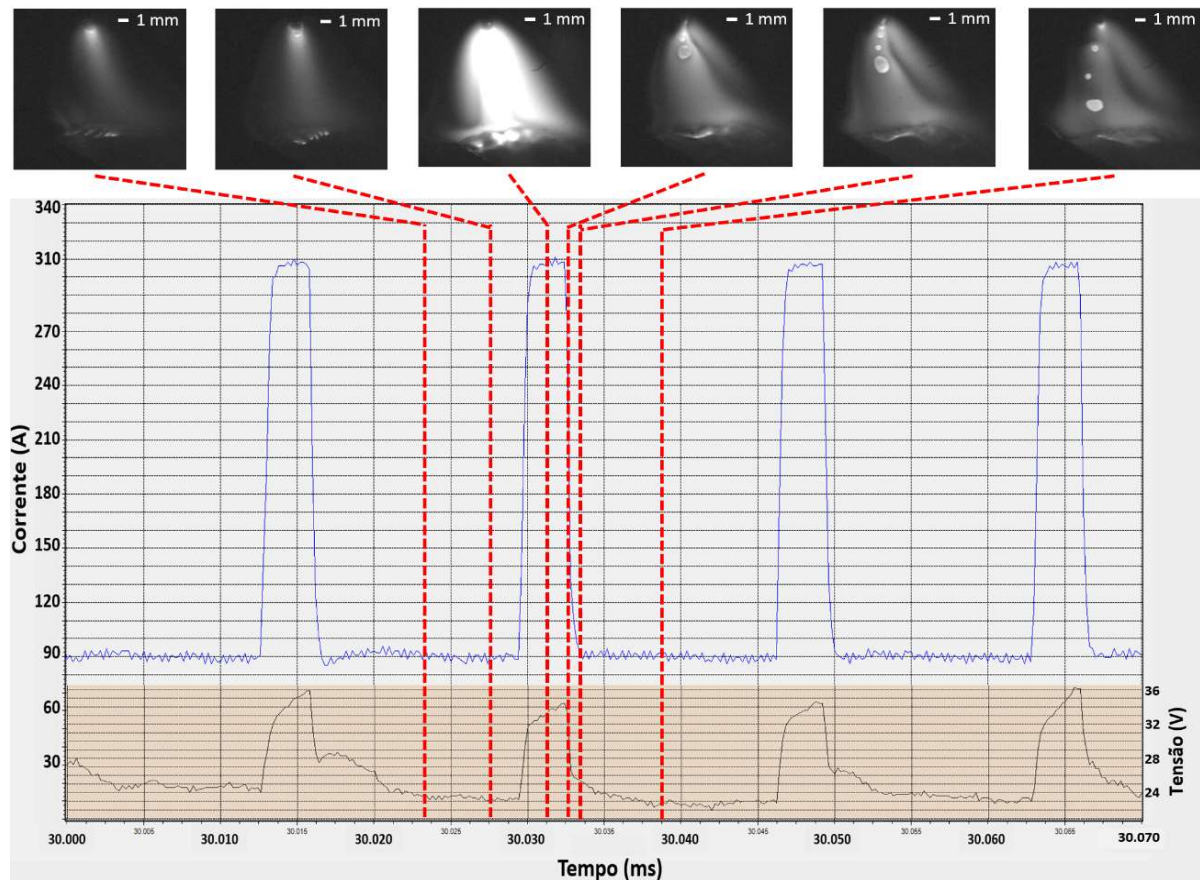
Figura 54 – Imagens do modo de destacamento de UGPP com as respectivas formas de onda de corrente e tensão



Fonte: o autor (2024)

Apresenta-se na Figura 55 um período de 70 ms do modo de destacamento de MGPP, na qual detalha-se os momentos de formação e o destacamento de múltiplas gotas no período de 1 pulso, entre o fim do pulso e o início da corrente de base.

Figura 55 – Imagens do modo de destacamento de MGPP com as respectivas formas de onda de corrente e tensão



Fonte: o autor (2024)

4.2. Influência do modo de destacamento de gotas no aporte térmico e no acúmulo de calor da pré-forma

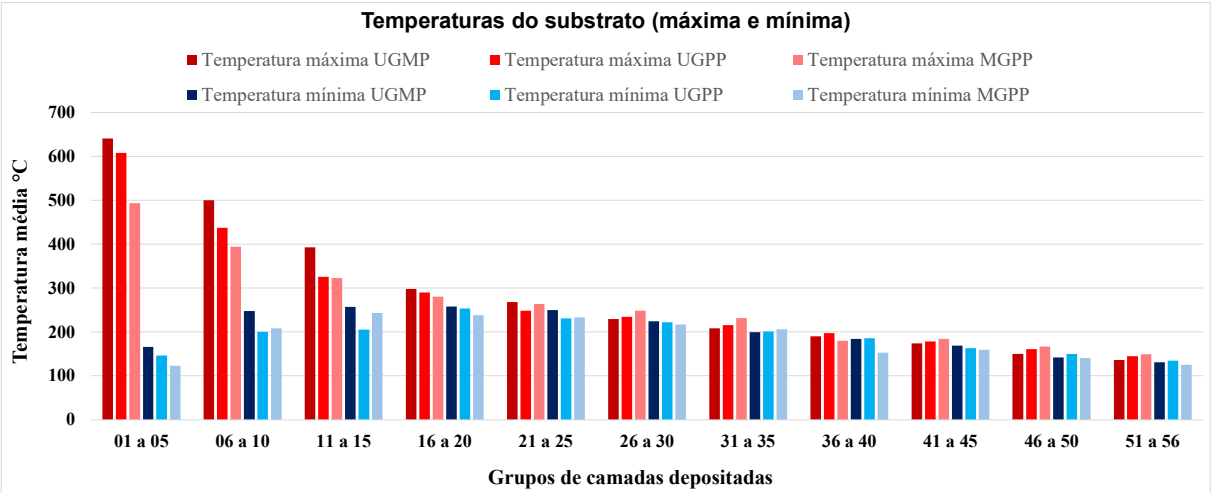
A partir do processamento dos dados de temperatura coletados pelos termopares fixados no substrato, realizou-se uma análise comparativa entre os diferentes modos de destacamento de gotas. Devido à baixa condutividade térmica do aço inoxidável 308 L depositado (15,2–21,6 W/m.K) e do substrato de aço inoxidável 316 L (14,0–15,9 W/m.K), estima-se que houve uma diferença significativa de temperatura entre as regiões de deposição na pré-forma e no substrato, onde os termopares foram instalados. Entretanto, devido às diferentes características dos modos de destacamento de gotas, considerou-se os dados do ciclo térmico como válidos para analisar e comparar os resultados obtidos.

Devido às oscilações dos parâmetros de pulso, inerentes ao processo, os dados do ciclo térmico durante a deposição de cada camada foram agrupados. Os valores apresentados correspondem à média dos resultados obtidos a partir das três pré-formas fabricadas para cada modo de destacamento de gotas.

4.2.1. Ciclo térmico durante a deposição das camadas das pré-formas

O ciclo térmico, representado pelos gráficos de temperatura mínima do substrato, temperatura máxima do substrato, taxa de aquecimento e taxa de resfriamento das camadas, demonstra a influência do aporte térmico e do acúmulo de calor sobre as camadas inferiores da pré-forma. A Figura 56 apresenta a variação das temperaturas máxima e mínima do substrato, durante o processo de deposição das pré-formas dos modos de destacamento de UGMP, UGPP e MGPP, respectivamente.

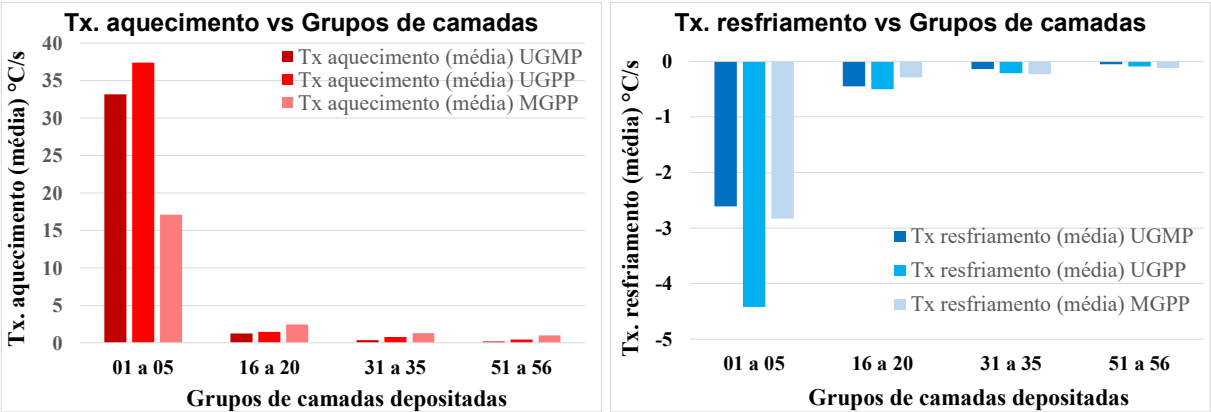
Figura 56 – Temperaturas medidas no substrato



Fonte: o autor (2024)

A Figura 57 apresenta a variação das taxas de aquecimento e resfriamento do substrato durante o processo de deposição das pré-formas dos modos de destacamento de UGMP, UGPP e MGPP, respectivamente.

Figura 57 – Taxas de aquecimento e resfriamento no substrato



Fonte: o autor (2024)

No início da deposição, o substrato exerceu uma influência significativa na dissipação de calor da pré-forma durante a deposição do material, especialmente nas primeiras camadas, próximas ao substrato, com um elevado gradiente térmico, o que acelera a transferência de calor por condução (Andrade *et al.*, 2024).

Observa-se na Figura 57 que houve uma elevada taxa de aquecimento durante a deposição das camadas 1 a 5, até que a temperatura máxima do substrato fosse atingida. Por outro lado, devido ao elevado gradiente térmico, também ocorreu uma elevada taxa de resfriamento nessas camadas iniciais. O aumento da temperatura mínima do substrato até as camadas 16 a 20 indica o acúmulo de calor gerado pelo aporte térmico. A partir daí, os resultados sugerem que, devido à maior distância do substrato, as temperaturas mínimas e máximas do substrato se aproximam e diminuem gradualmente.

Além disso, observou-se que houve uma diferença significativa nas temperaturas máximas do substrato até as camadas 16 a 20, entre os diferentes modos de destacamento de gotas. As temperaturas do substrato alcançadas no modo de UGMP foram maiores do que nos modos de UGPP e MGPP, conforme mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Dados das temperaturas do substrato coletadas nos termopares

Modo de destacamento de gotas	Temperatura máxima do substrato [°C]			
	Camadas 1 a 5	Camadas 6 a 10	Camadas 11 a 15	Camadas 15 a 20
UGMP	641	500	393	298
UGPP	608	437	326	290
MGPP	493	394	323	281

Fonte: o autor (2024)

Os resultados sugerem que esta diferença de temperaturas máximas do substrato alcançadas foi devido à diferentes aportes térmicos.

4.2.2. Energia

Apesar dos diferentes parâmetros de pulso, a corrente média foi mantida constante durante a fabricação de todas as pré-formas. Entretanto, devido às características de cada modo na formação e destacamento das gotas, os ajustes necessários na velocidade de alimentação do arame resultaram em comprimentos de arco ligeiramente diferentes, gerando assim, variações na tensão e corrente. De acordo com a Equação 5, a redução da velocidade de alimentação do arame e o aumento da tensão gera uma maior energia. Assim, para analisar e comparar os

diferentes modos de destacamento de gotas, utilizou-se os valores médios de tensão e corrente coletados durante as deposições e calculou-se a energia gerada. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Energia gerada pelos modos de destacamento de gotas

Modo de destacamento de gotas	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Velocidade de deslocamento [mm/s]	Energia [J/mm]
UGMP	30,88	130,08	3	1339
UGPP	29,37	132,28	3	1295
MGPP	28,02	128,97	3	1205

Fonte: o autor (2024)

Os resultados calculados confirmam os diferentes aportes térmicos gerados pelos modos de destacamento de gotas. Observa-se que o aporte térmico foi maior no modo de destacamento de UGMP. Este resultado pode ser explicado pela maior tensão média e também pelo acúmulo de calor gerado pela deposição de gotas maiores sobre a poça de fusão.

4.3. Influência do modo de destacamento de gotas na geometria das pré-formas

A transferência do metal é um fator que influencia a dinâmica da poça de fusão e, consequentemente, a geometria da pré-forma depositada (Mohd Mansor *et al.*, 2024). Neste sentido, uma vez que a gota é destacada, ela será acelerada pela ação de várias forças. A força devido à aceleração gravitacional (g) possui um efeito secundário sobre a velocidade da gota em comparação com outras forças, como as forças eletromagnéticas, a pressão do arco e a força de arrasto do plasma, pois a aceleração das gotas que viajam através do arco elétrico pode alcançar até 100 g (Dos Santos *et al.*, 2017).

O software da câmera de alta velocidade foi utilizado para realizar a análise dimensional e medir a velocidade com a qual as gotas se moviam através do arco elétrico. Considerou-se que as gotas possuíam formas aproximadamente esféricas; portanto, seu diâmetro foi medido.

Durante o modo de destacamento de MGPP, observou-se que a primeira gota era maior, enquanto as duas gotas subsequentes eram menores. Esse fenômeno ocorre principalmente devido à dinâmica da forma de onda da corrente pulsada e às diversas forças envolvidas no destacamento das gotas. A corrente do pulso inicial gera força eletromagnética suficiente para destacar uma gota maior. À medida que a corrente diminui ao longo do pulso, as forças resultantes se tornam insuficientes para destacar gotas maiores, levando ao destacamento de gotas subsequentes menores (Scotti *et al.*, 2012; Zhai, Xue, Wang, Tao, *et al.*, 2020). Os modos

de destacamento, os números médios de gotas, os números de pulsos e os diâmetros médios das gotas são apresentados na Tabela 15.

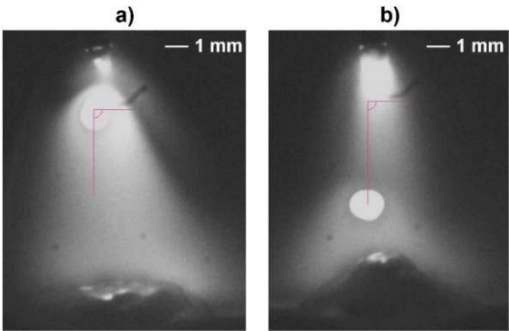
Tabela 15 – Número de gotas e pulsos e diâmetro médio de gotas

Modo de destacamento de gotas	Número de gotas	Número de pulsos	Diâmetro médio de gotas [mm]
UGMP	1	3	2,25
UGPP	1	1	1,26
MGPP	3	1	1,24; 0,56; 0,44

Fonte: o autor (2024)

A velocidade na qual as gotas se moviam através do arco elétrico foi medida ao longo do tempo, assim como as posições inicial (imediatamente após o destacamento) e final (antes de tocar a poça de fusão), conforme mostrado na Figura 58.

Figura 58 – Posições da gota no modo de UGPP: a) posição inicial da gota após o destacamento; b) posição final da gota antes de tocar a poça de fusão



Fonte: o autor (2024)

As velocidades médias das gotas para os modos de destacamento são listadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Velocidade média das gotas de acordo com o modo de destacamento

Modo de destacamento de gotas	Velocidade média das gotas [m/s]
UGMP	0,39
UGPP	0,74
MGPP	1,08; 0,77; 0,65

Fonte: o autor (2024)

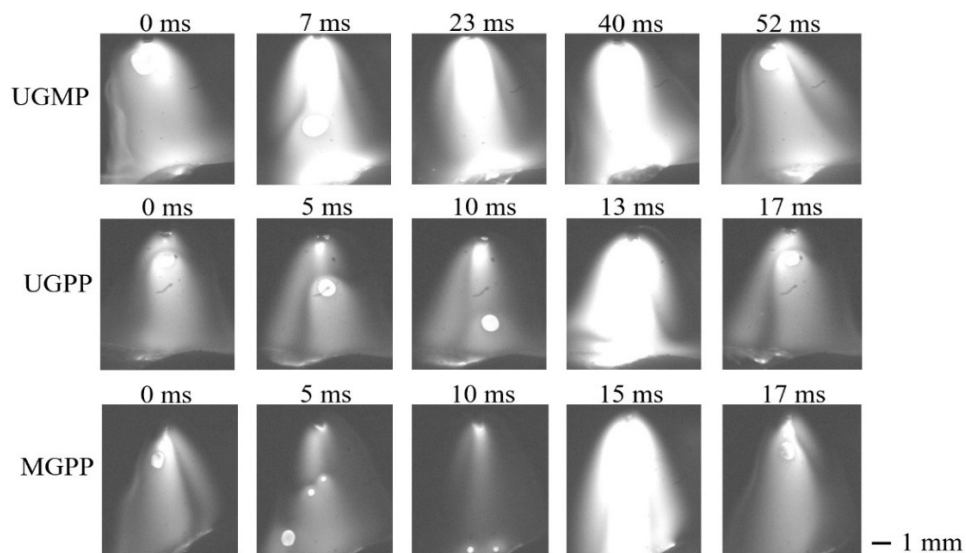
Além disso, para compreender melhor a influência dos modos de destacamento de gotas na geometria das camadas depositadas, a pressão de impacto das gotas na poça de fusão foi calculada conforme Equação 7 (Ushio & Wu, 1997; Scotti & Rodrigues, 2009):

$$P_G = (4f_G m v_G) / \pi d_G^2 \quad \text{Equação 7}$$

Onde P_G é a pressão de impacto [Pa], f_G é a frequência de destacamento da gota, m é a massa da gota, v_G é a velocidade da gota e d_G é o diâmetro da gota.

A frequência média de destacamento das gotas foi calculada a partir das imagens obtidas pela câmera de alta velocidade, conforme mostrado na Figura 59.

Figura 59 – Sequência de tempo das imagens dos modos de destacamento de gotas



Fonte: o autor (2024)

Assim, a frequência média de destacamento das gotas para os diferentes modos foi obtida, conforme mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 – Ciclo médio e frequência média de destacamento de gotas dos diferentes modos

Modo de destacamento de gotas	Ciclo médio de destacamento de gotas [ms]	Número de gotas	Frequência média de destacamento de gotas [Hz]
UGMP	52	1	19,23
UGPP	17	1	58,82
MGPP	17	3	176,47

Fonte: o autor (2024)

Considerando-se as gotas esféricas, a massa (m) foi calculada conforme Equação 8 (K. Wu *et al.*, 2022):

$$m = (4/3)\pi(d_G/2)^3 \rho = (\pi/6)d_G^3 \rho \quad \text{Equação 8}$$

A massa das gotas destacadas foi então calculada. Para o cálculo, a densidade (ρ) do aço inoxidável 308 L líquido foi considerada como 7.200 kg/m³ (Liao *et al.*, 2022). Os valores médios da massa das gotas para cada modo de destacamento são listados na Tabela 18.

Tabela 18 – Massa média das gotas de acordo com o modo de destacamento

Modo de destacamento de gotas	Diâmetro médio das gotas [m]	Densidade [kg/m ³]	Massa [kg]
UGMP	0,00225	7200	4,29x10 ⁻⁵
UGPP	0,00126		7,54x10 ⁻⁶
MGPP	0,00124		7,19x10 ⁻⁶
	0,00056		6,62x10 ⁻⁷
	0,00044		3,21x10 ⁻⁷

Fonte: o autor (2024)

Por fim, a força de impacto P_G dos modos de destacamento de gotas na poça de fusão foi calculada, conforme Equação 7, a partir dos dados disponíveis. Os resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Pressão de impacto das gotas sobre a poça de fusão conforme o modo de destacamento

Modo de destacamento de gotas	f [Hz]	m [kg]	v_G [m/s]	d_G [m]	P_G [Pa]
UGMP	19,23	4,29x10 ⁻⁵	0,39	0,00225	80,92
UGPP	58,82	7,54x10 ⁻⁶	0,74	0,00126	263,21
MGPP	176,47	7,19x10 ⁻⁶	1,08	0,00124	1.134,72
	176,47	6,62x10 ⁻⁷	0,77	0,00056	365,22
	176,47	3,21x10 ⁻⁷	0,65	0,00044	242,16

Fonte: o autor (2024)

Apesar da maior massa das gotas no modo de destacamento de UGMP, seu diâmetro maior reduziu a pressão de impacto na poça de fusão. A pressão de impacto foi maior nos modos de MGPP e UGPP, influenciada principalmente pela maior frequência de destacamento e pela velocidade das gotas. A Tabela 20 apresenta os valores médios dos parâmetros geométricos das amostras para a análise comparativa entre os três modos de destacamento de gotas.

Tabela 20 – Valores médios dos parâmetros geométricos das amostras de acordo com o modo de destacamento de gotas

Modo de destacamento de gotas		Altura média das camadas [mm]	Largura média das camadas [mm]	Índice de ondulação superficial [mm]
UGMP	Amostra 1	$1,98 \pm 0,02$	$10,46 \pm 0,28$	$2,903 \pm 0,327$
	Amostra 2	$2,02 \pm 0,03$	$11,43 \pm 0,51$	$4,007 \pm 0,388$
	Amostra 3	$2,06 \pm 0,03$	$11,16 \pm 0,80$	$3,098 \pm 0,713$
	Média geral	$2,02 \pm 0,04$	$11,02 \pm 0,50$	$3,336 \pm 0,589$
UGPP	Amostra 1	$2,13 \pm 0,02$	$10,01 \pm 0,12$	$1,422 \pm 0,292$
	Amostra 2	$2,14 \pm 0,02$	$11,10 \pm 0,74$	$1,435 \pm 0,272$
	Amostra 3	$2,16 \pm 0,10$	$11,03 \pm 0,20$	$2,210 \pm 0,272$
	Média geral	$2,14 \pm 0,02$	$10,71 \pm 0,61$	$1,689 \pm 0,451$
MGPP	Amostra 1	$2,06 \pm 0,02$	$10,83 \pm 0,29$	$1,367 \pm 0,260$
	Amostra 2	$1,97 \pm 0,04$	$10,64 \pm 0,31$	$2,102 \pm 0,543$
	Amostra 3	$2,09 \pm 0,08$	$10,50 \pm 0,49$	$2,265 \pm 0,867$
	Média geral	$2,04 \pm 0,06$	$10,66 \pm 0,17$	$1,911 \pm 0,478$

Fonte: o autor (2024)

As pré-formas obtidas no modo de destacamento de UGMP apresentaram a maior largura (11,02 mm) e a menor altura (2,02 mm). Além disso, observou-se o maior índice de ondulação superficial, com uma média geral de 3,336 mm.

A aplicação do modo de destacamento de UGPP resultou em pré-formas de largura intermediária (10,71 mm) com maior altura (2,14 mm). Além disso, obteve-se o menor índice de ondulação superficial (1,689 mm).

O modo de destacamento de MGPP produziu pré-formas de menor largura (10,66 mm), mas com altura reduzida (2,04 mm). O índice de ondulação superficial (1,911 mm), foi ligeiramente maior em comparação com o modo UGPP.

Os resultados sugerem que a maior energia observada no modo de UGMP levou a um maior acúmulo de calor na poça de fusão e seu transbordamento lateral, causando assim uma maior largura nas camadas. Além disso, a influência do aporte térmico, os diferentes volumes das gotas e a frequência de destacamento promoveram dinâmicas distintas quando estas colidiram na poça de fusão, o que pode ter influenciado na formação das diferentes geometrias das pré-formas.

4.4. Influência do modo de destacamento de gotas nas propriedades mecânicas da pré-forma

4.4.1. Resultados dos ensaios de dureza

Os resultados dos ensaios de dureza foram obtidos a partir da média dos valores de três corpos de prova (CP1, CP2, CP3) de cada modo de destacamento de gotas. Analisou-se as

seções laterais e a seção central de cada pré-forma. Além disso, a dureza das regiões inferior, central e superior de cada pré-forma foi obtida a partir da média dos valores de três pontos. Os resultados dos ensaios de dureza são apresentados na Tabela 21.

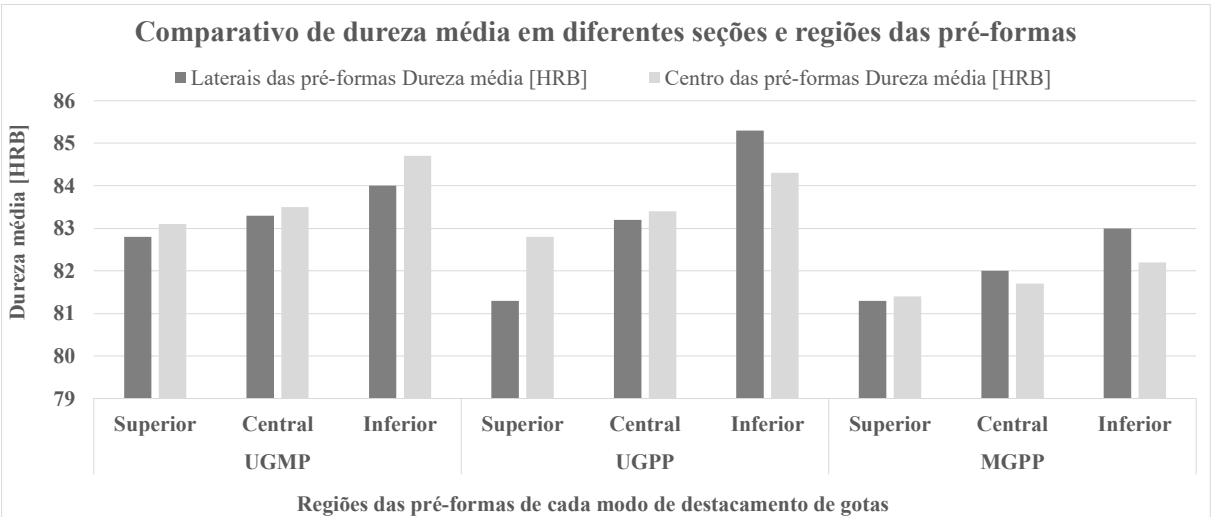
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de dureza

Modo de destacamento de gotas	Região	Laterais das pré-formas				Centro das pré-formas			
		Dureza [HRB]			Dureza média [HRB]	Dureza [HRB]			Dureza média [HRB]
		CP1	CP2	CP3		CP1	CP2	CP3	
UGMP	Superior	82,5	83,0	83,0	82,8 ± 0,3	83,2	84,0	82,2	83,1 ± 0,9
	Central	83,0	83,5	83,5	83,3 ± 0,3	82,5	84,5	83,5	83,5 ± 1,0
	Inferior	84,2	83,8	84,0	84,0 ± 0,2	84,0	85,5	84,5	84,7 ± 0,8
UGPP	Superior	80,5	82,5	81,0	81,3 ± 1,0	82,5	83,0	83,0	82,8 ± 0,3
	Central	82,5	84,0	83,0	83,2 ± 0,7	82,4	84,5	83,2	83,4 ± 1,1
	Inferior	84,5	86,0	85,5	85,3 ± 0,8	83,0	85,5	84,5	84,3 ± 1,3
MGPP	Superior	80,5	82,0	81,5	81,3 ± 0,8	80,8	82,3	81,0	81,4 ± 0,8
	Central	81,5	83,0	81,5	82,0 ± 0,9	81,0	83,0	81,2	81,7 ± 1,1
	Inferior	82,0	84,0	83,0	83,0 ± 1,0	81,5	83,0	82,0	82,2 ± 0,8

Fonte: o autor (2024)

A Figura 60 apresenta os valores de dureza obtidos nas diferentes seções e regiões das pré-formas, de acordo com os modos de destacamento de UGMP, UGPP e MGPP, respectivamente.

Figura 60 – Dureza média medida em diferentes seções e regiões das pré-formas - UGMP



Fonte: o autor (2024)

Não foram observadas diferenças significativas na dureza entre as seções laterais e central das pré-formas. Ao comparar os modos de destacamento de UGMP e UGPP, as

durezas médias das pré-formas fabricadas foram bastante próximas. O modo de MGPP produziu uma dureza média ligeiramente inferior. Esse resultado pode ser explicado pelo efeito do menor aporte térmico gerado, conforme descrito na Seção 3.7, o que resultou em um gradiente de temperatura mais baixo, uma taxa de resfriamento menor e, conseqüentemente, na formação de uma microestrutura com menores tensões internas e dureza reduzida.

Em todos os modos de destacamento, a dureza média foi maior nas regiões inferiores das pré-formas. Os resultados sugerem que, de acordo com o ciclo térmico utilizado para a deposição das camadas, as taxas de resfriamento mais altas nas camadas inferiores podem ter contribuído para o refinamento da microestrutura, com a formação de grãos menores, o que levou a uma maior dureza (Vora, Parmar, *et al.*, 2022).

4.4.2. Resultados dos ensaios de tração

Os resultados dos ensaios de tração foram obtidos a partir da média dos valores medidos nos corpos de prova verticais e horizontais extraídos das pré-formas. Os resultados dos ensaios de tração são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de tração

Propriedades mecânicas	UGMP		UGPP		MGPP	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Resistência à tração [MPa]	563 ± 10,11	599 ± 10,25	581 ± 6,83	610 ± 10,80	588 ± 10,91	614 ± 9,82
Deformação [%]	56 ± 1,52	61 ± 0,29	59 ± 1,78	65 ± 0,54	59 ± 1,65	64 ± 1,88
Tensão de escoamento [MPa]	271 ± 11,12	283 ± 14,55	277 ± 12,45	288 ± 16,64	286 ± 11,00	278 ± 10,22

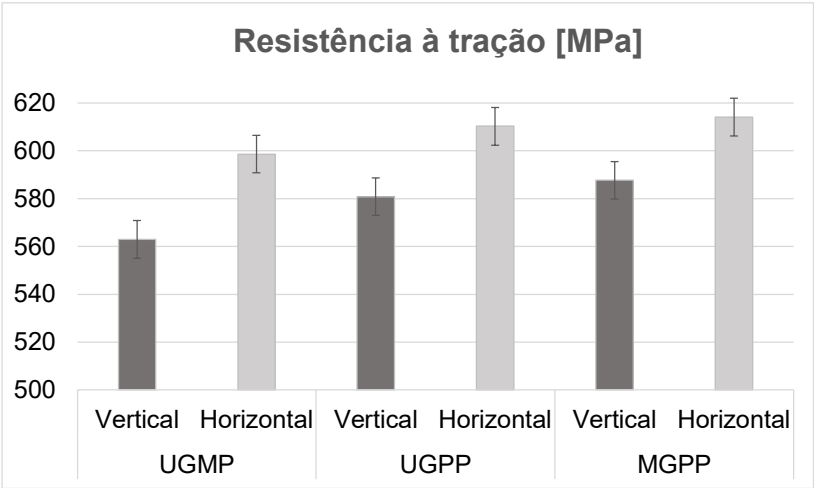
Fonte: o autor (2024)

Considerando-se os três modos de destacamento de gotas e comparando os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova horizontais, a região superior apresentou valores ligeiramente inferiores de resistência à tração e tensão de escoamento (3 a 6%) em relação à região inferior. A deformação foi maior, porém com diferença pouco significativa (2 a 3%). Esses resultados sugerem uma correlação com a menor taxa de resfriamento e a menor dureza observadas na região superior (Vora, Parmar, *et al.*, 2022).

As Figuras 61, 62 e 63 apresentam, respectivamente, os valores da resistência à tração,

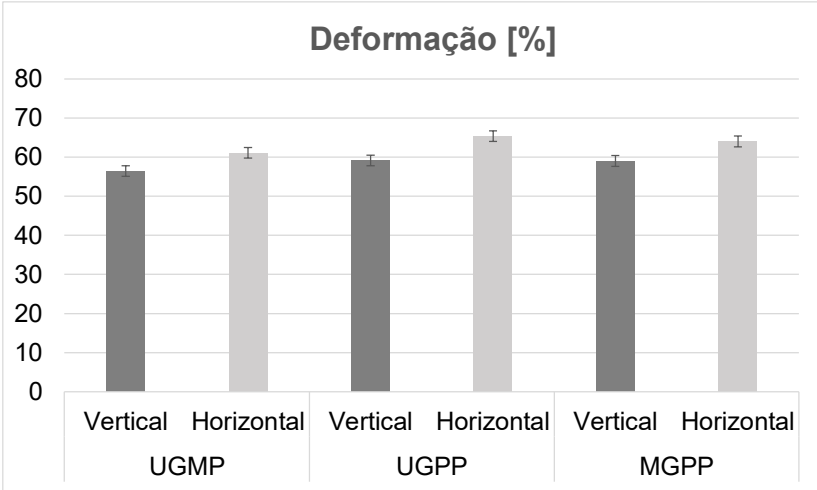
deformação e tensão de escoamento.

Figura 591 – Resistência à tração com diferentes modos de destacamento de gotas nas direções vertical e horizontal



Fonte: o autor (2024)

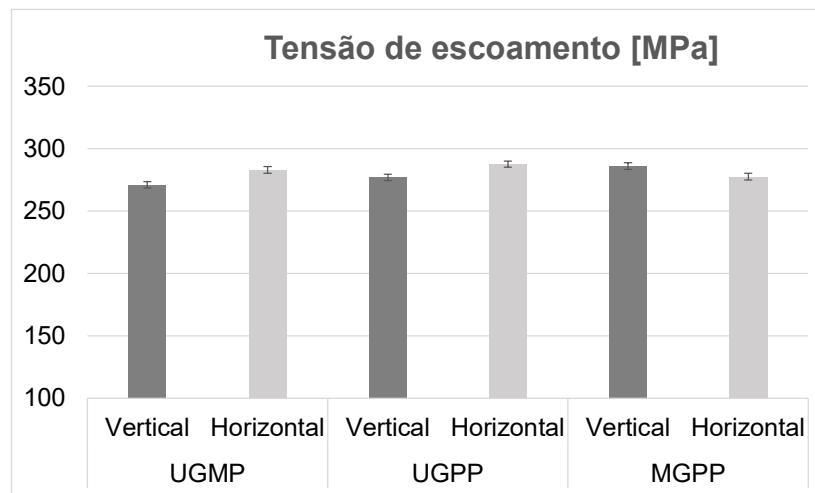
Figura 60 – Deformação máxima com diferentes modos de destacamento de gotas nas direções vertical e horizontal



Fonte: o autor (2024)

As Figuras 61 e 62 demonstram que a resistência à tração e a deformação dos corpos de prova horizontais foram superiores às dos corpos de prova verticais em todos os modos de destacamento de gotas. Este fenômeno de anisotropia provavelmente está relacionado à não homogeneidade das microestruturas e à fusão das camadas sobrepostas, com maior impacto nos corpos de prova verticais (Le & Mai, 2020; Le, Mai, Doan, *et al.*, 2021a).

Figura 613 – Tensão de escoamento [MPa] dos diferentes modos de destacamento de gotas nas direções vertical e horizontal

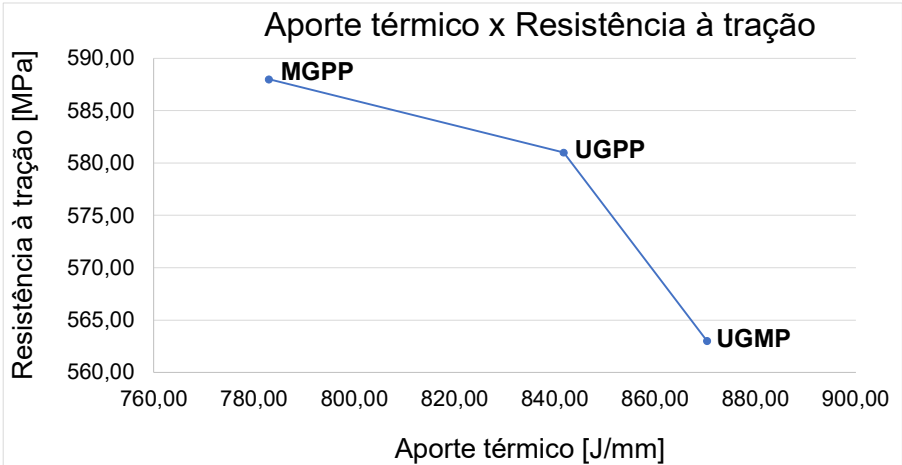


Fonte: o autor (2024)

Os resultados de deformação e tensão de escoamento para os modos de destacamento de gotas não apresentaram diferenças significativas, como mostrado nas Figuras 62 e 63. Além disso, os resultados sugerem que a resistência à tração foi influenciada pelos diferentes aportes térmicos dos modos de destacamento de gotas e pelas taxas de resfriamento das pré-formas.

Os resultados dos ensaios nos corpos de prova verticais indicam que os modos de destacamento de UGPP e MGPP produziram menor aporte térmico e proporcionaram maior resistência à tração, conforme mostrado na Figura 64. Estes resultados estão provavelmente relacionados ao efeito da menor taxa de resfriamento, que produz uma microestrutura com menores tensões internas e características mecânicas mais homogêneas, o que explica a maior resistência à tração observada. Por outro lado, o maior aporte térmico e a menor taxa de resfriamento no modo de destacamento de UGMP levaram à redução das propriedades mecânicas, o que pode ser explicado pelo efeito do crescimento dos grãos de austenita na microestrutura do material (Le *et al.*, 2022).

Figura 62 – Influência do aporte térmico na resistência à tração



Fonte: o autor (2024)

Finalmente, apesar dos diferentes resultados para cada modo de destacamento de gotas, os valores obtidos para a resistência à tração, deformação e tensão de escoamento neste trabalho são consistentes com os valores observados em outros estudos semelhantes de MADA baseada em GMA com aço inoxidável 308 L, conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Propriedades mecânicas obtidas de diferentes pesquisas, a partir de amostras de MADA com aço inoxidável 308 L

Processo de MADA	Diâmetro do arame [mm]	Direção do corpo de prova	Resistência à tração [MPa]	Deformação [%]	Tensão de escoamento [MPa]	Ref.
GMA-CMT	1.2	Horizontal	592 ± 13	79 ± 5	260 ± 4	(Y. Li <i>et al.</i> , 2021)
GMA-CMT	1.2	Horizontal	597	51	235	(Kim <i>et al.</i> , 2021)
GMA-CMT	1.2	Vertical	536	58	241	
GMA	1.2	Horizontal	507 ± 2,65	44 ± 2,52	279 ± 2,52	(Le <i>et al.</i> , 2022)
GMA	1.0	Horizontal	552,95 ± 4,96	54,13 ± 1,29	352,69 ± 8,12	(Le, Mai, Doan, <i>et al.</i> , 2021a)
GMA	1.0	Vertical	531,78 ± 4,52	39,58 ± 1,38	343,67 ± 7,53	
GMA	1.0	Horizontal	552,95 ± 4,96	54,13 ± 1,29	352,69 ± 8,12	(Le & Mai, 2020)
GMA	1.0	Vertical	531,78 ± 4,52	39,58 ± 1,38	343,67 ± 7,53	
GMA	1.0	Horizontal	472,33 ± 11,06	55,33 ± 0,58	272,33 ± 10,07	(Le <i>et al.</i> , 2020b)
GMA	1.2	Horizontal	585 ± 10,00	52,50 ± 2,00	-	(Nagasai <i>et al.</i> , 2022)
GMA	1.2	Vertical	535 ± 12,00	44,0 ± 1,50	-	

Fonte: o autor (2024)

4.5. Modelagem e Análise Estatística dos Resultados

A modelagem e análise da relação entre os parâmetros dos modos de destacamento de gotas e os parâmetros de saída relacionados às propriedades mecânicas e às características morfológicas das pré-formas requer abordagens estatísticas robustas, capazes de isolar efeitos individuais em meio à complexidade de variáveis interdependentes. Neste estudo, utilizou-se o software Minitab® e optou-se pela regressão linear multivariada, em detrimento de métodos

como redes neurais ou polinomiais de alta ordem, os quais demandariam mais amostras ($n \gg k$, onde n é o tamanho da amostra e k é o número de variáveis de entrada) para evitar *overfitting* e garantir generalização, requisitos estes incompatíveis com a realidade do estudo.

A regressão linear, embora limitada por colinearidade perfeita entre parâmetros fixos por modo de destacamento e pela escassez de dados, buscou equilibrar rigor estatístico e utilidade prática, estabelecendo bases para futuros estudos com amostras expandidas e técnicas complementares, como *Design of Experiments* (DOE) ou simulações.

Desta forma, apresenta-se na Tabela 24 os dados consolidados dos experimentos realizados, contemplando as principais variáveis de entrada e saída.

Tabela 24 – Parâmetros de entrada e saída dos modos de destacamento de gotas

Modo de destacamento de gotas	Parâmetros de entrada					Parâmetros de saída							
	Ip [A]	tp [ms]	Ib [A]	tb [ms]	w [m/min]	Dureza [HB]	Tensão máxima [MPa]	Tensão de escoamento [MPa]	Deformação máxima [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Altura média [mm]	Largura média [mm]	Índice de ondulação [mm]
UGMP	210	1,6	110,5	15,1	4,2	83,23	558,86	261,53	57,26	10,89	1,98	10,46	0,4261
UGMP	210	1,6	110,5	15,1	4,2	84,67	567,08	280,51	55,65	11,56	2,02	11,43	0,6073
UGMP	210	1,6	110,5	15,1	4,2	83,40	563,97	269,52	56,46	11,09	2,06	11,16	0,5178
UGPP	250	2,4	98,3	14,3	5,3	82,63	575,53	267,20	55,98	11,12	2,13	10,01	0,4176
UGPP	250	2,4	98,3	14,3	5,3	84,33	586,10	286,51	62,32	11,49	2,14	11,10	0,3862
UGPP	250	2,4	98,3	14,3	5,3	83,57	580,31	278,05	58,43	11,70	2,16	11,03	0,5040
MGPP	285	3,0	84,1	13,7	5,2	81,10	591,93	281,15	57,49	11,70	2,06	10,83	0,3809
MGPP	285	3,0	84,1	13,7	5,2	82,77	583,44	291,01	60,14	11,55	1,97	10,64	0,4308
MGPP	285	3,0	84,1	13,7	5,2	81,40	588,22	284,88	59,20	11,93	2,09	10,50	0,5546

Fonte: o autor (2024)

Devido ao número reduzido de experimentos, em relação ao número de variáveis (para regressão linear sugere-se pelo menos 10 amostras por variável de entrada), o modelo foi considerado sobreespecificado (Peduzzi *et al.*, 1996). Assim, para viabilizar o processamento da análise estatística, restringiu-se as variáveis de entrada com Ip e tp e desconsiderou-se as demais variáveis: Ib, tb e w. Esta restrição do número de variáveis de entrada baseou-se na análise de dados do Minitab®, que priorizou a remoção de variáveis com menores variações entre os modos de destacamento ou redundância estatística. O Minitab® interpretou Ip e tp como variáveis com maior contribuição marginal para o modelo. Além disso, segundo Modenesi & Uribe (2022), Ip e tp são as variáveis de maior influência nos modos de destacamento de gotas.

Apresenta-se na Figura 65 os resultados da regressão linear para a variável de saída Dureza.

Figura 65 – Modelagem e análise estatística para os resultados de dureza

Equação de Regressão

Dureza [HB] = 124,9 - 0,313 lp [A] + 15,3 tp [ms]

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	124,9	25,9	4,82	0,003	
lp [A]	-0,313	0,209	-1,50	0,185	521,08
tp [ms]	15,3	11,2	1,37	0,220	521,08

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,842322	62,82%	50,42%	16,34%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	7,192	3,5959	5,07	0,051
lp [A]	1	1,586	1,5864	2,24	0,185
tp [ms]	1	1,333	1,3331	1,88	0,220
Erro	6	4,257	0,7095		
Total	8	11,449			

Fonte: o autor (2024)

Em relação à equação de regressão, $Dureza [HB] = 124,9 - 0,313 lp [A] + 15,3 tp [ms]$, para cada aumento de 1 unidade em lp, a dureza diminui 0,313 HB; para cada aumento de 1 ms em tp, a dureza aumenta 15,3 HB.

Nenhuma das variáveis independentes (lp e tp) é estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugere que, individualmente, não há evidências fortes de que lp ou tp afetem a dureza. Além disso, a Multicolinearidade ($VIF = 521,08$ para ambas as variáveis, indica multicolinearidade extrema (valores acima de 10 já são preocupantes), o que infla os erros padrão dos coeficientes, tornando os testes t menos confiáveis.

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 62,82\%$: O modelo explica 62,82% da variabilidade na dureza; R^2 ajustado = 50,42%: Ajustado pelo número de variáveis, indica que parte da explicação pode ser artificial devido à adição de variáveis não significativas; R^2 preditivo = 16,34%: Muito baixo, sugerindo que o modelo possui baixa capacidade de prever novas observações; Erro padrão (S) = 0,842322: Baixa dispersão dos resíduos, porém não compensa a falta de significância das variáveis.

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,051), o modelo como um todo tem significância marginalmente próxima a 5%, porém não conclusiva. Considerando-se as variáveis individuais, (lp: p = 0,185 e tp: p = 0,220), nenhuma variável

contribui significativamente para o modelo.

Apresenta-se na Figura 66 os resultados da regressão linear para a variável de saída Tensão máxima.

Figura 66 – Modelagem e análise estatística para os resultados de tensão máxima

Equação de Regressão

Tensão máxima [MPa] = 679 - 1,16 lp [A] + 79,6 tp [ms]

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	679	141	4,80	0,003	
lp [A]	-1,16	1,14	-1,01	0,349	521,08
tp [ms]	79,6	61,0	1,31	0,240	521,08

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
4,59528	88,30%	84,40%	73,68%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	956,25	478,13	22,64	0,002
lp [A]	1	21,75	21,75	1,03	0,349
tp [ms]	1	35,98	35,98	1,70	0,240
Erro	6	126,70	21,12		
Total	8	1082,95			

Fonte: o autor (2024)

Em relação à equação de regressão, Tensão máxima [MPa] = 679 - 1,16 lp [A] + 79,6 tp [ms], para cada aumento de 1 unidade em lp, a tensão máxima diminui 1,16 MPa; para cada aumento de 1 ms em tp, a tensão máxima aumenta 79,6 MPa.

Nenhuma das variáveis independentes (lp e tp) é estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugere que, individualmente, não há evidências fortes de que lp ou tp afetem a tensão máxima.

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 88,30\%$: O modelo explica 88,30% da variabilidade na tensão máxima; R^2 ajustado = 84,40%: Ajustado pelo número de variáveis, mostra que o modelo mantém boa explicação mesmo após penalizar pela adição de preditores; R^2 preditivo = 73,68%: Indica capacidade moderada de prever novas observações, mas com possível sobreajuste (diferença entre R^2 e R^2 preditivo); Erro padrão (S) = 4,59528: Considerando-se o valor da constante (679 MPa) indica baixa dispersão dos resíduos, porém não compensa a falta de significância das variáveis.

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,002), o

modelo como um todo é estatisticamente significativo ao nível de 5%, indicando que pelo menos uma variável tem impacto na tensão máxima. Considerando-se as variáveis individuais, (lp: p = 0,349 e tp: p = 0,240), a significância global do modelo não se reflete nas variáveis individuais, possivelmente devido à multicolinearidade elevada (VIF = 521,08).

Apresenta-se na Figura 67 os resultados da regressão linear para a variável de saída Tensão de escoamento.

Figura 67 – Modelagem e análise estatística para os resultados de tensão de escoamento

Equação de Regressão

Tensão de escoamento [MPa] = 169 + 0,68 lp [A] - 25 tp [ms]

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	169	257	0,66	0,535	
lp [A]	0,68	2,07	0,33	0,756	521,08
tp [ms]	-25	111	-0,23	0,827	521,08

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
8,35486	45,24%	26,99%	0,00%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	346,079	173,039	2,48	0,164
lp [A]	1	7,390	7,390	0,11	0,756
tp [ms]	1	3,646	3,646	0,05	0,827
Erro	6	418,822	69,804		
Total	8	764,901			

Fonte: o autor (2024)

Em relação à equação de regressão, Tensão de escoamento [MPa] = 169 + 0,68 lp [A] - 25 tp [ms], para cada aumento de 1 unidade em lp, a tensão de escoamento aumenta 0,68 MPa; para cada aumento de 1 ms em tp, a tensão de escoamento diminui 25 MPa.

Nenhuma variável (lp, tp e constante) é estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugere que, individualmente, não há evidências de que lp ou tp afetem a tensão de escoamento.

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 45,24\%$: O modelo explica 45,24% da variabilidade na tensão de escoamento; R^2 ajustado = 26,99%: A queda acentuada após ajuste mostra que as variáveis adicionadas não contribuem significativamente para o modelo; R^2 preditivo = 0,00%: O modelo não tem capacidade de prever novas observações, indicando sobreajuste ou falta de relação real entre as variáveis; Erro padrão (S) = 8,35486: Indica alta

dispersão dos resíduos. Em média, as previsões estão erradas em $\pm 8,35$ MPa, o que é elevado considerando-se a constante (169 MPa).

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,164), o modelo não é significativo ao nível de 5%, ou seja, não há evidências de que lp e tp , juntos, expliquem a variabilidade da tensão de escoamento. Considerando-se as variáveis individuais, (lp : $p = 0,756$ e tp : $p = 0,827$), nenhuma variável contribui para o modelo, mesmo que marginalmente.

Apresenta-se na Figura 68 os resultados da regressão linear para a variável de saída Deformação máxima.

Figura 68 – Modelagem e análise estatística para os resultados de deformação máxima

Equação de Regressão					
Deformação máxima [%] = 98,4 - 0,361 lp [A] + 21,1 tp [ms]					
Coeficientes					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	98,4	63,3	1,56	0,171	
lp [A]	-0,361	0,510	-0,71	0,507	521,08
tp [ms]	21,1	27,3	0,77	0,469	521,08
Sumário do Modelo					
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	2,05557	32,45%	9,93%	0,00%	
Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	12,179	6,089	1,44	0,308
lp [A]	1	2,107	2,107	0,50	0,507
tp [ms]	1	2,526	2,526	0,60	0,469
Erro	6	25,352	4,225		
Total	8	37,531			
Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas					
Obs.	Deformação máxima [%]	Ajuste	Resíd	Resíd Pad	
5	62,32	58,91	3,41	2,03	R

Fonte: o autor (2024)

Em relação à equação de regressão, Deformação máxima [%] = 98,4 - 0,361 lp [A] + 21,1 tp [ms], para cada aumento de 1 unidade em lp , a deformação máxima diminui 0,361 %; para cada aumento de 1 ms em tp , a deformação máxima aumenta 21,1 %.

Nenhuma variável (lp , tp e constante) é estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugere que, individualmente, não há evidências de que lp ou tp afetem

a deformação máxima.

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 32,45\%$: O modelo explica 32,45% da variabilidade na deformação máxima; R^2 ajustado = 9,93%: A queda acentuada após ajuste mostra que as variáveis adicionadas não contribuem significativamente para o modelo; R^2 preditivo = 0,00%: O modelo não tem capacidade de prever novas observações, indicando sobreajuste ou falta de relação real entre as variáveis; Erro padrão (S) = 2,05557: Indica que as previsões estão erradas, em média, em $\pm 2,06\%$. Apesar de ser um erro absoluto baixo, a falta de significância estatística invalida a utilidade do modelo.

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,308), o modelo não é significativo ao nível de 5%, ou seja, não há evidências de que l_p e t_p , juntos, expliquem a variabilidade da deformação máxima. Considerando-se as variáveis individuais, (l_p : $p = 0,507$ e t_p : $p = 0,469$), nenhuma variável tem impacto estatístico detectável.

Detectou-se também um resíduo padronizado de 2,03, classificado como atípico (R), o que pode indicar dados não representativos e falta de variáveis explicativas relevantes.

Apresenta-se na Figura 69 os resultados da regressão linear para a variável de saída Módulo de elasticidade.

Figura 69 – Modelagem e análise estatística para os resultados de módulo de elasticidade

Equação de Regressão					
Módulo de Elasticidade [GPa] = 8,16 + 0,0193 l_p [A] - 0,64 t_p [ms]					
Coeficientes					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	8,16	8,73	0,94	0,386	
l_p [A]	0,0193	0,0704	0,27	0,793	521,08
t_p [ms]	-0,64	3,76	-0,17	0,870	521,08
Sumário do Modelo					
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	0,283592	47,96%	30,61%	0,00%	
Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	0,444704	0,222352	2,76	0,141
l_p [A]	1	0,006035	0,006035	0,08	0,793
t_p [ms]	1	0,002362	0,002362	0,03	0,870
Erro	6	0,482546	0,080424		
Total	8	0,927250			

Fonte: o autor (2024)

Em relação à equação de regressão, Módulo de Elasticidade [GPa] = 8,16 + 0,0193 l_p

[A] - 0,64 tp [ms], para cada aumento de 1 unidade em lp, o módulo de elasticidade aumenta 0,0193 GPa; para cada aumento de 1 ms em tp, o módulo de elasticidade diminui 0,64 GPa.

Nenhuma variável (lp, tp e constante) é estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugere que, individualmente, não há evidências de que lp ou tp afetem o módulo de elasticidade.

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 47,96\%$: O modelo explica 47,96% da variabilidade no módulo de elasticidade, o que é moderado; R^2 ajustado = 30,61%: A queda acentuada após ajuste mostra que as variáveis adicionadas não contribuem significativamente para o modelo; R^2 preditivo = 0,00%: O modelo não tem capacidade de prever novas observações, indicando sobreajuste ou falta de relação real entre as variáveis; Erro padrão (S) = 0,283592: Indica que as previsões estão erradas, em média, em $\pm 0,28$ GPa. Apesar de ser um erro absoluto baixo, a falta de significância estatística invalida a utilidade do modelo.

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,141), o modelo não é significativo ao nível de 5%, ou seja, não há evidências de que lp e tp, juntos, expliquem a variabilidade do módulo de elasticidade. Considerando-se as variáveis individuais, (lp: p = 0,793 e tp: p = 0,870), nenhuma variável tem impacto estatístico detectável.

Apresenta-se na Figura 70 os resultados da regressão linear para a variável de saída Altura média.

Figura 70 – Modelagem e análise estatística para os resultados de altura média das camadas

Equação de Regressão					
Altura média [mm] = 6,87 - 0,0392 lp [A] + 2,113 tp [ms]					
Coeficientes					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	6,87	1,35	5,10	0,002	
lp [A]	-0,0392	0,0109	-3,61	0,011	521,08
tp [ms]	2,113	0,580	3,64	0,011	521,08
Sumário do Modelo					
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	0,0437163	69,63%	59,51%	31,67%	
Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	0,02629	0,013144	6,88	0,028
lp [A]	1	0,02488	0,024876	13,02	0,011
tp [ms]	1	0,02535	0,025350	13,26	0,011
Erro	6	0,01147	0,001911		
Total	8	0,03776			

Fonte: o autor (2024)

Em relação à equação de regressão, $\text{Altura média [mm]} = 6,87 - 0,0392 \text{ Ip [A]} + 2,113 \text{ tp [ms]}$, para cada aumento de 1 unidade em Ip, a altura diminui 0,0392 mm; para cada aumento de 1 ms em tp, a altura aumenta 2,113 mm.

Há evidências de que os coeficientes de Ip, tp e a constante possuem significância estatística (valores-p < 0,05). Porém, os coeficientes individuais (Ip e tp) são instáveis e sua interpretação isolada pode ser enganosa. A equação permanece útil para previsão, mas não para inferência causal

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 69,63\%$: O modelo explica bem a variabilidade dos dados atuais ($R^2 = 69,63\%$); R^2 ajustado = 59,51%: A diferença entre R^2 e R^2 ajustado sugere que as variáveis são parcialmente redundantes (relacionado à multicolinearidade) ; R^2 preditivo de 31,67% indica que o modelo pode ter dificuldades com novas observações; Erro padrão (S) = 0,0437 mm: Valor baixo que indica que as previsões estão erradas, em média, em $\pm 0,04$ mm.

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,028), o modelo é globalmente significativo ($p < 0,05$). Além disso, (Ip: $p = 0,011$ e tp: $p = 0,011$), indicam contribuição significativa ao modelo.

Apresenta-se na Figura 71 os resultados da regressão linear para a variável de saída Largura média.

Figura 71 – Modelagem e análise estatística para os resultados de largura média das camadas

Equação de Regressão					
Largura média [mm] = 7,2 + 0,034 Ip [A] - 2,09 tp [ms]					
Coeficientes					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	7,2	14,3	0,50	0,634	
Ip [A]	0,034	0,116	0,30	0,778	521,08
tp [ms]	-2,09	6,18	-0,34	0,747	521,08
Sumário do Modelo					
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	0,465582	14,74%	0,00%	0,00%	
Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	0,22482	0,11241	0,52	0,620
Ip [A]	1	0,01893	0,01893	0,09	0,778
tp [ms]	1	0,02475	0,02475	0,11	0,747
Erro	6	1,30060	0,21677		
Total	8	1,52542			

Em relação à equação de regressão, $\text{Largura média [mm]} = 7,2 + 0,034 \text{ Ip [A]} - 2,09 \text{ tp [ms]}$, para cada aumento de 1 A em Ip, a largura aumenta 0,034 mm; para cada aumento de 1 ms em tp, a largura diminui 2,09 mm.

Nenhuma variável (Ip, tp e constante) é estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugere que, individualmente, não há evidências de que Ip ou tp afetem a largura.

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 14,74\%$: Apenas 14,74% da variabilidade da largura é explicada pelo modelo; R^2 ajustado = 0,00%: A queda drástica indica que as variáveis são inúteis para previsão; R^2 preditivo de 0,00% indica falha total: Incapacidade de prever novas observações; Erro padrão (S) = 0,4656 mm: Erro médio das previsões: $\pm 0,47$ mm (considerado elevado para a escala em mm).

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,62), o modelo é globalmente insignificante ($p > 0,05$). Além disso, (Ip: $p = 0,778$ e tp: $p = 0,747$), indicam contribuição nula ao modelo.

Apresenta-se na Figura 72 os resultados da regressão linear para a variável de saída Índice de ondulação.

Figura 72 – Modelagem e análise estatística para os resultados de índice de ondulação

Equação de Regressão					
Índice de ondulação [mm] = $-1,41 + 0,0161 \text{ Ip [A]} - 0,90 \text{ tp [ms]}$					
Coeficientes					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-1,41	2,51	-0,56	0,594	
Ip [A]	0,0161	0,0202	0,79	0,457	521,08
tp [ms]	-0,90	1,08	-0,84	0,435	521,08
Sumário do Modelo					
	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	0,0815027	21,26%	0,00%	0,00%	
Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	0,010762	0,005381	0,81	0,488
Ip [A]	1	0,004188	0,004188	0,63	0,457
tp [ms]	1	0,004652	0,004652	0,70	0,435
Erro	6	0,039856	0,006643		
Total	8	0,050618			

Fonte: o autor (2024)

Em relação à equação de regressão, $\text{Índice de ondulação [mm]} = -1,41 + 0,0161 \text{ Ip [A]} - 0,90 \text{ tp [ms]}$, para cada aumento de 1 A em Ip, o índice de ondulação aumenta 0,0161 mm;

para cada aumento de 1 ms em t_p , o índice de ondulação diminui 0,90 mm.

Nenhuma variável (l_p , t_p e constante) é estatisticamente significativa ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Este resultado sugere que, individualmente, não há evidências de que l_p ou t_p afetem o índice de ondulação.

A respeito da qualidade do modelo: $R^2 = 21,26\%$: Apenas 21,26% da variabilidade do índice de ondulação é explicada pelo modelo; R^2 ajustado = 0,00%: A queda drástica indica que as variáveis são inúteis para previsão; R^2 preditivo de 0,00% indica falha total. Incapacidade de prever novas observações; Erro padrão (S) = 0,0815 mm: Erro médio das previsões: $\pm 0,08$ mm.

A análise de variância (ANOVA) indica que para a Regressão (valor-p = 0,488), o modelo é globalmente insignificante ($p > 0,05$). Além disso, (l_p : $p = 0,457$ e t_p : $p = 0,435$), indicam contribuição nula ao modelo.

5. CONCLUSÕES

Este estudo realizou uma análise detalhada da influência dos modos de destacamento de gotas da MADA baseada em GMA pulsado sobre as características geométricas e propriedades mecânicas do aço inoxidável 308 L. Os principais resultados deste trabalho são os seguintes:

1. A metodologia para caracterizar os modos de destacamento de gotas por meio das imagens da câmera de alta velocidade e dos sinais de corrente e tensão mostrou-se eficaz na realização das análises comparativas.
2. Os dados de temperatura coletados durante a deposição, apesar de serem medidos indiretamente no substrato, possibilitaram a identificação de diferentes ciclos térmicos entre os modos de destacamento de gotas. As temperaturas máximas do substrato alcançadas no modo de UGMP foram superiores às dos modos de UGPP e MGPP. Constatou-se que os diferentes ciclos térmicos, especialmente para as camadas iniciais, foram uma consequência do aporte térmico, que foi maior no modo de destacamento de UGMP.
3. As imagens tridimensionais das pré-formas obtidas por meio de fotogrametria apresentaram boa resolução e um nível suficiente de detalhes para a análise geométrica. Além disso, a análise geométrica virtual eliminou a necessidade de operações de corte nas seções transversais das pré-formas.
4. As pré-formas obtidas no modo de UGMP apresentaram a maior largura (11,02 mm), a menor altura (2,02 mm) e o maior índice de ondulação superficial (3,336 mm). O modo de destacamento de UGPP resultou em pré-formas de largura intermediária (10,71 mm), maior altura (2,14 mm) e o menor índice de ondulação superficial entre as pré-formas (1,689 mm). O modo de destacamento de MGPP produziu pré-formas com a menor largura (10,66 mm), altura relativamente pequena (2,04 mm) e um índice de ondulação superficial (1,911 mm) ligeiramente maior do que o observado no modo UGPP. Constatou-se que o aporte térmico, os diferentes volumes das gotas e a frequência de destacamento produziram efeitos dinâmicos distintos quando colidiam na poça de fusão, o que pode ter influenciado as diferentes geometrias obtidas nas pré-formas.
5. Os resultados dos ensaios de dureza mostraram valores semelhantes para as pré-formas fabricadas nos modos de destacamento de UGMP (82,8 – 84,7 HRB) e UGPP (81,3 – 85,3 HRB). O modo de destacamento de MGPP produziu uma dureza média ligeiramente inferior (81,3 – 83 HRB), o que pode ser explicado pelo menor aporte térmico e menor taxa de resfriamento, resultando na formação de uma microestrutura com menores tensões internas e menor dureza. Além disso, em todos os modos de destacamento, a dureza média foi maior nas regiões inferiores das pré-formas, com maior taxa de resfriamento, devido à dissipação

de calor pelo substrato, o que levou ao refinamento da microestrutura e maior dureza (Iqbal *et al.*, 2024).

6. Em todos os modos de destacamento de gotas, os corpos de prova extraídos na direção horizontal apresentaram maior resistência à tração e maior deformação do que os corpos de prova verticais. Esta anisotropia provavelmente está relacionada à não homogeneidade das microestruturas e aos efeitos da fusão das camadas sobrepostas (Gao *et al.*, 2019; Le, Mai, Doan, *et al.*, 2021; Le & Mai, 2020).
7. Não foram observadas diferenças significativas entre os resultados de deformação e tensão de escoamento das amostras obtidas dos três modos de destacamento de gotas.
8. Comparando os resultados dos corpos de prova extraídos na direção vertical, observou-se que os modos de destacamento de MGPP e UGPP produziram menor aporte térmico e proporcionaram maior resistência à tração (588 MPa e 581 MPa, respectivamente). Estes resultados provavelmente estão relacionados ao efeito da menor taxa de resfriamento, que gera uma microestrutura com menores tensões internas e características mecânicas mais homogêneas, explicando assim a maior resistência à tração observada. Por outro lado, o maior aporte térmico produzido no modo de destacamento de UGMP levou à redução da resistência à tração (563 MPa) e de outras propriedades mecânicas (T. Chen *et al.*, 2020).
9. A modelagem e análise estatística dos resultados, embora limitada pelo número de amostras, revelou algumas possíveis tendências: na propriedade mecânica tensão máxima que apresentou relação estatisticamente válida ($p = 0,002$ no modelo global), com R^2 preditivo de 73.68%, sugerindo sensibilidade aos parâmetros de pulso, embora sem significância individual das variáveis; na morfologia, a altura média do cordão respondeu de forma estatisticamente significativa a I_p e t_p ($p = 0,011$ para ambas), com $R^2 = 69.63\%$, confirmando o controle geométrico da pré-forma por meio do ajuste dos parâmetros de pulso. Entretanto, a ausência de significância estatística na maioria das respostas (dureza, tensão de escoamento, deformação, módulo de elasticidade, largura e índice de ondulação) reflete limitações intrínsecas à complexidade do sistema, particularmente a interdependência dos parâmetros e a restrição de amostras.

Os resultados da análise geométrica e das propriedades mecânicas das pré-formas indicam que os modos de destacamento de MGPP e UGPP podem ser considerados alternativas viáveis para a fabricação de peças com paredes mais finas e melhor acabamento superficial. Destaca-se também que o modo de destacamento de MGPP produziu os melhores resultados nas pré-formas fabricadas, com menor dureza e maior resistência à tração, o que pode ser adequado para aplicações que exijam uma combinação de resistência e ductilidade do aço

inoxidável 308 L. Por outro lado, o modo de destacamento de UGMP pode ter aplicações limitadas com base nos resultados obtidos, como paredes mais largas, maior ondulação superficial e menor resistência à tração.

As comparações e resultados apresentados neste trabalho não são totalmente abrangentes. Os principais desafios incluem o ajuste da transferência do metal e a redução do aporte térmico para equilibrar o controle do ciclo térmico e da taxa de deposição, bem como o controle geométrico das peças fabricadas.

Há de se considerar ainda a modelagem e análise estatística que demonstraram inconsistências em previsões baseadas nos resultados obtidos, que devido principalmente à limitação de amostras, podem ser consideradas inconclusivas.

Espera-se que pesquisas futuras possam dar continuidade a este estudo e desenvolver novas abordagens sobre o tema. Algumas sugestões para oportunidades de pesquisas futuras são apresentadas a seguir:

- Realizar um mapeamento de micro dureza na direção vertical, ao longo das camadas depositadas, em conjunto com uma análise metalográfica para identificar as microestruturas formadas e entender os efeitos dos modos de destacamento de gotas.
- Aprofundar o estudo da influência dos modos de destacamento de gotas na dinâmica da poça de fusão.
- Comparar os resultados obtidos a partir dos modos de destacamento de gotas com outros tipos de transferência do metal, como o curto-circuito controlado.
- Expandir a amostragem e integrar técnicas de inteligência artificial para superar as limitações identificadas, avançando em direção a modelos preditivos robustos.

REFERÊNCIAS

- Abioye, T. E., Medrano-Tellez, A., Farayibi, P. K., & Oke, P. K. (2017). *Laser metal deposition of multi-track walls of 308LSi stainless steel Additive Manufacturing of Metals and Metal Alloys View project Microstructure, Mechanical, and Corrosion Properties of Welded Metallic Materials View project*. October, 1660–1666
- Agrawal, B. P., & Kumar, R. (2016). Challenges in Application of Pulse Current Gas Metal Arc Welding Process for Preparation of Weld Joint with Superior Quality. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(01), 319–327. <https://www.ijert.org>
- Ahmad, S. N., Manurung, Y. H., Adenan, M. S., Yusof, F., Mat, M. F., Prajadhiana, K. P., Minggu, Z., Leitner, M., & Saidin, S. (2022). Experimental validation of numerical simulation on deformation behaviour induced by wire arc additive manufacturing with feedstock SS316L on substrate S235. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3–4), 1951–1964. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08340-4>
- Ahsan, M. R. U., Fan, X., Seo, G. J., Ji, C., Noakes, M., Nycz, A., Liaw, P. K., & Kim, D. B. (2021). Microstructures and mechanical behavior of the bimetallic additively-manufactured structure (BAMS) of austenitic stainless steel and Inconel 625. *Journal of Materials Science and Technology*, 74, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.001>
- Åkerfeldt, P., Antti, M. L., & Pederson, R. (2016). Influence of microstructure on mechanical properties of laser metal wire-deposited Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 674, 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.038>
- Aldalur, E., Suárez, A., & Veiga, F. (2021). Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity. *Journal of Materials Processing Technology*, 297(March). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117271>
- Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., & Lamikiz, A. (2020). High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.060>
- Andrade, D. G., Tankova, T., Zhu, C., Branco, R., da Silva, L. S., & Rodrigues, D. M. (2024). Mechanical properties of 3D printed CMT-WAAM 316 LSi stainless steel walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 215(January). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108527>
- Ayan, Y., & Kahraman, N. (2024a). Investigation of tensile and fatigue properties of an austenitic stainless steel part fabricated by WAAM. *Materials Chemistry and Physics*, 315(December 2023), 128937. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.128937>
- Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., roman Hönnige, J., Zhang, H., & Williams, S. (2018). Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 504–516. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.085>
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., & Hague, R. (2016). The cost of additive manufacturing: Machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.02.015>
- Bendia, R. M., Lizarralde, F., Passos, A. v., & Oliveira, V. H. P. M. (2021). *Dynamic GMAW Process Model for Layer Geometry Control in Wire Arc Additive Manufacturing*. <https://dx.doi.org/10.1615/ICHMT.2021.CHT-21.290>

- Brice, C., Shenoy, R., Kral, M., & Buchannan, K. (2015). Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing. *Materials Science and Engineering A*, 648, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.088>
- Butola, R., Lal Meena, S., Murtaza, Q., Jayantilal, H., & Lal, S. (2017). Metallurgical Investigations of Microstructure and Micro hardness across the various zones in Synergic MIG Welding of Stainless steel. In Meena *et al.* / *Materials Today: Proceedings* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.166>
- Chen, J., Wei, H., Zhang, X., Peng, Y., Kong, J., & Wang, K. (2021). Flow behavior and microstructure evolution during dynamic deformation of 316 L stainless steel fabricated by wire and arc additive manufacturing. *Materials and Design*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109325>
- Chen, T., Xue, S., Zhang, P., Wang, B., Zhai, P., & Long, W. (2020). Investigation on the dynamic behavior of weld pool and weld microstructure during DP-GMAW for austenitic stainless steel. *Metals*, 10(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/met10060754>
- Chen, X., Li, J., Cheng, X., He, B., Wang, H., & Huang, Z. (2017). Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 703, 567–577. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.024>
- Coelho, F. G. F., Bracarense, A. Q., & Lima, E. J. (2022). Analysis of Parameters Based on Deposited Beads Geometry in Single-Pass Multi-layers Applied in Wire Arc Additive Manufacturing Process. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07011-0>
- Coelho, F. G. F., Bracarense, A. Q., Lima, E. J., Arias, A. R., Antonello, M. G., & Corradi, D. R. (2021). Proposal to the Use of Cooperative Robots in Additive Manufacturing Based on the GMAW-P Process. *Soldagem e Inspecao*, 26. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI26.19>
- Corradi, D. R., Bracarense, A. Q., Wu, B., Cuiuri, D., Pan, Z., & Li, H. (2020). Effect of Magnetic Arc Oscillation on the geometry of single-pass multi-layer walls and the process stability in wire and arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116723>
- Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. In *Additive Manufacturing* (Vol. 22, pp. 672–686). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
- Cunningham, C. R., Wang, J., Dhokia, V., Shrohani, A., & Newman, S. T. (2019). Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. *Characterisation of Austenitic 316Lsi Stainless Steel Produced by Wire Arc Additive Manufacturing with Interlayer Cooling*, 426–439. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/17282>
- da Silva, L. J., Souza, D. M., de Araújo, D. B., Reis, R. P., & Scotti, A. (2020). Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(5–6), 2513–2523. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>
- Dahat, S., Hurtig, K., Andersson, J., & Scotti, A. (2020). A methodology to parameterize wire + arc additive manufacturing: A case study for wall quality analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/jmmp4010014>
- de Moraes Coelho, D., dos Santos Paes, L. E., Guarato, A. Z., de Araújo, D. B., Scotti, F. M., & Vilarinho, L. O. (2022). A low-cost methodology for quality inspection of metal additive

manufactured parts. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(7). <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03580-1>

Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 81, Issues 1–4, pp. 465–481). Springer London. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>

Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., van Duin, S., & Larkin, N. (2016). Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 39, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.004>

Dirisu, P., Supriyo, G., Martina, F., Xu, X., & Williams, S. (2020). Wire plus arc additive manufactured functional steel surfaces enhanced by rolling. *International Journal of Fatigue*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105237>

Dos Santos, E. B. F., Pistor, R., & Gerlich, A. P. (2017). Pulse profile and metal transfer in pulsed gas metal arc welding: droplet formation, detachment and velocity. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(7), 627–641. <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1288889>

Duarte, V. R., Rodrigues, T. A., Schell, N., Miranda, R. M., Oliveira, J. P., & Santos, T. G. (2020). Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM). *Additive Manufacturing*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101193>

Dutra, J. C., Filho, A. R. C., & Freire, F. (2002). *Manual de Instruções - MTE Digitec 450/600. A fonte de Soldagem a Arco Microprocessada, Multiprocesso e Sinérgica*. 1–67. Recuperado de: [https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/digitec_manual_instrucoes_5ed_\(2002\).pdf](https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/digitec_manual_instrucoes_5ed_(2002).pdf)

Gao, C., Chen, X., Su, C., & Chen, X. (2019). Location dependence of microstructure and mechanical properties on wire arc additively manufactured nuclear grade steel. *Vacuum*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108818>

Hu, J., & Tsai, H. L. (2006). Effects of current on droplet generation and arc plasma in gas metal arc welding. *Journal of Applied Physics*, 100(5). <https://doi.org/10.1063/1.2337261>

Iqbal, H., Ascari, A., Fortunato, A., & Liverani, E. (2024). Elucidating the effects of metal transfer modes and investigating the material properties in wire-arc additive manufacturing (WAAM). *Progress in Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00808-5>

Jafari, D., Vaneker, T. H. J., & Gibson, I. (2021). Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>

Jia, C., Liu, W., Chen, M., Guo, M., Wu, S., & Wu, C. (2020). Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM. *Additive Manufacturing*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101235>

Jorge, V. L., Teixeira, F. R., & Scotti, A. (2022). Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality. *Metals*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/met12050765>

Kannan, A. R., Kumar, S. M., Pramod, R., Shanmugam, N. S., Vishnukumar, M., & Naveenkumar, S. (2021). Microstructural characterization and mechanical integrity of stainless steel 316L clad layers deposited via wire arc additive manufacturing for nuclear applications. *Materialwissenschaft Und*

Werkstofftechnik, 52(6), 617–623. <https://doi.org/10.1002/mawe.202000242>

Kim, S. G., Lee, C. M., & Kim, D. H. (2021). Plasma-assisted machining characteristics of wire arc additive manufactured stainless steel with different deposition directions. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3016–3027. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.130>

Knezovic, N., Garašić, I., & Juric, I. (2020). Influence of the Interlayer Temperature on Structure and Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Product. *Materials*, 966, 1–16. <https://doi.org/doi:10.3390/ma13245795>

Kumar, V., Ranjan Sahu, D., & Mandal, A. (2022). Parametric study and optimization of GMAW based AM process for Multi-layer bead deposition. *Materials Today: Proceedings*, 62, 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.223>

Lam, T. F., Xiong, Y., Dharmawan, A. G., Foong, S., & Soh, G. S. (2020). Adaptive process control implementation of wire arc additive manufacturing for thin-walled components with overhang features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(4), 1061–1071. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04737-4>

Langelandsvik, G., Akselsen, O. M., Furu, T., & Roven, H. J. (2021). Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing. In *Materials* (Vol. 14, Issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma14185370>

Le, V. T., & Mai, D. S. (2020a). Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing. *Materials Letters*, 271, 127791. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127791>

Le, V. T., & Mai, D. S. (2020b). Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing. *Materials Letters*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127791>

Le, V. T., Mai, D. S., Bui, M. C., Wasmer, K., Nguyen, V. A., Dinh, D. M., Nguyen, V. C., & Vu, D. (2022). Influences of the process parameter and thermal cycles on the quality of 308L stainless steel walls produced by additive manufacturing utilizing an arc welding source. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01330-4>

Le, V. T., Mai, D. S., Doan, T. K., & Paris, H. (2021a). Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(4), 1015–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.009>

Le, V. T., Mai, D. S., & Hoang, Q. H. (2020a). A study on wire and arc additive manufacturing of low-carbon steel components: process stability, microstructural and mechanical properties. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(9). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02567-0>

Le, V. T., Mai, D. S., & Hoang, Q. H. (2020b). Effects of cooling conditions on the shape, microstructures, and material properties of SS308L thin walls built by wire arc additive manufacturing. *Materials Letters*, 280, 128580. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128580>

Le, V. T., Mai, D. S., & Paris, H. (2021). Influences of the compressed dry air-based active cooling on external and internal qualities of wire-arc additive manufactured thin-walled SS308L components. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.046>

Li, K., Klecka, M. A., Chen, S., & Xiong, W. (2021). Wire-arc additive manufacturing and post-heat treatment optimization on microstructure and mechanical properties of Grade 91 steel. *Additive*

Manufacturing, 37. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101734>

Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., Shi, G., & Blackburn, J. (2019). Progress in additive manufacturing on new materials: A review. In *Journal of Materials Science and Technology* (Vol. 35, Issue 2, pp. 242–269). Chinese Society of Metals. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>

Li, Y., Luo, Y., Li, J., Song, D., Xu, B., & Chen, X. (2021). Ferrite formation and its effect on deformation mechanism of wire arc additive manufactured 308 L stainless steel. *Journal of Nuclear Materials*, 550. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152933>

Liao, H., Zhang, W., Li, X., Pei, K., Lin, S., Tian, J., & Wang, Z. (2022). Numerical simulation and experimental verification of droplet transfer during local dry underwater MIG welding process of SUS304. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 1960–1973. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.040>

Ma, Y., Hu, Z., Tang, Y., Ma, S., Chu, Y., Li, X., Luo, W., Guo, L., Zeng, X., & Lu, Y. (2020). Laser opto-ultrasonic dual detection for simultaneous compositional, structural, and stress analyses for wire + arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100956>

McAndrew, A. R., Alvarez Rosales, M., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., Eyitayo, K., Stan, I., Sukrongpang, P., Crochemore, A., & Pinter, Z. (2018). Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 21, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>

Modenesi, P. J., & Uribe, A. M. M. (2022). *Introduction to the physics of the electric arc and its application to the welding of metals* (1st ed., Vol. 1). Ecoe Ediciones.

Mohan Kumar, S., Rajesh Kannan, A., Pramod, R., Siva Shanmugam, N., Muthu, S. M., & Dhinakaran, V. (2022). Microstructure and high temperature performance of 321 SS wall manufactured through wire + arc additive manufacturing. *Materials Letters*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131913>

Mohd Mansor, M. S., Raja, S., Yusof, F., Muhamad, M. R., Manurung, Y. H., Adenan, M. S., Hussein, N. I. S., & Ren, J. (2024). Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies. *Journal of Materials Research and Technology*, 30(December 2023), 2478–2499. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.170>

Mvola, B., Kah, P., & Layus, P. (2018). Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9–12), 4243–4265. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1879-z>

Nagasai, B. P., Malarvizhi, S., & Balasubramanian, V. (2022). Mechanical properties and microstructural characteristics of wire arc additive manufactured 308 L stainless steel cylindrical components made by gas metal arc and cold metal transfer arc welding processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 307(May), 117655. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117655>

Nguyen, L., Buhl, J., & Bambach, M. (2020). Continuous Eulerian tool path strategies for wire-arc additive manufacturing of rib-web structures with machine-learning-based adaptive void filling. *Additive Manufacturing*, 35(March), 101265. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101265>

Norrish, J. (2006). *Advanced Welding Processes - Technologies and process control* (2nd ed.). CRC Press ; Woodhead Pub.

- Pal, K., & Pal, S. K. (2011). Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: A review. In *Journal of Materials Engineering and Performance* (Vol. 20, Issue 6, pp. 918–931). <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9717-y>
- Palani, P. K., & Murugan, N. (2006). Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. In *Journal of Materials Processing Technology* (Vol. 172, Issue 1, pp. 1–10). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.07.013>
- Palmeira Belotti, L., van Dommelen, J. A. W., Geers, M. G. D., Goulas, C., Ya, W., & Hoefnagels, J. P. M. (2022). Microstructural characterisation of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117373>
- Panchenko, O., Kurushkin, D., Mushnikov, I., Khismatullin, A., & Popovich, A. (2020). A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed. *Materials and Design*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109040>
- Pattanayak, S., & Sahoo, S. K. (2021). Gas metal arc welding based additive manufacturing—a review. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (Vol. 33, pp. 398–442). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.04.010>
- Peduzzi, P., Concato, J., Kemper, E., Holford, T. R., & Feinstein, A. R. (1996). A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis. *Journal of clinical epidemiology*, 49(12), 1373–1379. [https://doi.org/10.1016/S0895-4356\(96\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0895-4356(96)00236-3)
- Ponis, S., Aretoulaki, E., Maroutas, T. N., Plakas, G., & Dimogiorgi, K. (2021). A systematic literature review on additive manufacturing in the context of circular economy. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13116007>
- Quintino, L., & Allum, C. (1984). Pulsed GMAW: Interactions between process parameters - Part1. *Welding and Metal Fabrication*, 52, 85–89.
- Ren, L., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Li, C., Wang, Z., Zhai, Y., & Ma, P. (2019). Effects of Interpass Cooling on Material Properties of Wire Arc Additive Manufactured Al-6.3Mg Alloy. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(6), 344–353. <https://doi.org/10.1089/3dp.2019.0061>
- Ríos, S., Colegrove, P. A., Martina, F., & Williams, S. W. (2018). Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21(August 2017), 651–657. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.003>
- Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ma12071121>
- Rodriguez, J., Hofer, K., Haelsig, A., & Mayr, P. (2019). Functionally graded SS 316l to ni-based structures produced by 3D plasma metal deposition. *Metals*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/met9060620>
- Rosli, N. A., Alkahari, M. R., bin Abdollah, M. F., Maidin, S., Ramli, F. R., & Herawan, S. G. (2021). Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 11, pp. 2127–2145). Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.002>
- Santhakumari, A., Senthilkumar, T., Ramasamy, N., & Mahadevan, G. (2024). Influence of controlled and conventional short circuit waveforms on mechanical and microstructural effects in the gas metal arc welding processes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55.

<https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104056>

Ščetinec, A., Klobčar, D., & Bračun, D. (2021). In-process path replanning and online layer height control through deposition arc current for gas metal arc based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.038>

Scotti, A., & Eduardo Aguiar Lima Rodrigues, C. (2009). *Determination of the Momentum of Droplets Impinging on the Pool during Aluminium GMAW (Determinação do Momentum das Gotas Impingindo sobre a Poça durante Soldagem GMAW de Alumínio)* (Vol. 14, Issue 4). <https://doi.org/10.1590/S0104-92242009000400008>

Scotti, A., & Ponomarev, V. (2008). *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. Artliber.

Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. (2012). A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(6), 1406–1413. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021>

Singh, S. R., & Khanna, P. (2021). Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings*, 44, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030>

Song, G. H., Lee, C. M., & Kim, D. H. (2021). Investigation of path planning to reduce height errors of intersection parts in wire-arc additive manufacturing. *Materials*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/ma14216477>

Sood, A. K., & Karmuhilan, M. (2018). Intelligent process model for bead geometry prediction in WAAM. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 5). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.193>

Souza, D., Resende, A. A. de, & Scotti, A. (2009). Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. *Soldagem & Inspeção*, 14(3), 192–198. <https://doi.org/10.1590/s0104-92242009000300002>

Szymczyk, P., Smolina, I., Rusińska, M., Woźna, A., Tomassetti, A., & Chlebus, E. (2019). Logistical aspects of transition from traditional to additive manufacturing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 835(August), 752–760. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97490-3_71

Tanvir, A. N. M., Ahsan, M. R. U., Seo, G., Bates, B., Lee, C., Liaw, P. K., Noakes, M., Nycz, A., Ji, C., & Kim, D. B. (2021). Phase stability and mechanical properties of wire + arc additively manufactured H13 tool steel at elevated temperatures. *Journal of Materials Science and Technology*, 67, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.085>

Thapliyal, S. (2019). Challenges associated with the wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminum alloys. In *Materials Research Express* (Vol. 6, Issue 11). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4dd4>

Thien, A., Saldana, C., & Kurfess, T. (2022). The effect of WAAM process parameters on process conditions and production metrics in the fabrication of single-pass multi-layer wall artifacts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(1–2), 531–547. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08266-x>

Tripathi, U., Saini, N., Mulik, R. S., & Mahapatra, M. M. (2022). Effect of build direction on the microstructure evolution and their mechanical properties using GTAW based wire arc additive manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.010>

- Ushio, M. W. C. S., & Wu, C. S. (1997). Mathematical modeling of three-dimensional heat and fluid flow in a moving gas metal arc weld pool. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 28, 509–516. <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0118-z>
- Veiga, F., Suarez, A., Aldalur, E., & Artaza, T. (2022). Wire arc additive manufacturing of invar parts: Bead geometry and melt pool monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110452>
- Vora, J., Parikh, N., Chaudhari, R., Patel, V. K., Paramar, H., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2022). Optimization of Bead Morphology for GMAW-Based Wire-Arc Additive Manufacturing of 2.25 Cr-1.0 Mo Steel Using Metal-Cored Wires. *Applied Sciences*, 12(10), 5060. <https://doi.org/10.3390/app12105060>
- Vora, J., Parmar, H., Chaudhari, R., Khanna, S., Doshi, M., & Patel, V. (2022). Experimental investigations on mechanical properties of multi-layered structure fabricated by GMAW-based WAAM of SS316L. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2748–2757. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.074>
- Wang, L., Xue, J., & Wang, Q. (2019). Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 751, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.078>
- Warsi, R., Kazmi, K. H., & Chandra, M. (2022). Mechanical properties of wire and arc additive manufactured component deposited by a CNC controlled GMAW. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2818–2825. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.114>
- Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire + Arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 32(7), 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., & Fei, Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., & Li, H. (2018). Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.004>
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 35, pp. 127–139). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
- Wu, B., Pan, Z., Li, S., Cuiuri, D., Ding, D., & Li, H. (2018). The anisotropic corrosion behaviour of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution. *Corrosion Science*, 137, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.047>
- Wu, C. S., Chen, M. A., & Lu, Y. F. (2005). Effect of current waveforms on metal transfer in pulsed gas metal arc welding. *Measurement Science and Technology*, 16(12), 2459–2465. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/12/009>
- Wu, K., Zeng, Y., Zhang, M., Hong, X., & Xie, P. (2022). Effect of high-frequency phase shift on metal transfer and weld formation in aluminum alloy double-wire DP-GMAW. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 301–319. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.005>

- Wu, W., Xue, J., Wang, L., Zhang, Z., Hu, Y., & Dong, C. (2019). Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing. *Metals*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/met9010109>
- Xiao, X., Waddell, C., Hamilton, C., & Xiao, H. (2022). Quality Prediction and Control in Wire Arc Additive Manufacturing via Novel Machine Learning Framework. *Micromachines*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/mi13010137>
- Xiong, J., Li, Y., Li, R., & Yin, Z. (2018). 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*, 252, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>
- Yehorov, Y., da Silva, L. J., & Scotti, A. (2019). Balancing WAAM production costs and wall surface quality through parameter selection: A case study of an Al-Mg5 alloy multilayer-non-oscillated single pass wall. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/jmmp3020032>
- Zavdoveev, A., Pozniakov, V., Baudin, T., Kim, H. S., Klochkov, I., Motrunich, S., Heaton, M., Aquier, P., Rogante, M., Denisenko, A., Gajvoronskiy, A., & Skoryk, M. (2022). Optimization of the pulsed arc welding parameters for wire arc additive manufacturing in austenitic steel applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(7–8), 5175–5193. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08704-4>
- Zhai, P., Xue, S., Wang, J., Chen, W., Chen, T., & Ji, S. (2020). Effects of arc length adjustment on weld bead formation and droplet transfer in pulsed GMAW based on datum current time. *Metals*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/met10050665>
- Zhai, P., Xue, S., Wang, J., Tao, Y., Chen, W., Chen, T., & Ji, S. (2020). Comparative study of droplet transfer modes on appearance, microstructure, and mechanical properties of weld during pulsed GMAW. *Metals*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/met10050611>
- Zhang, Y. M., Liguio, E., & Kovacevic, R. (1998). Active metal transfer control by monitoring excited droplet oscillation. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 77(9), 388-s.
- Zhao, Y., Lee, P. S., & Chung, H. (2019). Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 1110–1122. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037>
- Zhao, Y., Li, F., Chen, S., & Lu, Z. (2019). Unit block-based process planning strategy of WAAM for complex shell-shaped component. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9–12), 3915–3927. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04141-y>
- Zhao, Y., Shi, X., Yan, K., Wang, G., Jia, Z., & He, Y. (2018). Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 382–391. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.003>
- Zhiyong, L., Yao, W., Lijun, Y., & Huan, L. (2009). Meso spray transfer in GMAW of aluminum and its control. *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009*, 3148–3151. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138781>
- Zou, X., Niu, B., Pan, L., & Yi, J. (2022). Wire + Arc Additive Manufacturing and Heat Treatment of Super Martensitic Stainless Steel with a Refined Microstructure and Excellent Mechanical Properties. *Materials*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/ma15072624>

APÊNDICES

APÊNDICES A – Parâmetros dos experimentos realizados, com três níveis de corrente de pulso constante (210 A, 250 A e 320 A), com o tempo de pulso variando em oito níveis

Amostra	Parâmetros de pulso							Comprimento do arco [mm]	Modo de destacamento de gotas
	Ip [A]	Tp [ms]	Ib [A]	Tb [ms]	W [m/min]	Frequência de pulso [Hz]	Corrente média [A]		
1	210	1,2	113,0	15,5	4,7	60	120	8,1	UGMP
2	210	1,6	110,5	15,1	4,7	60	120	8,1	UGMP => UGPP
3	210	2,0	107,8	14,7	4,8	60	120	7,8	UGPP
4	210	2,4	104,9	14,3	4,8	60	120	7,8	UGPP
5	210	2,8	101,9	13,9	5,0	60	120	7,6	UGPP
6	210	3,2	98,7	13,5	5,0	60	120	7,6	UGPP
7	210	3,6	95,3	13,1	5,0	60	120	7,6	UGPP
8	210	4,0	91,7	12,7	5,1	60	120	7,4	UGPP => MGPP

Amostra	Parâmetros de pulso							Comprimento do arco [mm]	Modo de destacamento de gotas
	Ip [A]	Tp [ms]	Ib [A]	Tb [ms]	W [m/min]	Frequência de pulso [Hz]	Corrente média [A]		
1	250	1,2	110,0	15,5	5,1	60	120	8,1	UGMP
2	250	1,6	106,3	15,1	5,2	60	120	8,1	UGMP => UGPP
3	250	2,0	102,4	14,7	5,2	60	120	8,1	UGPP
4	250	2,4	98,3	14,3	5,3	60	120	8,0	UGPP
5	250	2,8	93,9	13,9	5,3	60	120	7,8	UGPP
6	250	3,2	89,3	13,5	5,4	60	120	7,8	UGPP => MGPP
7	250	3,6	84,4	13,1	5,5	60	120	7,8	MGPP
8	250	4,0	79,1	12,7	5,5	60	120	7,8	MGPP

Amostra	Parâmetros de pulso							Comprimento do arco [mm]	Modo de destacamento de gotas
	Ip [A]	Tp [ms]	Ib [A]	Tb [ms]	W [m/min]	Frequência de pulso [Hz]	Corrente média [A]		
1	320	1,2	104,5	15,5	4,9	60	120	8,3	UGMP => UGPP
2	320	1,6	98,8	15,1	4,9	60	120	8,3	UGPP
3	320	2,0	92,8	14,7	5,2	60	120	8,2	UGPP
4	320	2,4	86,4	14,3	5,3	60	120	8,2	UGPP => MGPP
5	320	2,8	79,7	13,9	5,4	60	120	8,1	MGPP
6	320	3,2	72,6	13,5	5,5	60	120	8,1	MGPP
7	320	3,6	65,0	13,1	5,6	60	120	8,1	MGPP
8	320	4,0	57,0	12,7	5,6	60	120	8,1	MGPP

APÊNDICES B – Parâmetros dos experimentos realizados, com três níveis de tempo de pulso constante (1,6 ms; 2,0 ms e 3,0 ms), com a corrente de pulso variando em oito níveis

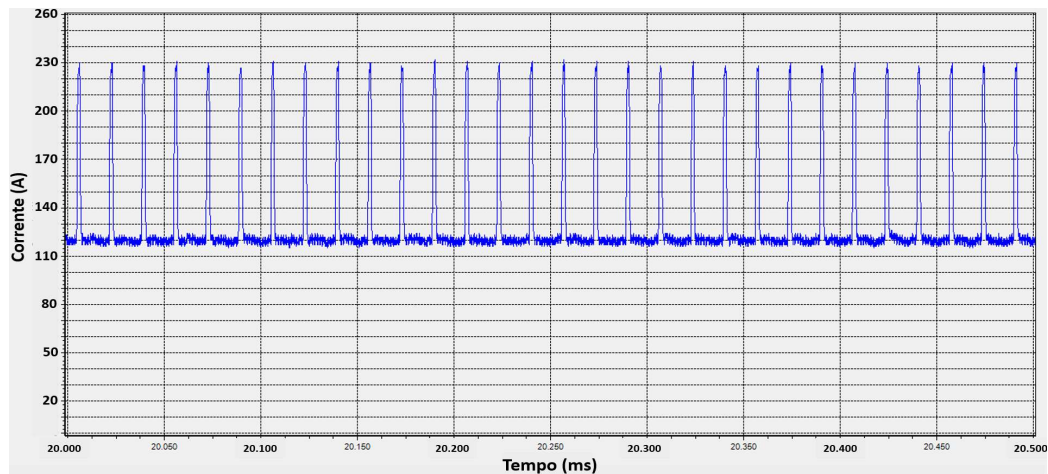
Amostra	Parâmetros de pulso							Comprimento do arco [mm]	Modo de destacamento de gotas
	Ip [A]	Tp [ms]	Ib [A]	Tb [ms]	W [m/min]	Frequência de pulso [Hz]	Corrente média [A]		
1	185	1,6	113,1	15,1	4,1	60	120	8,1	UGMP
2	210	1,6	110,5	15,1	4,2	60	120	8,1	UGMP
3	235	1,6	107,8	15,1	4,3	60	120	8,0	UGMP => UGPP
4	260	1,6	105,2	15,1	4,3	60	120	7,8	UGPP
5	285	1,6	102,5	15,1	4,3	60	120	7,6	UGPP
6	310	1,6	99,9	15,1	4,4	60	120	7,2	UGPP
7	335	1,6	97,2	15,1	4,4	60	120	7,2	UGPP
8	360	1,6	94,6	15,1	4,5	60	120	7,2	UGPP

Amostra	Parâmetros de pulso							Comprimento do arco [mm]	Modo de destacamento de gotas
	Ip [A]	Tp [ms]	Ib [A]	Tb [ms]	W [m/min]	Frequência de pulso [Hz]	Corrente média [A]		
1	185	2,0	111,2	14,7	4,2	60	120	7,8	UGMP
2	210	2,0	107,8	14,7	4,4	60	120	7,6	UGMP
3	235	2,0	104,4	14,7	4,4	60	120	7,4	UGMP => UGPP
4	260	2,0	101,0	14,7	4,5	60	120	7,4	UGPP
5	285	2,0	97,6	14,7	4,6	60	120	7,4	UGPP
6	310	2,0	94,1	14,7	4,6	60	120	7,2	UGPP
7	335	2,0	90,7	14,7	4,8	60	120	7,2	UGPP
8	360	2,0	87,3	14,7	4,8	60	120	7,2	UGPP

Amostra	Parâmetros de pulso							Comprimento do arco [mm]	Modo de destacamento de gotas
	Ip [A]	Tp [ms]	Ib [A]	Tb [ms]	W [m/min]	Frequência de pulso [Hz]	Corrente média [A]		
1	185	3,0	106,0	13,7	4,7	60	120	8,0	UGPP
2	210	3,0	100,5	13,7	4,8	60	120	8,0	UGPP
3	235	3,0	95,1	13,7	4,9	60	120	7,8	UGPP => MGPP
4	260	3,0	89,6	13,7	5,2	60	120	7,8	MGPP
5	285	3,0	84,1	13,7	5,2	60	120	7,6	MGPP
6	310	3,0	78,6	13,7	5,4	60	120	7,6	MGPP
7	335	3,0	73,2	13,7	5,4	60	120	7,6	MGPP
8	360	3,0	67,7	13,7	5,5	60	120	7,5	MGPP

APÊNDICES C – Gráficos de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame do modo de destacamento de UGMP

Forma de onda da corrente no modo de destacamento de UGMP



Forma de onda da tensão no modo de destacamento de UGMP

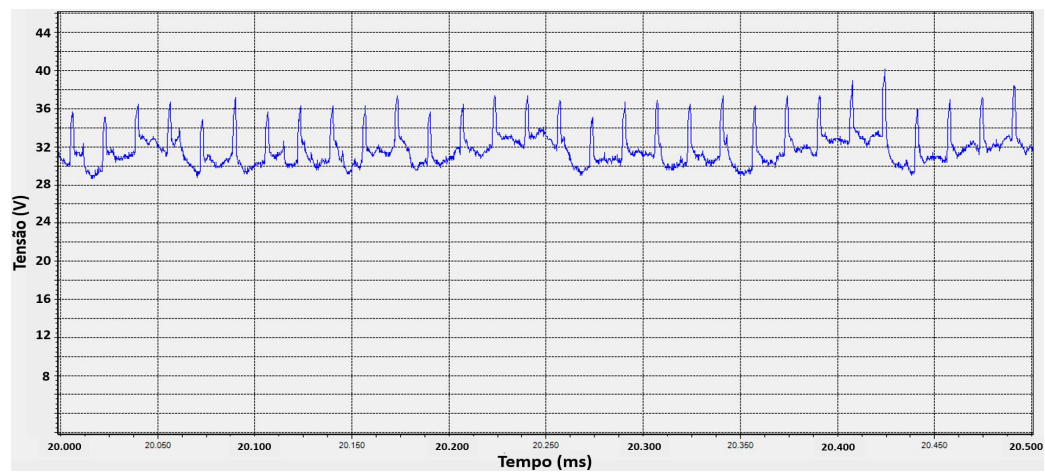
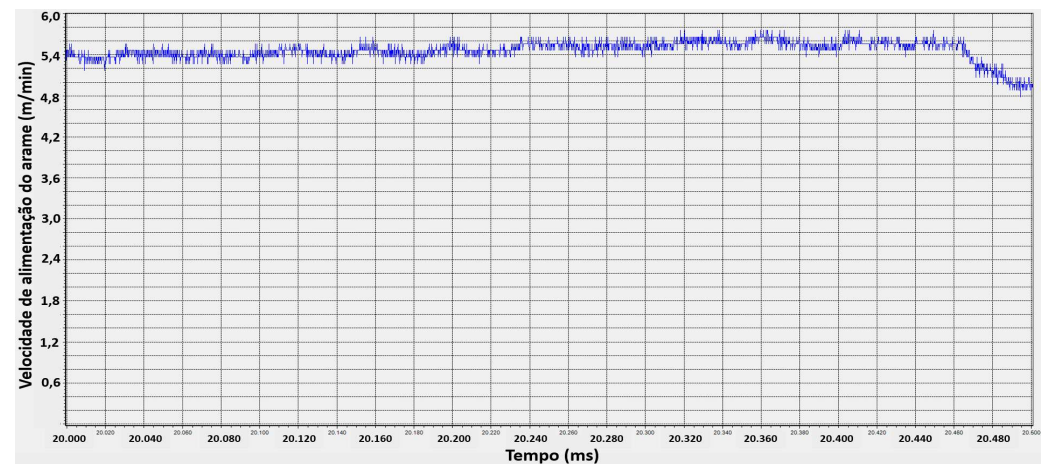
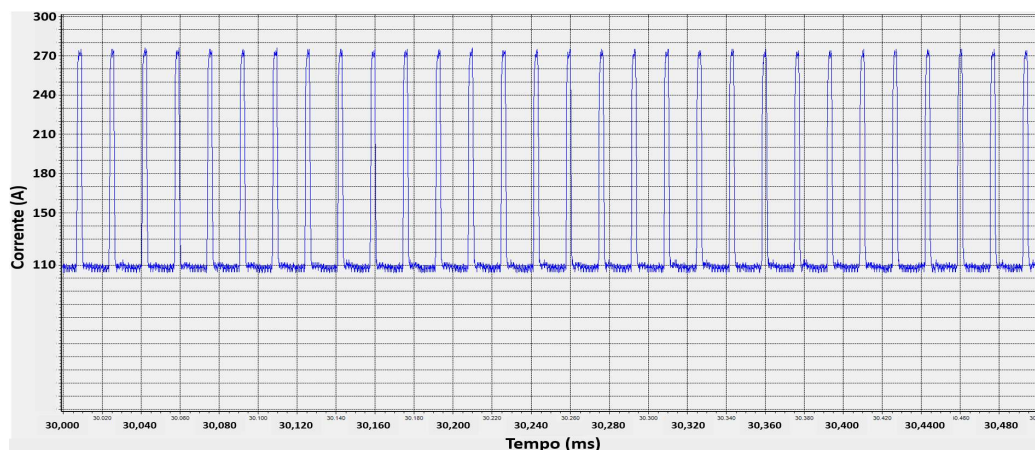


Gráfico da velocidade de alimentação do arame no modo de destacamento de UGMP



APÊNDICES D – Gráficos de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame do modo de destacamento de UGPP

Forma de onda da corrente no modo de destacamento de UGPP



Forma de onda da tensão no modo de destacamento de UGPP

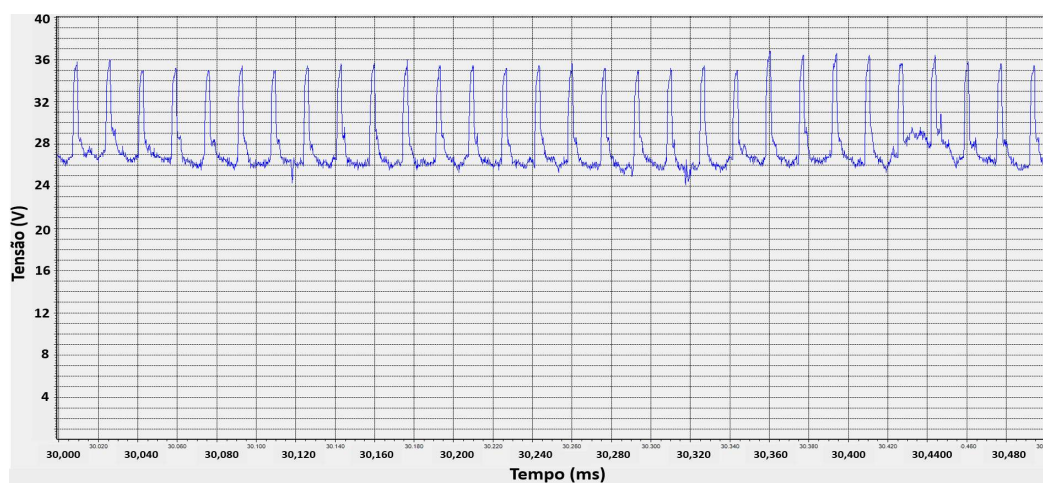
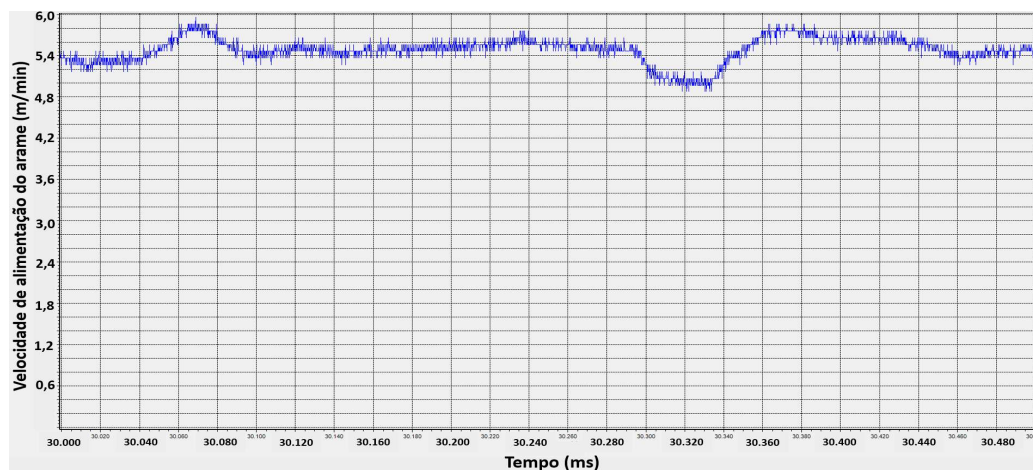
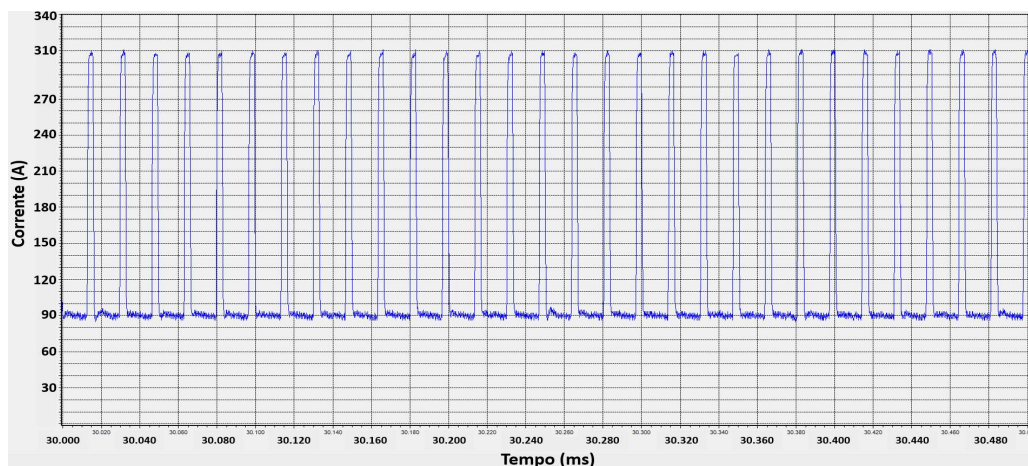


Gráfico da velocidade de alimentação do arame no modo de destacamento de UGPP



APÊNDICES E – Gráficos de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame do modo de destacamento de MGPP

Forma de onda da corrente no modo de destacamento de MGPP



Forma de onda da tensão no modo de destacamento de MGPP

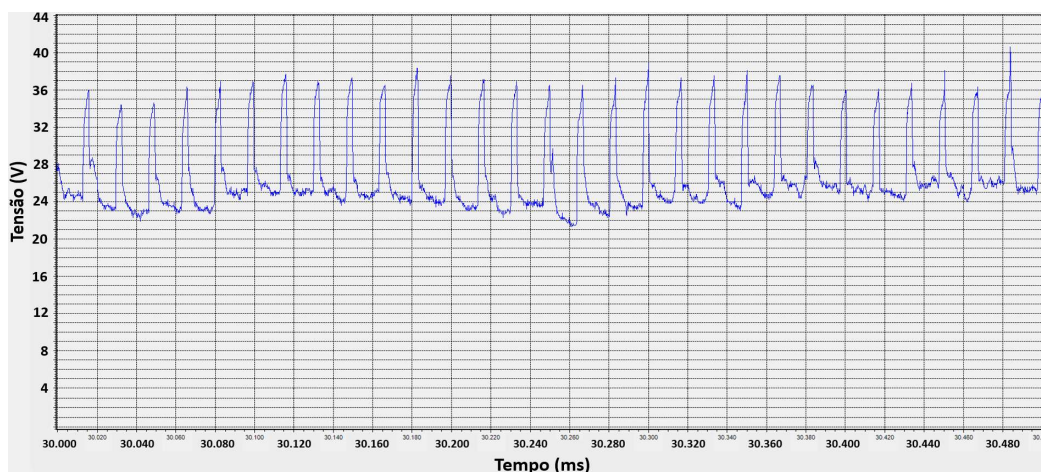


Gráfico da velocidade de alimentação do arame no modo de destacamento de MGPP

