



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**ESTUDO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES
FABRICADOS PELO PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A
ARCO**

André Luiz Brito Novelino

Brasília-DF, 12 de Novembro de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

ESTUDO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES FABRICADOS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

POR,

André Luiz Brito Novelino

Projeto de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Maksym Ziberov, ENM/FT-UnB (*Orientador*)

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, ENM/FT-UnB (*Coorientador*)

Profa. Déborah de Oliveira, ENM/FT-UnB (*Examinadora interna*)

Prof. Alysson Martins Almeida Silva, ENM/FT-UnB (*Examinador interno*)

FICHA CATALOGRÁFICA

NOVELINO, ANDRÉ LUIZ BRITO

ESTUDO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES FABRICADOS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO [Distrito Federal] 2021.

---, 80 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UNB, Engenheiro, Engenharia mecânica, 2021).

Projeto de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

1. Manufatura Aditiva de Metais

2. Processos de fabricação

3. Análise macroestrutural

4. Análise qualitativa

I. ENM/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NOVELINO, A.L.B. (2021). *ESTUDO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES FABRICADOS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: André Luiz Brito Novelino

TÍTULO: ESTUDO DA GEOMETRIA DOS CORDÕES FABRICADOS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

GRAU: Engenheiro Mecânico ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

André Luiz Brito Novelino
Depto. De engenharia Mecânica (ENM) – FT
Universidade de Brasília (UnB)
Campus Darcy Ribeiro
CEP 70919-970 – Brasília – DF – Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Mauro e Maria, a minha família e companheira Tatiane, e aos meus amigos Gabriel, Ícaro e todos os demais que me apoiaram durante toda a minha graduação e minha vida.

André Luiz Brito Novelino

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família por todas as oportunidades, pelo carinho e pela saúde. Agradeço também a Universidade de Brasília e a Faculdade de Tecnologia, assim como meu orientador Prof. Maksym Ziberov e meu coorientador Prof. Guilherme Caribé de Carvalho pelo incentivo e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Aos demais professores e servidores do Departamento de Engenharia Mecânica pela dedicação ao ensino de todos os alunos e aos meus amigos da equipe Apuama Racing por diversos momentos especiais e aprendizados em conjunto. Minha gratidão a todos.

André Luiz Brito Novelino

RESUMO

A manufatura aditiva de metais é um processo que se encontra em grande evolução atualmente, uma vez que a automatização dos processos de fabricação já é uma realidade no meio industrial e o segmento sempre busca novas formas de aumentar economia de material e eficiência nas linhas de produção. Dentre as tecnologias presentes na manufatura aditiva de metais, o processo MADA (Manufatura Aditiva com Deposição a Arco) é uma alternativa muito atrativa e muito abordada no meio acadêmico e industrial. Em vista do grande potencial de evolução, esse trabalho tem por objetivo avaliar a geometria de camadas formadas por cordões simples, depositados pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco, buscando determinar valores ótimos dos parâmetros, de forma a obter uma geometria estável e controlada em paredes compostas por múltiplas camadas. Para isso, o trabalho consiste em uma revisão acerca dos efeitos físicos que envolvem a deposição e as tecnologias utilizadas atualmente em trabalhos e projetos diversos. Na etapa experimental, foi organizado grupos de cordões simples e paredes de 5, 10 e 20 camadas a serem depositadas, organizados de acordo com os parâmetros desejáveis a serem avaliados. Uma análise comparativa do reforço/altura, largura total e efetiva foi feita ao longo do comprimento das amostras, determinando a influência individual de cada parâmetro e definindo as melhores configurações. Os resultados mostraram que o planejamento da trajetória influenciou a homogeneidade da amostra, com o método de deposição bidirecional obtendo as características mais estáveis para a altura das amostras. Para uma análise dos parâmetros utilizando o método CMT-GMAW, a configuração que obteve melhor desempenho quanto ao aporte térmico foi para a corrente de 62 A, depositada a uma velocidade de deslocamento da tocha de 8 mm/s e velocidade de deposição do arame de 2,6 m/min. Essa configuração foi utilizada para a deposição de uma parede de 100 camadas para estudo do estresse térmico submetido pelo material e na confecção de uma amostra cônica para análise da deposição de paredes anguladas, obtendo resultados satisfatórios quanto a qualidade superficial e homogeneidade da geometria para ambos os cenários.

Palavras-Chave: Manufatura aditiva; WAAM; MADA; geometria dos cordões; CMT-GMAW.

ABSTRACT

The metal additive manufacturing is a process that is currently undergoing great evolution, since the automation of manufacturing processes is already implemented in the industrial environment and the segment is always looking for new ways to increase material economy and efficiency in its production lines. Among the technologies present in the metal additive manufacturing, the WAAM process (Wire and Arc Additive Manufacturing) is an attractive alternative and widely discussed in academia and industry. To explore the potential of this method, this work aims at evaluating the geometry of layers deposited by the additive manufacturing process by arc deposition, seeking to determine optimal parameter values to obtain a stable and controlled geometry in multiple layers deposition. The work methodology consists of a review of the physical effects involving deposition and the technologies currently used in various works and projects. For the experimental procedure, simple bead samples and walls of 5, 10 and 20 layers were deposited and organized according to the desirable parameters to be evaluated. A comparative analysis of reinforcement/height, total and effective width was performed along the length of the samples, determining the individual influence of each parameter, and defining the best settings. The results showed that the torch path planning drastically influences the homogeneity of the sample, with the bidirectional deposition method obtaining the most stable characteristics for the height of the samples. For an analysis of the parameters using the CMT-GMAW method, the configuration that obtained the best heat input performance for the current of 62 A, deposited at a 8,0 mm/s torch speed and at a 2,6 m/min wire feed speed. This configuration was used for the deposition of a 100-layer wall to study the thermal stress to which the material was submitted by the material and to build a conical sample to allow the analysis of the deposition of angled walls. Satisfactory results were obtained in terms of surface quality and geometry homogeneity for both scenarios.

Keywords: Additive manufacturing; WAAM; bead geometry; CMT-GMAW

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ASPECTOS GERAIS	1
1.2	MOTIVAÇÃO	4
1.3	JUSTIFICATIVA	4
1.4	OBJETIVO	5
	ESTADO DE HIPÓTESE	5
1.5	NOTA DO AUTOR (preparação de artigos)	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	MANUFATURA ADITIVA DE METAIS POR ARCO ELÉTRICO	6
2.2	CONCEITOS FÍSICOS GERAIS	8
2.3	TECNOLOGIAS DE DEPOSIÇÃO	11
2.4	PARÂMETROS DO PROCESSO	16
2.5	DESCONTINUIDADES E DEFEITOS	21
2.5.1	Porosidade	21
2.5.2	Deformações e problemas de acabamento superficial	21
2.5.3	Trincas	22
2.5.4	Oxidação	24
2.5.5	Delaminação	25
2.5.6	Tensões residuais	25
2.5.7	Análise geral dos defeitos	26
2.6	MODELOS COMPUTACIONAIS	27
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	29
3.1	EQUIPAMENTO E CONSUMÍVEIS	29
3.2	METODOLOGIA	30
3.2.1	Métodos de deposição	33
3.2	OPERAÇÃO DO SISTEMA	33
3.3	MEDIÇÕES	34
3.4	NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	ANÁLISE DOS ENSAIOS	35

4.1.1	Amostras do grupo A	35
4.1.1.1	Análise geral do grupo A	42
4.1.2	Amostras do grupo B.....	44
4.1.2.1	Análise geral do grupo B.....	48
4.1.3	Amostras do Grupo C.....	50
4.1.3.1	Análise geral do grupo C.....	54
4.1.4	Amostras do Grupo D	56
4.1.4.1	Análise geral do grupo D	63
4.1.4.2	Análise da deposição de paredes anguladas	65
4.2	ANÁLISE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS AMOSTRAS	66
4.3	ANÁLISE DO ESTADO DE HIPÓTESE	69
5	CONCLUSÕES	70
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS.....	72
	APÊNDICE A	77
	APÊNDICE B.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ponte de aço inoxidável produzida completamente por manufatura aditiva (MX3D, 2020).....	1
Figura 2 Pinça de freio de titânio projetada e produzida por manufatura aditiva (BUGATTI automotivo, 2018).....	2
Figura 3 Foguete Terran I (Relativity Space, 2020).....	2
Figura 4 Stargate na fabricação do tanque de combustível em alumínio para o Terran 1 (Relativity Space apud ARS TECHNICA, 2019)	3
Figura 5 Componentes presentes no Rover Perseverance que foram fabricados por manufatura aditiva:.....	3
Figura 6 Principais centros de pesquisa para a manufatura aditiva com deposição por arco elétrico (Wu, et al. 2018).....	4
Figura 7 Processo de deposição de material para a formação de uma peça utilizando o WAAM.....	6
Figura 8 Primeira patente relacionada a manufatura aditiva de metais, com intuito de fabricação de objetos de ornamentação (Ralph, 1925).....	7
Figura 9 Exemplos de peças fabricadas por WAAM.	7
Figura 10 Comportamento do arco elétrico durante o processo de deposição (Shukla, et al. 2020).....	8
Figura 11 Esquema de fluxo e análise de forças atuantes na poça de fusão (Adaptado de, Hu, et al., 2021).....	9
Figura 12 Forma e posição das isotermas que delimitam a poça de fusão de acordo com a temperatura de fusão do material depositado (Ziberov, 2013).....	9
Figura 13 Microestrutura das regiões da parede para diferentes condições (Wu, et al, 2018b).....	10
Figura 14 Estrutura da placa obtida por XCT: (a) Regiões interfaciais; (b) Poros e; (c) Estrutura completa. (adaptado de Al-Nabulsi, et al., 2021)	10
Figura 15 Representação esquemática dos processos (a) GMAW, (b) GTAW e (c) PAW	11
Figura 16 Sistema WAAM utilizando processo GMAW (Adaptado de Li, et al., 2020)..	11
Figura 17 Aspectos superficiais de três cordões feitos pelos diferentes processos: (a) DP-GMAW I = 115 A, (b) P-GMAW I =70 A e (c) P-GMAW I = 160 A (Ziberov, 2013).....	12
Figura 18 Sistema automatizado para a deposição de material pelo processo GTAW	13

Figura 19 Descrição esquemática do PAW no processo CC-WAAM (adaptado de Liu, et al. 2019).....	13
Figura 20 Amostras produzidas em diferentes ambientes e dados das propriedades mecânicas das amostras e do material como construído (Adaptado de Artaza, et al. 2020)....	14
Figura 21 Exemplo esquemático do sistema de deposição CMT-GMAW (adaptado de Shukla, et al. 2020).....	15
Figura 22 (a) Representação esquemática Laser-CMT; (b) Foto do experimento realizado.	15
Figura 23 Representação dos ângulos de trabalho α e de deslocamento β (Adaptado de Su e Chen, 2019)	17
Figura 24 Seção transversal dos cordões para diferentes configurações de ângulo da tocha	17
Figura 25 Direção de deposição (a) unidirecional; (b) Bidirecional para a deposição linear de uma parede.....	17
Figura 26 Morfologia dos cordões depositados para diferentes configurações dos parâmetros de deposição	18
Figura 27 Seção transversal dos cordões depositados (Li, et al., 2020).....	19
Figura 28 Metodologia NIAC utilizada para resfriamento ativo do processo de deposição WAAM.....	20
Figura 29 Influência do método NIAC para a geometria dos cordões depositados em uma parede	20
Figura 30 Distribuição dos poros na estrutura em diferentes tamanhos. (Adaptado de Wang, et al., 2018)	21
Figura 31 Análise da morfologia do cordão depositado para: a) Diferentes velocidades de deslocamento da tocha; b) Diferentes vazões de gás de proteção. (adaptado de Liu, et al. 2019).....	22
Figura 32 (a) Sistema utilizado para a deposição; (b) Paredes depositadas pela trajetória oscilatória da tocha e representação das regiões retiradas para confecção dos corpos de prova. (Adaptado de Seow, et al. 2020)	22
Figura 33 Imagens obtidas no teste de detecção de trincas com revelador fluorescente na: (a) seção superior; (b) lateral da parede depositada. (Adaptado de Seow, et al. 2020).....	23
Figura 34 Superfícies da fratura dos corpos de prova obtidos pelo processo WAAM (paralelo e perpendicular à direção de deposição) em comparação com o padrão. (Seow, et al. 2020).....	23

Figura 35 Resultados das paredes depositadas e as imagens da deposição da primeira camada com as vazões de argônio em: (a) 10 l/min; (b) 8 l/min; (c) 6 l/min; (d) 4 l/min. (Hauser, et al., 2021)	24
Figura 36 (a) Progressão da concentração de oxigênio na região central de deposição para diferentes fluxos de gás de proteção e distâncias de trabalho da tocha; (b) Variação da concentração de oxigênio para um fluxo constante de argônio (10 l/min) na zona de deposição para diferentes velocidades de deslocamento da tocha (adaptado de Hauser, et al., 2021)	25
Figura 37 Componentes das tensões residuais obtida por uma simulação computacional realizada por Machine Learning (Wu, et al. 2020).....	26
Figura 38 Correlação entre os materiais e defeitos presentes em processos WAAM (Adaptado de Wu, et al. 2018a).....	26
Figura 39 Resultados obtidos na simulação térmica e estrutural. (adaptado de Abe, et al., 2020).....	27
Figura 40 Resultados da simulação para: (a) passe único; (b) sobrepasse; (c) malha gerada para o modelo de análise térmica; (d) sequência de deposição das camadas; (e) pontos de medição para comparação dos resultados (Wu, et al., 2017)	28
Figura 41 Comparação da temperatura de interpasse presente nas camadas depositadas para o resfriamento por convecção natural e jateamento de ar (Adaptado de Hackenhaar, et al., 2020).....	28
Figura 42 Robô cartesiano MAXR-23-S42-H42-C42 (Schneider Electric, 2021).....	29
Figura 43 Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (adaptado de FRONIUS,2020).....	29
Figura 44 Representação das medidas a serem avaliadas para: a) cordão simples; b) parede.	31
Figura 45 Fluxograma de atividades	32
Figura 46 Representação do layout do sistema utilizado para os ensaios.	33
Figura 47 Tela de comando da fonte de soldagem Fronius TPS5000.	34
Figura 48 Amostra A1T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.	36
Figura 49 Amostra A2T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.	36
Figura 50 Amostra A3T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.	37
Figura 51 Segundo cordão depositado com as configurações da amostra A3T6 para avaliar a ocorrência de respingos.	37
Figura 52 Amostra A4T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.	38
Figura 53 Amostra A5T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.	38
Figura 54 Amostra A6T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.	39

Figura 55 Amostra A7T6 – cordão simples depositado com velocidade de deposição de 6 mm/s.	39
Figura 56 Amostra A3T12 – cordão simples depositado com velocidade de deposição de 12 mm/s.	40
Figura 57 Amostra A3T18 – cordão simples depositado com velocidade de deposição de 18 mm/s.	41
Figura 58 Amostra A1T8+45 – cordão simples depositado com tocha 45° puxando	41
Figura 59 Amostra A1T8-45 – cordão simples depositado com tocha 45° empurrando...	42
Figura 60 Comparativo das amostras grupo A – Altura.	43
Figura 61 Comparativo das amostras do grupo A - Largura.	43
Figura 62 Análise de qualidade para as amostras do grupo A.	43
Figura 63 Amostra B3T6f_Uni - Parede de 5 camadas com deposição unidirecional e subida fixa da tocha em 1,2 mm por camada.	45
Figura 64 Amostra B3T6c_Uni - Parede de 5 camadas com DBCP constante em 12 mm.	45
Figura 65 Amostra B3T6c_Bidi - Parede de 5 camadas com DBCP constante em 12 mm e deposição bidirecional.	46
Figura 66 Amostra B3T6c_Bidc - Parede de 5 camadas com DBCP aproximado em 12 mm e deposição bidirecional contínua.	47
Figura 67 Amostra B3T12f_Bidc - Parede de 5 camadas com subida fixa em 2,1 mm por camada e deposição bidirecional contínua.	48
Figura 68 Comparativo das amostras grupo B – Altura.	49
Figura 69 Comparativo das amostras do grupo B - Largura.	49
Figura 70 Análise de qualidade para as amostras do grupo B.	49
Figura 71 Amostra C3T6f_Bidc - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,9 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo.	50
Figura 72 Amostra C3T12f_Bidc - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,9 mm e deposição bidirecional com arco contínuo.	51
Figura 73 Amostra C3T12f_Bidc2 - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,2 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo.	52
Figura 74 Amostra C3T12f_Uni - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,2 mm por camada e deposição unidirecional e temperatura de interpasse 70°C.	53
Figura 75 Amostra C3T24f_Bidc - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo.	54

Figura 76 Comparativo das amostras grupo C – Altura.	55
Figura 77 Comparativo das amostras grupo C – Largura.....	55
Figura 78 Análise de qualidade para as amostras do grupo C.....	56
Figura 79 Amostra D2T6f_Bidc - Parede de 10 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada.....	57
Figura 80 Amostra D1T6f_Bidc - Parede de 20 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada.....	58
Figura 81 Amostra D2T12f_Bidc - Parede de 20 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada.....	59
Figura 82 Amostra D1T12f_Bidc - Parede de 7 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada.....	60
Figura 83 Amostra D1T8f_Bidc - Parede de 20 camadas com subida fixa em 1,2 mm por camada.....	61
Figura 84 Amostra D1T8/24f_Bidc - Parede de 100 camadas com subida fixa em 1,2 mm por camada	62
Figura 85 (a) Presença de respingos na deposição das amostras do grupo D. (b) Óxidos formados durante o processo de deposição da amostra D1T8/24f_Bidc.	63
Figura 86 Comparativo das amostras grupo D – Altura.....	63
Figura 87 Comparativo das amostras grupo D – Largura.	64
Figura 88 Análise de qualidade para as amostras do grupo D.....	64
Figura 89 Geometria cônica excêntrica depositada utilizando os parâmetros da amostra D6. Vista isométrica (a), vista superior (b) e vista lateral (c).	65
Figura 90 Análise da seção da amostra cônica (a), com as medidas de largura total (amarelo) e efetiva (laranja) do lado da parede reto (b) e angulado (c).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Taxa de deposição para as tecnologias de deposição (adaptado de Wu, et al., 2018a).....	18
Tabela 2 Propriedades do arame ER70S-6 (TECHNO ALLOYS, 2016).....	30
Tabela 3 Etapas de preparação para os ensaios	30
Tabela 4 Parâmetros utilizados nas amostras do grupo A.	35
Tabela 5 Medições de altura e largura da amostra A1T6.	36
Tabela 6 Medições de altura e largura da amostra A2T6.	36
Tabela 7 Medições de altura e largura da amostra A3T6.	37
Tabela 8 Medições de altura e largura da amostra A4T6.	38
Tabela 9 Medições de altura e largura da amostra A5T6.	38
Tabela 10 Medições de altura e largura da amostra A6T6.	39
Tabela 11 Medições de altura e largura da amostra A7T6.	40
Tabela 12 Medições de altura e largura da amostra A3T12.	40
Tabela 13 Medições de altura e largura da amostra A3T18.	41
Tabela 14 Medições de altura e largura da amostra A1T8+45.....	41
Tabela 15 Medições de altura e largura da amostra A1T8-45.....	42
Tabela 16 Parâmetros utilizados para as amostras do grupo B.	44
Tabela 17 Medições de altura e largura da amostra B3T6f_Uni.	45
Tabela 18 Medições de altura e largura da amostra B3T6c_Uni.....	46
Tabela 19 Medições de altura e largura da amostra B3T6c_Bidi.....	46
Tabela 20 Medições de altura e largura da amostra B3T6c_Bidc.	47
Tabela 21 Medições de altura e largura da amostra B3T12f_Bidc.....	48
Tabela 22 Parâmetros utilizados para as amostras do grupo C.	50
Tabela 23 Medições de altura e largura da amostra C3T6f_Bidc.....	51
Tabela 24 Medições de altura e largura da amostra C3T12f_Bidc.....	51
Tabela 25 Medições de altura e largura da amostra C3T12f_Bidc2.....	52
Tabela 26 Medições de altura e largura da amostra C3T12f_Uni.	53
Tabela 27 Medições de altura e largura da amostra C3T24f_Bidc.....	54
Tabela 28 Parâmetros utilizados para as amostras do grupo D.	56
Tabela 29 Medições de altura e largura para a amostra D2T6f_Bidc.	57
Tabela 30 Medições de altura e largura para a amostra D1T6f_Bidc.	58

Tabela 31 Medições de altura e largura para a amostra D2T12f_Bidc.	59
Tabela 32 Medições de altura e largura para a amostra D1T12f_Bidc.	60
Tabela 33 Medições de altura e largura para a amostra D1T8f_Bidc.	61
Tabela 34 Medições de altura e largura para a amostra D1T8/24f_Bidc.	62
Tabela 35 Análise da seção transversal das amostras do grupo A.....	66
Tabela 36 Análise da seção transversal das amostras do grupo B.....	67
Tabela 37 Análise da seção transversal das amostras do grupo C.....	68
Tabela 38 Análise da seção transversal das amostras do grupo D.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

T	Temperatura	[°C]
t	Variável representativa de tempo	[s]
Q	Quantidade de calor	

Símbolos Gregos

α	Ângulo de trabalho	[°]
β	Ângulo de deslocamento	[°]
σ_{ii}	Tensão Normal	[MPa]
Θ	Ângulo de molhamento	[°]

Nomenclaturas

<i>GmbH</i>	Sociedade com responsabilidade limitada
-------------	---

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CC-WAAM	<i>Compusively Constricted Wire Arc Additive Manufacturing</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DBCP	Distância bico de contato - peça
DMLS	<i>Direkt metal laser Schmelzen</i>
DP-GMAW	<i>Double- Pulsed Gas Metal Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HD	<i>Horizontal Deposition</i>
LRT	Limite de Resistência a Tração
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
MOXIE	<i>Mars Oxygen In-Situ Resource utilization Experiment</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIAC	<i>Near-immersion active cooling</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
P-GMAW	<i>Pulsed Gas Metal Arc Welding</i>
PIXL	<i>Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
VD	<i>Vertical Deposition</i>
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
XCT	<i>X-ray Computed Tomography</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O setor industrial nos últimos anos, devido a uma crescente demanda de produtos, apresentou grandes evoluções com a Indústria 4.0, que abrange a introdução de novas tecnologias no setor, empregadas de forma automatizada em linhas de produção, aumentando a produção e reduzindo custos e tempo empregado. Uma das tecnologias de fabricação que apresentaram grande desenvolvimento devido aos avanços tecnológicos é a Manufatura Aditiva (MA), que abrange diversas tecnologias empregadas para diferentes materiais, como polímeros, cerâmicas e metais.

A manufatura aditiva apresenta como principal atributo positivo a grande liberdade de modelagem com o uso de braços robóticos e/ou mesa de coordenadas, além de atualmente ser uma tecnologia totalmente automatizada, um atrativo para o desenvolvimento de produtos. Um exemplo de aplicação foi desenvolvido e apresentado no evento *Dutch design week 2018*, mostrado na Figura 1. A empresa MX3D desenvolveu uma ponte de aço inoxidável totalmente produzida por métodos de manufatura aditiva de metais. A infraestrutura pretende ser instalada na Holanda e, de acordo com a empresa, passa por testes, sendo aprovada na primeira fase, com a validação da capacidade de carga, com 20 ton suportadas pela ponte (MX3D, 2020).



Figura 1 Ponte de aço inoxidável produzida completamente por manufatura aditiva (MX3D, 2020)

A aplicação e desenvolvimento da tecnologia também pode ser introduzido no setor automotivo, como por exemplo a adoção da tecnologia para a produção de peças pela *BUGATTI Automotive*. A empresa apresentou um modelo de pinça de freio produzido por manufatura aditiva de titânio para futuras aplicações em modelos da marca. A Figura 2 apresenta o modelo e um registro feito em um teste de frenagem, sendo bem-sucedida em todos os ensaios realizados (BUGATTI Automotive, 2019).



Figura 2 Pinça de freio de titânio projetada e produzida por manufatura aditiva (BUGATTI automotive, 2018)

A manufatura aditiva além do setor automotivo, vem sendo estudada e começa a ser implementado no setor aeroespacial. A *Relativity Space* é uma das empresas, que tem o objetivo realizar a construção do primeiro foguete composto por peças feitas por manufatura aditiva. O foguete, chamado Terran I (Figura 3), será constituído 95% por componentes fabricados por manufatura aditiva e o objetivo é que o projeto tenha um número de componentes na faixa de aproximadamente 1000 componentes, onde este número em projetos tradicionais supera a faixa de 100000.

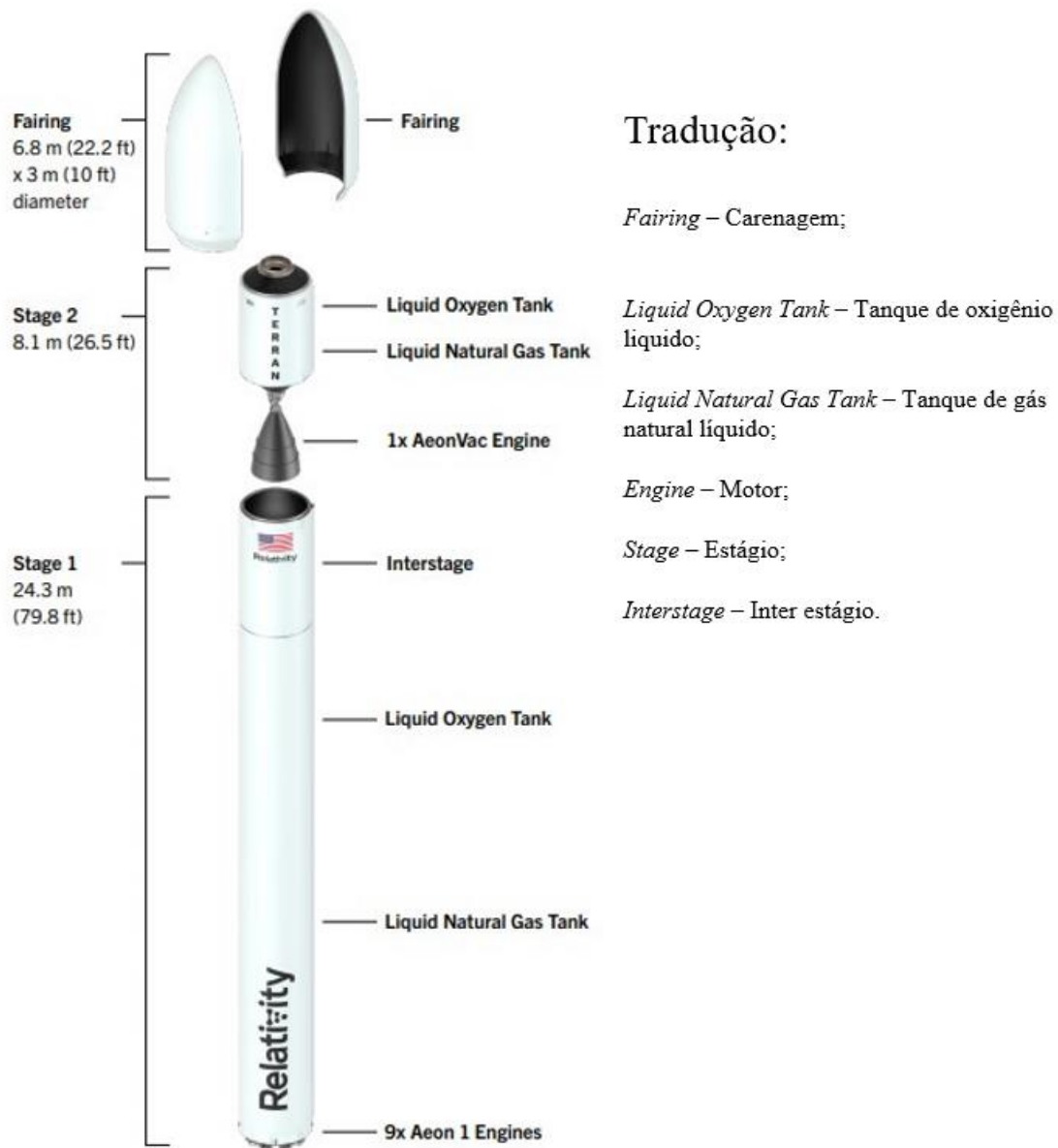


Figura 3 Foguete Terran I (Relativity Space, 2020)

Para a produção de grandes componentes presentes no Terran I, a *Relativity Space* possui um equipamento de manufatura aditiva composto por 3 braços robóticos, chamado Stargate (Figura 4). Com este equipamento, é possível construir todos os tanques e componentes estruturais do foguete, além da cápsula de carenagem no topo do foguete.



Figura 4 Stargate na fabricação do tanque de combustível em alumínio para o Terran 1 (Relativity Space apud ARS TECHNICA, 2019)

No setor espacial ainda, mais uma aplicação da manufatura aditiva está presente na missão Perseverance da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O rover atualmente em missão no planeta Marte é constituído por 11 partes metálicas fabricadas por manufatura aditiva de metais, onde duas dessas é o trocador de calor e a estrutura do MOXIE (*Mars Oxygen In-Situ Resource utilization Experiment*), um equipamento experimental de produção de oxigênio através da quebra do dióxido de carbono na atmosfera marciana (Figura 5(a)). Outro componente que apresenta peças manufaturadas pelo processo é o PIXL (*Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry*), dispositivo que é utilizado para analisar superfícies de rochas em busca de sinais de vida microbiana em Marte (Figura 5(b)) (NASA, 2020).

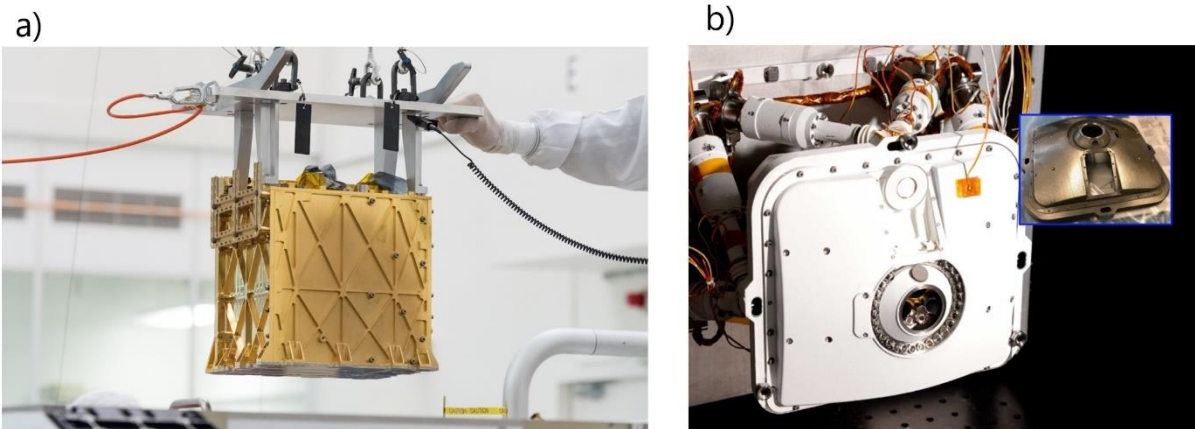


Figura 5 Componentes presentes no Rover Perseverance que foram fabricados por manufatura aditiva: (a) MOXIE (NASA, 2019) e (b) PIXL (NASA, 2020)

1.2 MOTIVAÇÃO

Com base em todas as aplicações apresentadas na Seção 1.1, é possível perceber a grande variedade de aplicações da manufatura aditiva em diferentes áreas da indústria. A crescente abordagem do assunto no meio acadêmico, como evidenciado neste trabalho, também mostra o potencial de evolução do processo de manufatura aditiva e a adesão por parte das instituições acadêmicas e empresas no desenvolvimento do conceito, utilizando diferentes tecnologias e com o incentivo à automatização de toda a produção.

Sendo assim, a principal motivação para a execução deste trabalho é a possibilidade de colaborar com o estudo do processo e a auxiliar a introdução do conceito futuramente em projetos da faculdade, com a continuação dos estudos e desenvolvimento da tecnologia.

1.3 JUSTIFICATIVA

Essa prospecção de evolução do processo mostra a importância do desenvolvimento e pesquisa do conceito pelas instituições, com o objetivo de formar grandes profissionais para alimentar a crescente demanda da modalidade. Um exemplo das frentes de trabalho ao redor do mundo, Wu, *et al.* (2018) apresenta na Figura 6 os principais centros de pesquisa de manufatura aditiva presentes ao redor do mundo, com o foco no estudo da manufatura aditiva com deposição por arco elétrico.

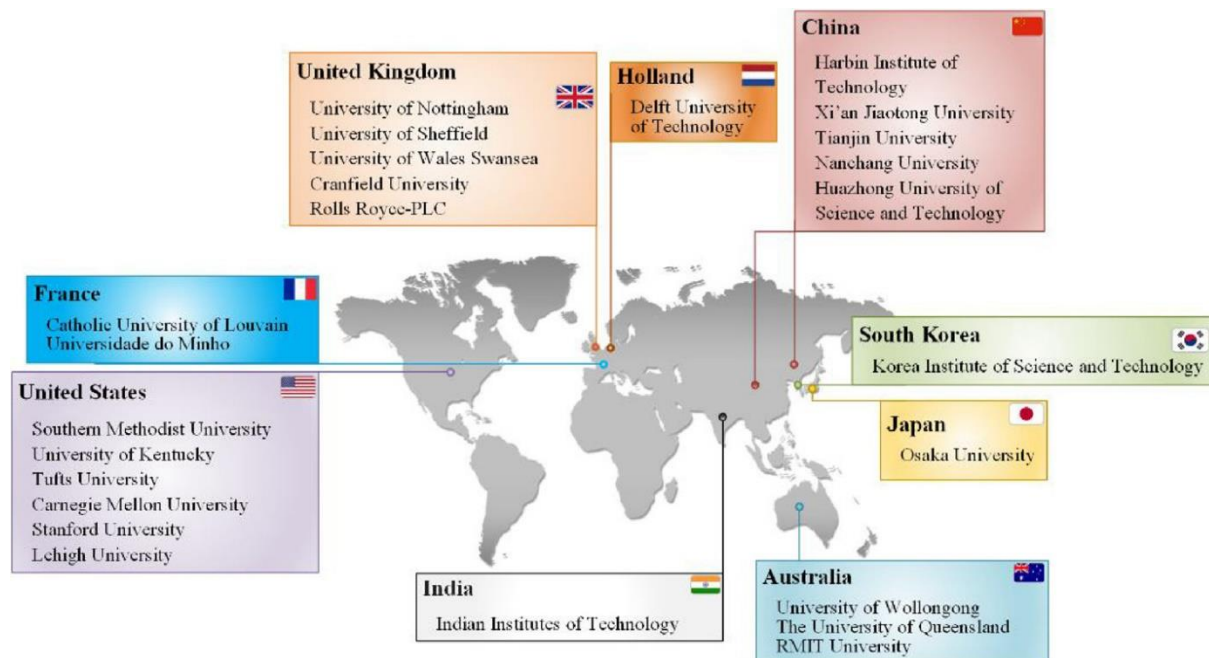


Figura 6 Principais centros de pesquisa para a manufatura aditiva com deposição por arco elétrico (Wu, et al. 2018)

Ainda sem um grande centro de pesquisa na América do Sul, apesar de possuir grande potencial para desenvolvimento e grandes pesquisadores já atuantes, é importante que haja maior contribuição com a pesquisa para a manufatura aditiva de metais com deposição por arco elétrico e divulgação da tecnologia no país, com publicações e trabalhos em português. Tais ações auxiliando na evolução da pesquisa científica sobre o assunto no Brasil e atraindo atenção de empresas interessadas no investimento da área no país.

1.4 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é avaliar as geometrias dos cordões fabricados pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), baseada na fusão do arame consumível pelo arco elétrico, e determinar os melhores parâmetros, de forma a obter uma geometria mais estável e uniforme. Para isso deverá ser feito:

- Avaliar as características das geometrias para as deposições unidirecional e bidirecional;
- Avaliar o efeito da velocidade de deslocamento da tocha na geometria das camadas depositadas;
- Avaliar qualidade superficial das amostras depositadas;
- Verificar o efeito dos ciclos térmicos para deposição de paredes com 5, 10, 20 e 100 camadas;
- Determinar a distância bico de contato-peça com melhor desempenho para deposição;
- Avaliar a seção transversal das camadas, realizando a medida da largura total e efetiva das amostras, assim como o ângulo de molhamento;
- Verificar o desempenho da deposição de uma parede angulada para uma estrutura cônica excêntrica.

ESTADO DE HIPÓTESE

O uso do processo CMT-GMAW com diâmetro de arame 1,20 mm na deposição das camadas com trajetória de deposição bidirecional e com arco interrompido, e o controle da temperatura interpasse entre camadas deve influenciar positivamente na deposição e geometria do(s) cordão(ões)/camadas.

1.5 NOTA DO AUTOR (preparação de artigos)

Até a presente data dois trabalhos foram publicados no congresso nacional 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF 2021), apresentação dos trabalhos aconteceu entre os dias 24 a 26 de maio deste ano (Apêndice A):

- **A.L.B. Novelino**, G.C. Carvalho, R.P. Reis e M. Ziberov. Métodos para manufatura aditiva de metais a arco elétrico: uma revisão. In: 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2021, Curitiba. ABCM, 2021. p. 1-8.
- **A.L.B. Novelino**, G.C. Carvalho e M. Ziberov. Importância dos métodos de simulação na manufatura aditiva por arco elétrico: uma revisão. In: 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2021, Curitiba. ABCM, 2021. p. 1-8.

Artigo foi aceito para publicação e será publicado no congresso internacional 26th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2021), que ocorrerá entre os dias 22 e 26 de Novembro deste ano (Apêndice B):

- **A.L.B. Novelino** e M. Ziberov. Defects in wire and arc additive manufactured components: a review. In: 26th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, 2021, Florianópolis. ABCM, 2021.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA DE METAIS POR ARCO ELÉTRICO

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), também conhecido como WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), é um processo que atrai um crescente foco ao longo dos anos pelo setor industrial, tendo a possibilidade de confecção de peças complexas, com uma alta taxa de deposição e com economia de material, além de possuir um maquinário com menor custo em comparação com outros processos de fabricação, como a usinagem, e outras tecnologias de manufatura aditiva, como a Fusão direta de metal a laser (DMLS), a Fusão seletiva a laser (SLM) ou a fusão por feixe de elétrons (EBM) (Wu, *et al.*, 2018a).

O processo WAAM funciona com a abertura do arco elétrico a partir de uma fonte de energia, para a fusão do material a ser depositado na formação de um cordão. A geometria é formada a partir da sobreposição dos cordões em diversas camadas pelo movimento da tocha do equipamento, como destacado na Figura 7. Com a deposição das camadas, diversos parâmetros são avaliados, como a velocidade de deslocamento da tocha e velocidade de alimentação de arame para determinar a quantidade de material introduzido, parâmetros de soldagem para regulagem do aporte térmico da peça, e temperatura de interpasse, que determina a influência do calor durante a deposição de uma camada pelas demais já depositadas (Alberti, *et al.*, 2014).

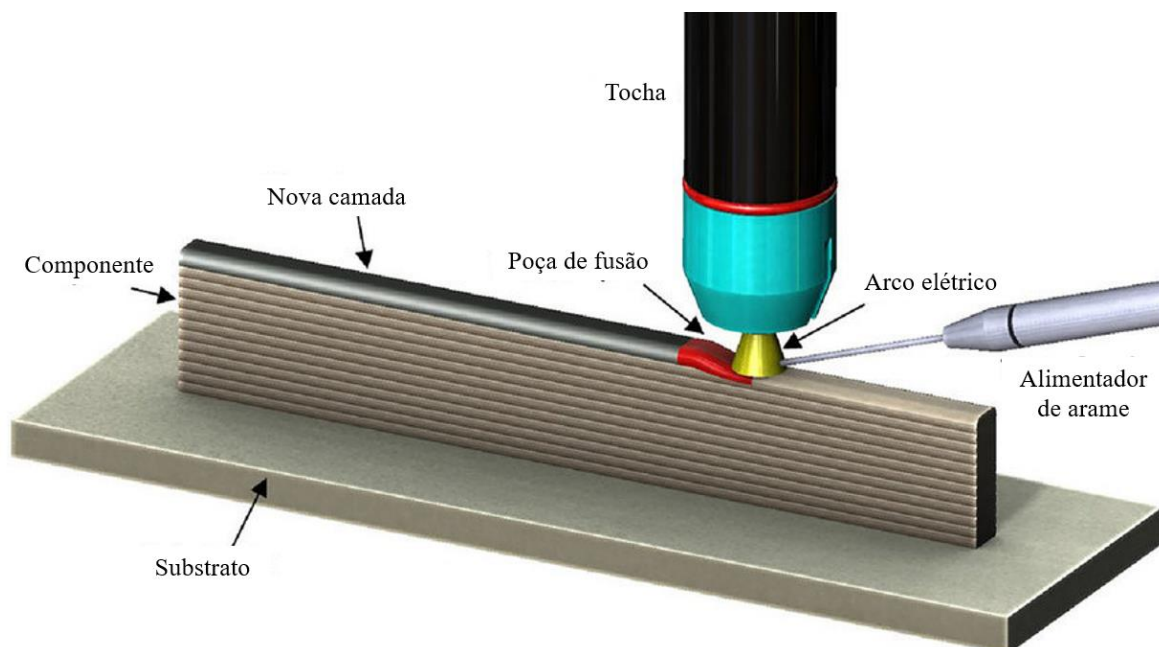


Figura 7 Processo de deposição de material para a formação de uma peça utilizando o WAAM (Adaptado de McAndrew, et al. 2018)

A primeira aplicação relacionada relatada por diversos autores foi a patente apresentada em 1925 (Ralph, 1925) onde era proposto a manipulação de eletrodos de fusão na construção de paredes em objetos de decoração (Figura 8). Pela falta de tecnologia, a deposição era feita de maneira artesanal e o controle dos parâmetros era quase inexistente, ocasionando uma superfície bem irregular.

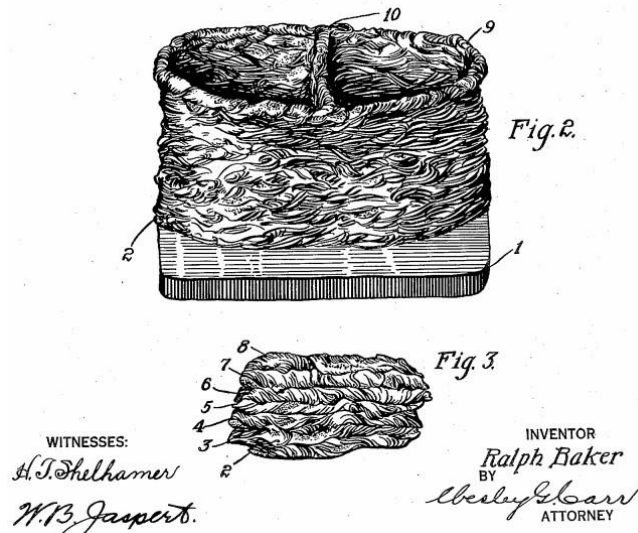


Figura 8 Primeira patente relacionada a manufatura aditiva de metais, com intuito de fabricação de objetos de ornamentação (Ralph, 1925)

Porém com os avanços tecnológicos e computacionais, principalmente no final do século XX, diversas tecnologias começaram a ser desenvolvidas, e iniciou-se a utilização da manufatura aditiva em aplicações médicas, como próteses e modelos pré-operatórios para estudo (Kruth, *et al.*, 1998). Os autores mencionam diversas tecnologias para a deposição de polímeros, denominados para a prototipagem de partes, mas também apresentou tecnologias para a deposição de metal, como abordado também por Kunieda, *et al.* (1998), com a proposta de eletrodeposição de uma solução aquosa de nitrato de cobre para a fabricação de uma pequena geometria formada por deposição por camadas sobrepostas de material.

A criação das geometrias é realizada por modelagem 3D CAD (*Computer-Aided Design*) e os modelos de trajeto são feitos por fatiamento da estrutura em camadas, gerando um trajeto a ser percorrido pela tocha (Volpato, 2017). Após a deposição, normalmente é realizada uma etapa de pós processamento para melhoria do acabamento, com o uso da usinagem, como exemplificado na Figura 9. A economia de material é evidente, uma vez que não é necessário realizar a usinagem para retirar o material em todo o volume ocupado pela peça (Figura 9(c)). O procedimento é utilizado apenas para acabamento superficial, necessitando menor esforço do equipamento de usinagem e reduzindo o tempo de produção da peça.

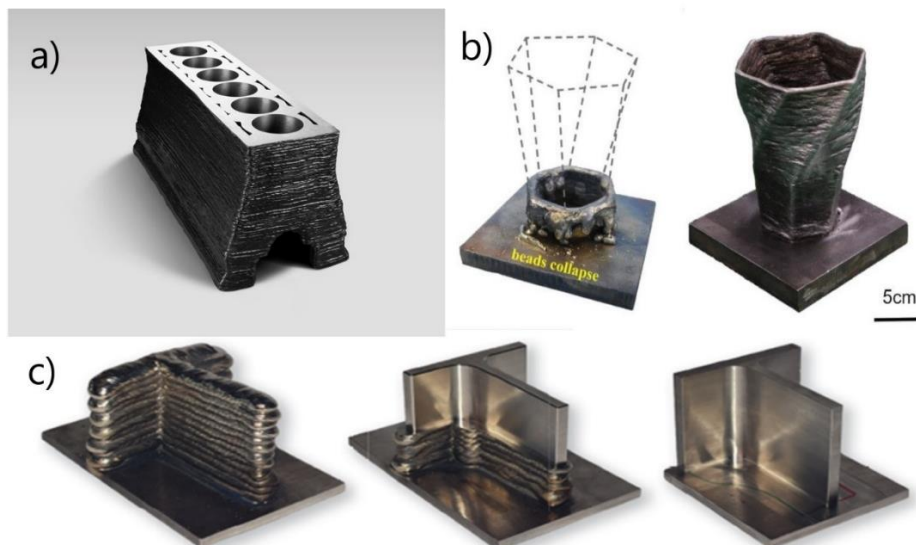


Figura 9 Exemplos de peças fabricadas por WAAM.

(a)Manufatura de um bloco de motor utilizando WAAM (AM MEDIA, 2020), (b)Confecção de uma estrutura utilizando um método de resfriamento (Lu, *et al.*, 2017) e (c) processo de acabamento para peças manufaturadas por WAAM (FRONIUS GmbH apud AFRICAN FUSION, 2020).

Atualmente, pesquisas com diferentes tecnologias e metodologias são aplicadas para a deposição WAAM e a compreensão dos efeitos físicos estão melhor determinadas, por meio do controle dos parâmetros de soldagem, deslocamento da tocha e da taxa de deposição do material. O processo pode ser utilizado com a maioria dos materiais metálicos e suas respectivas ligas, como por exemplo ligas de aço, alumínio, níquel, cobre e titânio, em diferentes composições e ainda composições bimetálicas destes materiais (Wu, *et al.* 2018a).

2.2 CONCEITOS FÍSICOS GERAIS

Para um maior entendimento do processo de manufatura aditiva por arco elétrico, diversos estudos vêm sendo conduzidos para análise dos efeitos físicos presentes. Como objetivo, tais efeitos são conceituados para as aplicações específicas no campo da manufatura aditiva, aumentando a compreensão da dinâmica envolvida, e permitindo otimizar as metodologias e equipamentos. Sendo assim, o estudo do arco elétrico, a dinâmica da deposição de material e do comportamento da poça de fusão, os ciclos térmicos presentes e os efeitos das metodologias na deposição das camadas e no aporte térmico são realizados para compreensão. A análise de técnicas de resfriamento em relação da caracterização microestrutural gerada também são focos de estudos conduzidos e que serão abordados nessa seção.

Shukla, *et al.* (2020) apresentam um estudo do comportamento do arco elétrico durante o processo WAAM. Para os autores, o estudo detalhado do efeito físico é importante para compreensão da variação dimensional das camadas depositadas e a distribuição de calor com a tecnologia utilizada. A Figura 10 apresenta a captura de imagens do arco elétrico para diferentes faixas de tensão e corrente, parâmetros de regulação do efeito físico. Esses dados foram comparados com a estrutura dos cordões depositados, avaliando a intensidade ao longo das camadas, determinando os efeitos presentes na transferência de material. Os autores determinaram que a intensidade do arco elétrico é crescente durante a deposição da primeira até a quarta camada continuamente, se estabilizando nas seguintes. A possível causa da ocorrência desse efeito é o resfriamento presente nas primeiras camadas por conta do material de base, afetando a geometria dessas primeiras camadas.

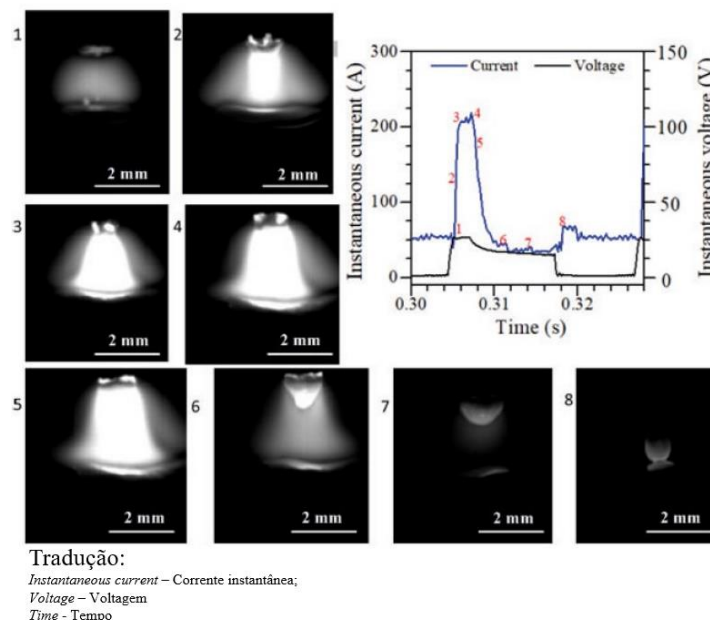


Figura 10 Comportamento do arco elétrico durante o processo de deposição (Adaptado de Shukla, et al. 2020)

Outra vertente de estudos apresenta um foco no comportamento da poça de fusão, avaliando o fluxo de material adicionado, a difusão de calor ao longo das regiões periféricas da poça e a solidificação do material após a deposição. Hu, *et al.* (2021) apresentam na Figura 11 um esquema

representativo, listando as forças atuantes na poça de fusão e os fluxos gerados para o ângulo de deposição de 90°. Tais forças, geradas devido aos efeitos físicos, eletromagnéticos e termodinâmicos, apresentam diferentes influências para o escoamento de material na poça de fusão, alterando o processo de solidificação e geometria do cordão.

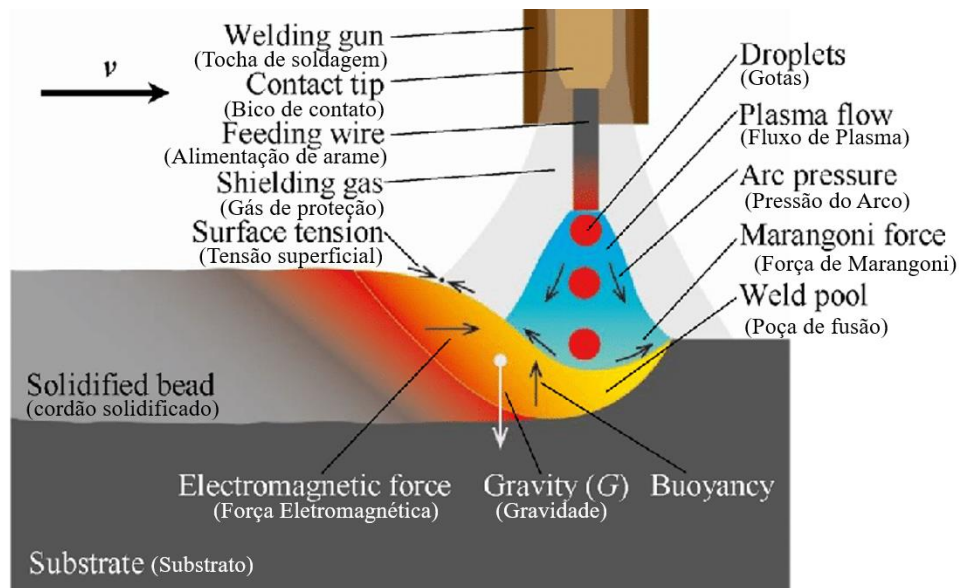


Figura 11 Esquema de fluxo e análise de forças atuantes na poça de fusão (Adaptado de, Hu, *et al.*, 2021)

Ziberov (2013) também apresenta e comenta sobre os efeitos presentes na poça de fusão e o formato típico em função da temperatura de fusão do material, sendo delimitados pelas isotermas ilustradas na Figura 12.

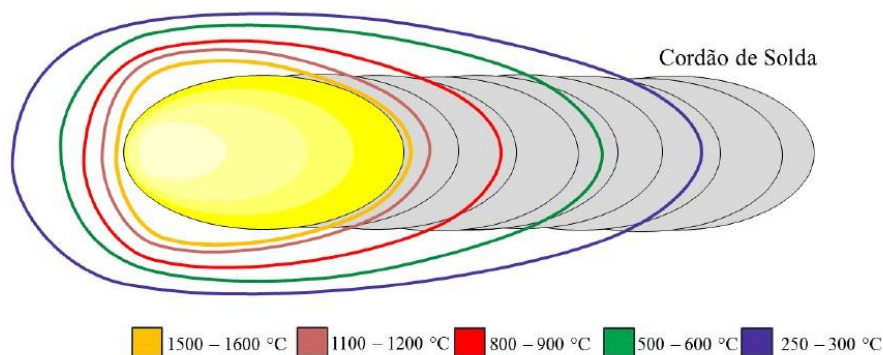


Figura 12 Forma e posição das isotermas que delimitam a poça de fusão de acordo com a temperatura de fusão do material depositado (Ziberov, 2013)

Outro fator de importância estudado é o efeito dos ciclos térmicos e do resfriamento no processo WAAM, avaliando a composição metalográfica obtida com o uso de diferentes metodologias, a porosidade do cordão e as propriedades mecânicas para a determinação do grau de anisotropia da peça. Wu, *et al.* (2018b) mostram a importância da abordagem destes fatores físicos, avaliando a microestrutura gerada em diferentes camadas das paredes de Ti-6Al-4V. As amostras foram submetidas a temperaturas de interpasse de 100°C a 300°C e comparadas com o processo utilizando gás CO₂ para refrigeração, com as estruturas presentes na Figura 13. Com os ensaios mecânicos, os autores defendem a implementação do uso de CO₂ no resfriamento, por ser de fácil implementação e permitir um menor tempo de interpasse, reduzindo o tempo de manufatura.

O método de resfriamento rápido implementado por Wu, *et al.* (2018b) gerou um maior refinamento dos grãos, apresentado na Figura 13(a4, b4, c4), que acarretou um pequeno aumento da dureza. A resistência mecânica teve uma melhoria, com o limite de resistência a tração e alongamento,

respectivamente, aumentando de 847 ± 35 MPa e 15% (300°C de temperatura de interpasse) para 913 ± 17 MPa e aproximadamente 13,8% com o uso do resfriamento ativo de CO₂. De acordo com os autores, a maior taxa de resfriamento pelo uso do método ativo contribuiu na uniformidade da microestrutura ao longo de toda a parede, como visto nas Figura 13(b4, c4), o que garante maior isotropia nas propriedades mecânicas.

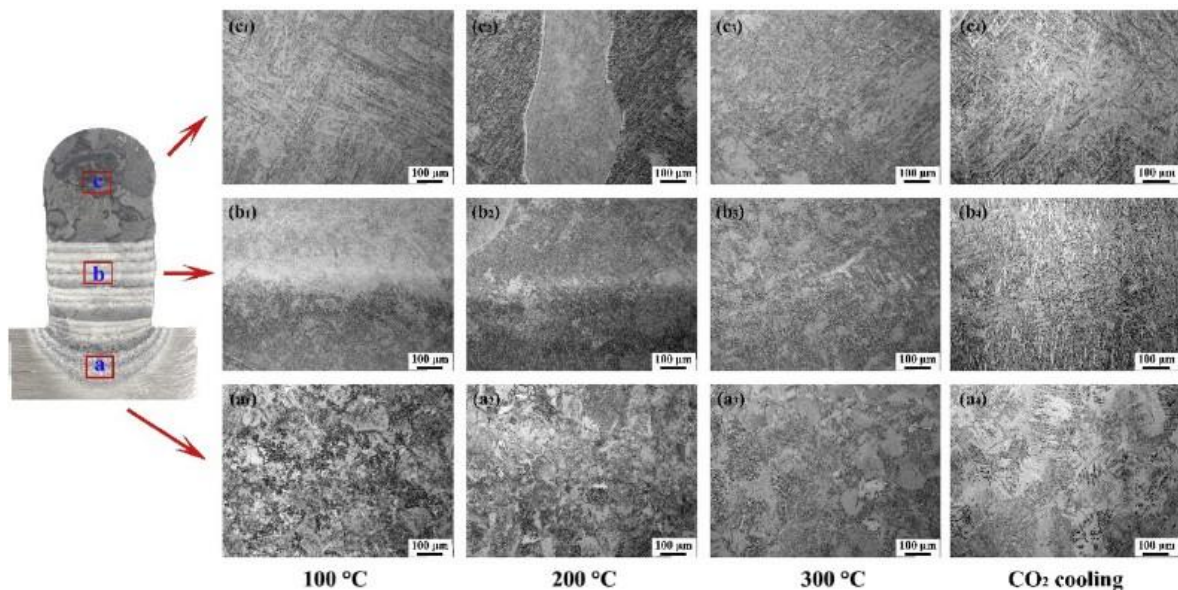


Figura 13 Microestrutura das regiões da parede para diferentes condições (Wu, et al, 2018b)

Quanto ao estudo do processo WAAM para o aço carbono, Al-Nabulsi, *et al.* (2021) realizam a análise das propriedades mecânicas do aço impresso em 3D, utilizando o material de adição Union K40 (equivalente ao ER70S-6) para aplicações estruturais. Uma parede foi depositada e em seguida aferiu-se, através de uma inspeção por tomografia por raio X denominado como XCT (*X-ray Computed Tomography*), as composições internas da estrutura, identificando as regiões interfaciais as camadas depositadas, apresentado na Figura 14(a), e distribuição de poros, na Figura 14(b). Com o método XCT é possível determinar a composição estrutural do material sem necessidade de um ensaio destrutivo. Também é possível determinar possíveis anisotropias pela concentração de poros em uma região ou ainda pela irregularidade das regiões interfaciais.

Com as análises feitas, Al-Nabulsi, *et al.* (2021) comentam que para o processo de deposição, a peça manufaturada obteve uma porcentagem de porosidade de 0,2 % do volume ocupado pela estrutura. O método se mostrou viável para o controle de qualidade das peças manufaturadas, podendo ser associado as propriedades de resistência com o nível de porosidade da peça.

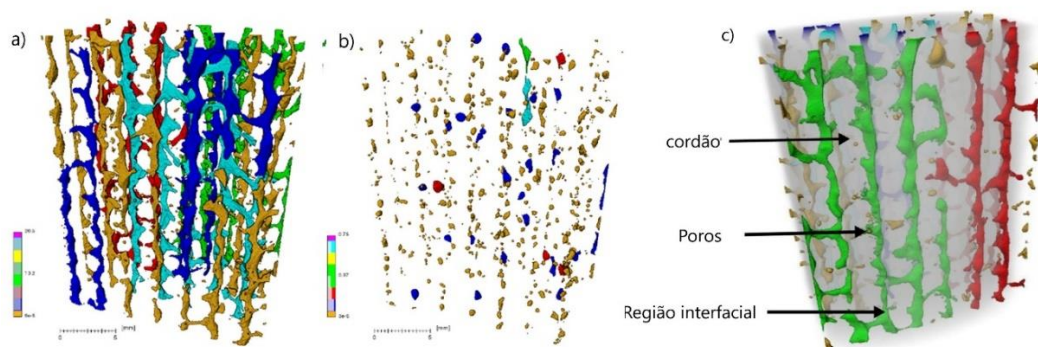


Figura 14 Estrutura da placa obtida por XCT: (a) Regiões interfaciais; (b) Poros e; (c) Estrutura completa. (adaptado de Al-Nabulsi, et al., 2021)

2.3 TECNOLOGIAS DE DEPOSIÇÃO

Quanto às tecnologias empregadas no processo de deposição por arco elétrico, três processos principais são utilizados, sendo o MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) ou GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*), apresentados na Figura 15. Além destas tecnologias convencionais, o emprego de variantes também é bastante explorado na WAAM, como o processo CMT-GMAW (*Cold Metal Transfer*) e os processos híbridos Laser.

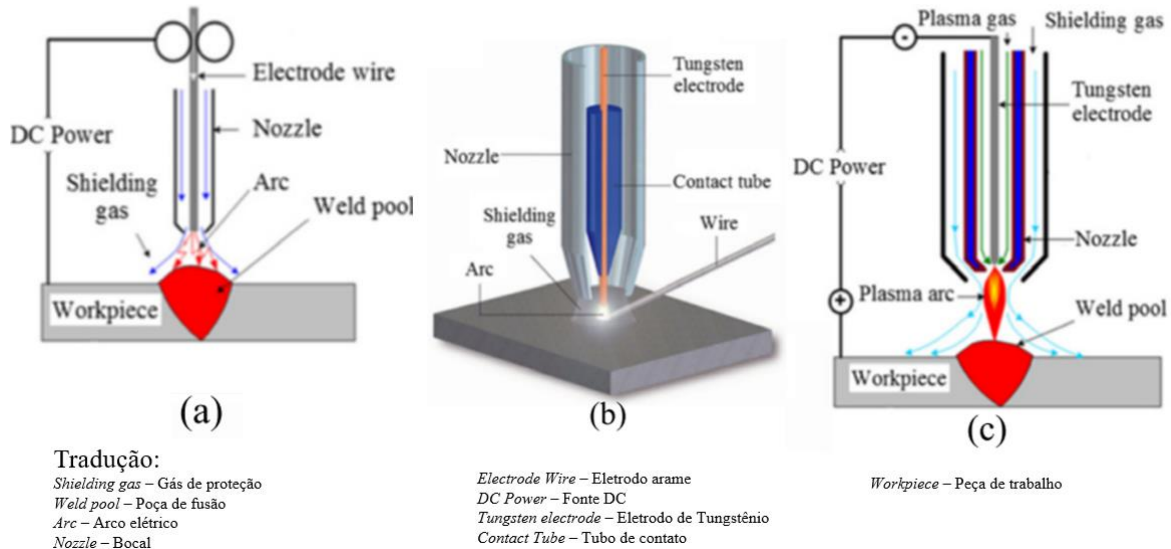


Figura 15 Representação esquemática dos processos (a) GMAW, (b) GTAW e (c) PAW (Adaptado de Li, et al. 2018)

O processo de manufatura aditiva com o método GMAW utiliza um gás de proteção para a região de fechamento do arco elétrico, evitando a oxidação e contaminação da poça de fusão (Planckaert, *et al.*, 2010). Para aplicações desse método, sistemas similares ao mostrado na Figura 16 são utilizados para controle do processo, com a tocha sendo acoplada a um braço robótico. O processo necessita de um alimentador de arame com diâmetros variados e materiais diferentes como alumínio, cobre, titânio, bem como outros metais e suas ligas. A tocha possui um bocal pelo qual há saída do gás de proteção, selecionado de acordo com o material utilizado, podendo ser inerte ou ativo ao meio. Argônio, Hélio são utilizados, podendo ser misturados com oxigênio ou CO₂ em proporções e vazões diferentes para cada aplicação no ambiente de deposição. O controlador do sistema também permite o controle dos parâmetros de tensão e corrente do arco elétrico gerado (Abe, *et al.*, 2020).

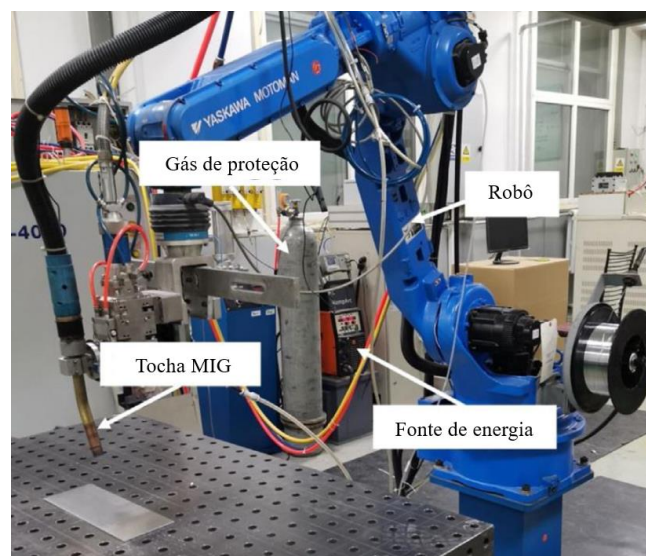


Figura 16 Sistema WAAM utilizando processo GMAW (Adaptado de Li, et al., 2020)

Com a possibilidade de modulação dos parâmetros de soldagem, alguns métodos foram criados para reduzir o aporte térmico durante o processo de deposição. Ziberov (2013) aborda a implementação do processo GMAW duplo pulso (DP-GMAW) em soldagem de raiz com abertura e simples deposição de cordões no aço carbono, também conhecido como GMAW pulsado com pulsação térmica. O processo consiste em dois níveis de pulsação, de alta frequência, para controle da transferência, e o nível de baixa frequência, para o controle da poça de fusão, com ambos os níveis com corrente pulsada. É apresentado um comparativo entre o processo GMAW pulsado (P-GMAW), nas amostras (b) e (c), e o processo DP-GMAW, na amostra (a) da Figura 17, onde se constata duas regiões de superfície, uma estriada e outra lisa, coincidentes respectivamente com os períodos do pulso térmico e base térmica, onde tais conhecimentos são importantes para o controle da poça de fusão, sendo amplamente utilizados na soldagem de ligas de alumínio. Ziberov *et al.*, (2015) patentearam o método de soldagem GMAW automatizado, onde o processo DP-GMAW apresenta maior potencial para controle da poça de fusão comparado com P-GMAW. Os autores não testaram essa técnica na deposição das camadas.

Greebmalai *et al.*, (2020) estudaram a geometria das camadas depositadas pelo processo DP-GMAW utilizando arame de alumínio ER5356 e metal de base 5083. Os autores concluíram que a variação do duplo pulso e frequência não gera efeitos significativos na dimensão das camadas depositadas. Segundo Greebmalai e Warinsiruk (2020), o processo DP-GMAW demonstra redução do aporte térmico durante o processo de construção das paredes de alumínio em relação ao processo GMAW.

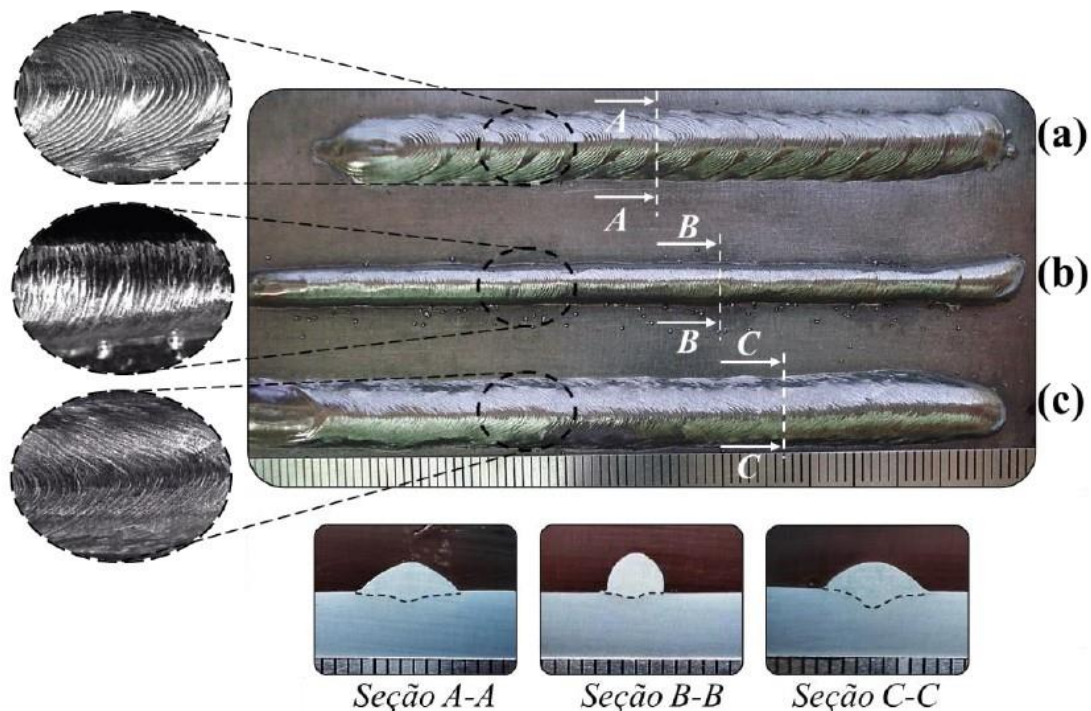


Figura 17 Aspectos superficiais de três cordões feitos pelos diferentes processos: (a) DP-GMAW I = 115 A, (b) P-GMAW I = 70 A e (c) P-GMAW I = 160 A (Ziberov, 2013)

O processo de manufatura aditiva pode utilizar outros métodos de deposição, como o processo GTAW, que utiliza o tungstênio como eletrodo não consumível, posicionado na tocha, com alimentação de material na forma de arame feita por um alimentador na sua lateral, separada da fonte de energia, possibilitando um maior controle na deposição do processo. Um gás de proteção inerte é utilizado, sendo de grande importância, uma vez que o processo TIG é mais sensível a distúrbios e contaminação pelo ambiente. Sistemas similares ao apresentado na Figura 18 são utilizados para automatização do processo, com ajustes de posicionamento e regulagem do ângulo de deposição pelo alimentador de material, com mesa de coordenadas XYZ e o uso de sensores, como no exemplo a utilização de uma câmera, que está conectada a um software para aquisição de dados durante o

processo. O processo GTAW também permite a modulação dos parâmetros de soldagem, com o uso do arco pulsado.

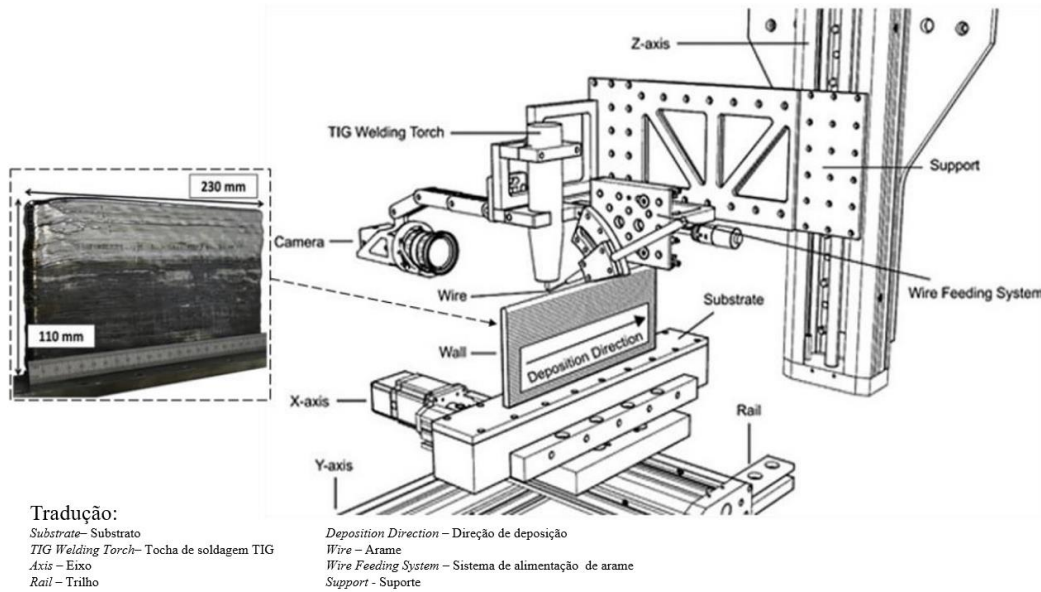


Figura 18 Sistema automatizado para a deposição de material pelo processo GTAW (adaptado de Marinelli, et al., 2019)

Quanto a tecnologia de soldagem a plasma, conhecida como PAW, esta também pode ser implementada na manufatura aditiva como uma alternativa para a deposição de material. A aplicação deste método está relacionada a uma constrição do arco, inclusive caracterizando o processo de manufatura aditiva como CC-WAAM (*Compulsively Constricted-WAAM*). Neste caso o arco do plasma é fechado com a região de deposição através do uso de um bocal de cerâmica, auxiliando no direcionamento do plasma, que reduz o aporte de calor aplicado na região, devido a expansão do plasma na saída do bocal e o resfriamento com o ar antes do contato com o substrato, que aumenta a precisão de deposição (Jia, et al., 2020). O material é adicionado dentro do bocal onde já é formado o plasma com o fechamento do arco elétrico, como apresentado na Figura 19.

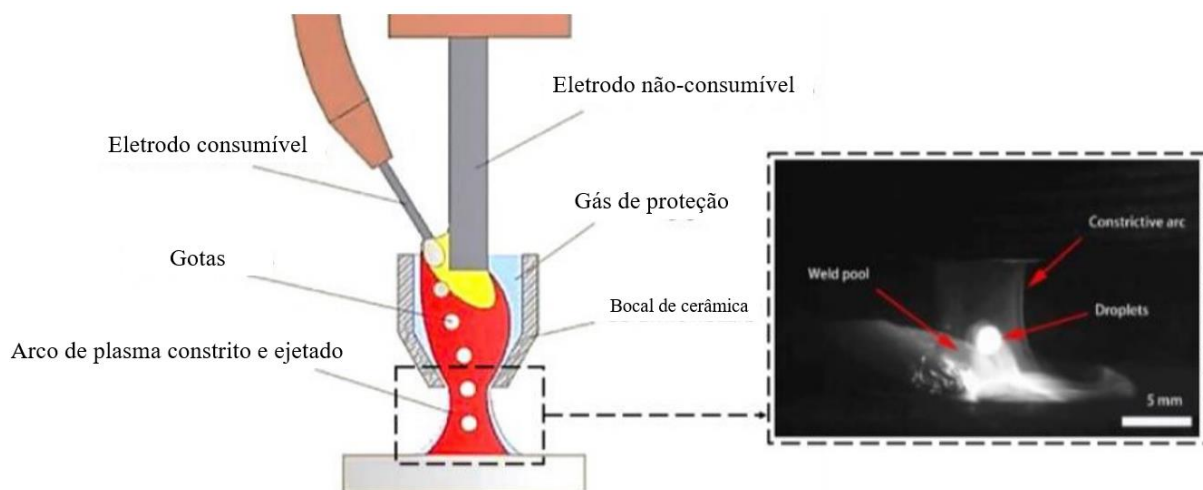


Figura 19 Descrição esquemática do PAW no processo CC-WAAM (adaptado de Liu, et al. 2019)

Quanto à aplicação do PAW, Artaza, et al. (2020) direcionam os estudos para a deposição de Ti-6Al-4V e o efeito do ambiente na qualidade da estrutura gerada pela deposição. Foram analisadas 3 condições diferentes: o processo de deposição realizado no vácuo, com argônio e com ar ambiente, apresentado na Figura 20, juntamente com os dados obtidos em ensaios de dureza, alongamento e ensaios de tração para determinar a resistência em função da direção de deposição (HD sendo a

direção horizontal e VD a direção vertical). Com os resultados obtidos, constatou-se que não houve grande influência dos ambientes nas propriedades mecânicas do material, sem a presença de defeitos significantes e apenas com oxidações superficiais nas amostras de argônio e ar. Isso indica uma estabilidade do processo PAW, sem grande necessidade de controle do ambiente para garantia da qualidade da peça.



Material	Ultimate tensile stress (MPa)		Yield stress (MPa)		Elongation (%)		Hardness [HV10] Middle Section
	HD	VD	HD	VD	HD	VD	
Ti6Al4V Air	986 ± 13	940 ± 11	915 ± 12	875 ± 14	12 ± 2	10 ± 3	327 ± 4
Ti6Al4V Vacuum	972 ± 14	946 ± 15	905 ± 12	890 ± 14	10 ± 2	12 ± 3	328 ± 3
Ti6Al4V Argon	993 ± 15	920 ± 12	925 ± 15	856 ± 16	11 ± 2	17 ± 4	324 ± 4
Ti6Al4V Annealing	1001 ± 13	952 ± 18	943 ± 11	891 ± 6	12 ± 2	15 ± 3	332 ± 6
Ti6Al4V (AMS4928)	>931		>862		>10		

Tradução:

Ultimate tensile stress – Limite de resistência a tração

Yield Stress - Tensão de escoamento

Elongation – Alongamento

Hardness Middle Section – Dureza no meio da seção

Air - Ar

Argon – Argônio

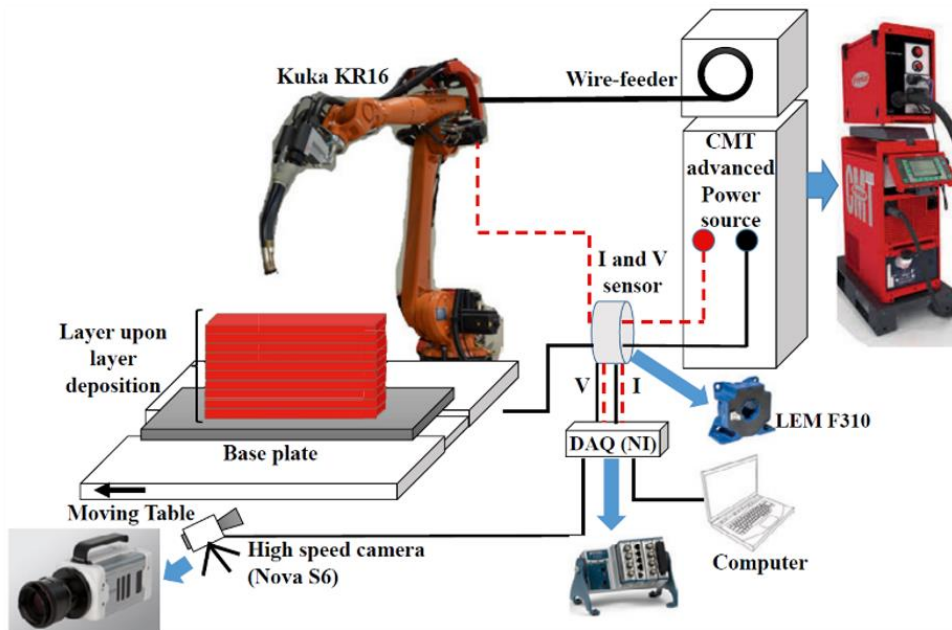
Vacuum – Vácuo

Figura 20 Amostras produzidas em diferentes ambientes e dados das propriedades mecânicas das amostras e do material como construído (Adaptado de Artaza, et al. 2020)

Além dos procedimentos principais, a variante CMT-GMAW é uma alternativa de implementação muito explorada. O processo foi desenvolvido pela FRONIUS *International GmbH* e permite um maior controle na deposição de material, com uma menor necessidade de aporte de calor e redução da corrente durante o curto-circuito gerado no contato do material com a poça de fusão (Cadiou, *et al.*, 2020). Lehmann *et al.* (2020) também enfatizam a estabilidade do arco elétrico e uma deposição de material contínua como vantagens do processo.

Um sistema CMT-GMAW foi utilizado por Shukla, *et al.* (2020), com a composição de equipamentos e sensores encontrado na Figura 21. Os equipamentos consistem em uma fonte de soldagem, um alimentador de arame e um sistema de movimentação automatizado (base em movimento e um braço robótico), permitindo a composição por outros sistemas. O sistema ainda possui componentes de monitoramento dos parâmetros de soldagem e um controlador para estabelecer os comandos do processo, além de câmeras para registro do processo de deposição.

Um exemplo de aplicação do processo CMT-GMAW foi estudado por Zhang, *et al.*, (2019), em que se utilizou um arame de cromo-manganês com altas concentrações de nitrogênio para deposição de duas peças. Uma peça permaneceu com a estrutura “*as built*” (da maneira que foi depositado o material), enquanto a outra foi dividida em duas partes e submetidas a tratamentos térmicos. Os resultados mostraram uma melhoria na resistência mecânica e redução da anisotropia para a amostra submetida ao tratamento térmico de curto prazo (1050°C por 5 min) em relação à amostra sem tratamento. Já a amostra submetida ao tratamento térmico de longo prazo (1100°C por 30 min) apresentou efeitos deletérios devido a inclusões de Nitreto de Cromo (Cr₂N), comprometendo a estrutura granular e reduzindo os valores de resistência ao escoamento e ruptura. Concluiu-se assim que o tratamento térmico possui grande influência para as características da peça, porém quando muito expositivo ao calor, pode gerar defeitos devido ao alto stress térmico.



Tradução:

Base plate – Placa base
 Moving Table – Mesa em deslocamento
 Layer upon layer deposition – Deposição camada por camada
 Wire-feeder – Alimentador de arame

Computer – Computador
 CMT Advanced Power Source – Fonte de energia avançada CMT
 High speed camera – Câmera de alta velocidade

Figura 21 Exemplo esquemático do sistema de deposição CMT-GMAW (adaptado de Shukla, et al. 2020)

Processos híbridos de deposição de material também podem ser utilizados, como por exemplo a deposição Laser-CMT utilizado no trabalho de Pardal *et al.* (2019). O processo consiste na deposição de material pelo processo CMT e todo o equipamento GMAW necessário, complementado com uma fonte de laser de fibra com onda contínua da IPG *photonics Corporation*, denominado *Continuous Wave IPG fibre Laser (CW-IPG)*. A finalidade do uso do laser é estabilizar a deposição de Ti-6Al-4V em busca de melhorias nos aspectos geométricos das camadas. Essa estabilização ocorre devido à energia concentrada do laser na região do arco aumentar o campo de temperatura, principalmente no centro da poça de fusão, concentrando cátodos na região e diminuindo as oscilações laterais do arco. Além do Laser-CMT, os autores utilizaram o CMT-GMAW para comparação entre o processo convencional e híbrido. A Figura 22 demonstra o processo utilizado no trabalho, com o laser com um foco de feixe na faixa de 5 mm de diâmetro, concêntrico e alinhado com o centro do arco de deposição. Constatou-se no trabalho que a taxa de deposição aumentou em 27% quando o Laser-CMT foi utilizado, elevando a eficiência do processo de deposição de 48% para 82%, devido ao acréscimo de calor do laser permitir maior taxa de fusão de material.

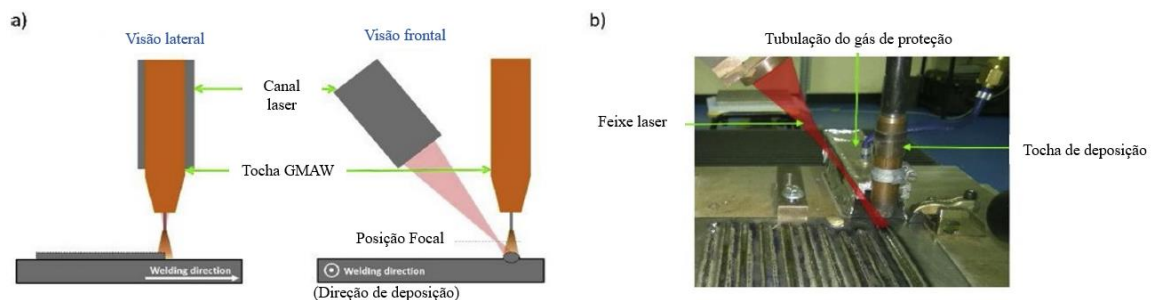


Figura 22 (a) Representação esquemática Laser-CMT; (b) Foto do experimento realizado. (Adaptado de Pardal, et al. 2019)

Outra abordagem do processo híbrido Laser-CMT é mostrada no trabalho de Gong *et al.* (2020), onde os autores estudaram a manufatura aditiva do arame de aço inoxidável ER316L de 1 mm de diâmetro por meio do processo de deposição Laser-CMT, utilizando uma máquina Fronius TPS4000 e o laser de fibra através do equipamento IPG YLS-6000, sendo guiada por um braço robótico industrial. O objetivo do trabalho foi estudar a influência do laser em um método de oscilação de alta

potência no processo de manufatura aditiva, analisando a precisão superficial atingida, as características microestruturais resultantes do processo e as propriedades mecânicas das amostras depositadas em comparação aos processos de feixe laser constante e o processo CMT individualmente (CMT-WAAM) na manufatura aditiva.

Nos resultados do trabalho de Gong *et al.* (2020), os valores dimensionais de contorno da superfície da parede depositada pelo processo de MA com feixe laser oscilatório flutuaram na faixa de $-280\ \mu\text{m}$ e $+170\ \mu\text{m}$, obtendo uma flutuação dos valores de contorno menor em comparação com o processo com feixe laser contínuo ($-960\ \mu\text{m}$ e $+270\ \mu\text{m}$) e o CMT-WAAM ($-2440\ \mu\text{m}$ e $170\ \mu\text{m}$), mostrando que o feixe oscilatório possui uma precisão maior. A análise das microestruturas na deposição do aço inoxidável ER316L constatou as fases Gama, com grãos mais refinados, e delta, com uma configuração granular mais grosseira, presentes na composição do material. Identificando as características e concentração destas para cada processo analisado, constatou-se que o processo com feixe laser oscilatório apresenta uma estrutura granular da fase delta de 3,4%, sendo um indicador que o refinamento maior ocorre neste processo. No CMT-WAAM e no feixe laser contínuo as concentrações dessa fase são de, respectivamente, 6,8% e 8,6%. Na análise das propriedades mecânicas, os processos a laser, contínuo e oscilatório, tiveram um aumento no limite de resistência a tração (LRT), com valores entre 570 e 580 MPa, comparado ao processo CMT-WAAM, que obteve um valor de LRT em 536 MPa. No processo com feixe laser contínuo, a tensão de escoamento obtida foi de 330 MPa com os corpos de prova horizontais e 347 MPa com os corpos de prova verticais. O processo CMT-WAAM obteve um limite de escoamento de 299 MPa (horizontal) e 321 MPa (vertical). Por último, o processo CMT-WAAM com laser oscilatório obteve um limite de escoamento de 344 MPa (horizontal) e 348 MPa (vertical). Tais análises mostraram que o processo de WAAM híbrido com feixe laser oscilatório beneficia a redução da anisotropia do material, melhorando assim, as propriedades mecânicas e de resistência e mantendo a taxa de deformação em 30%.

2.4 PARÂMETROS DO PROCESSO

Para controle do processo WAAM, o monitoramento e a determinação de alguns parâmetros devem ser realizados, buscando otimizá-los para obter a melhor qualidade do cordão depositado. As escolhas variam de acordo com a tecnologia, material e quantidade depositada. De acordo com Wu, *et al.* (2018a), Alberti, *et al.* (2014) e Jafari, *et al.* (2021), os principais parâmetros que devem ser determinados, independente da tecnologia utilizada durante um processo, são:

- Ângulo da tocha;
- Direção de deposição;
- Taxa de deposição de material;
- Distância tocha e peça;
- Parâmetros de deposição (diâmetro do arame, tensão e corrente elétrica, vazão de gás de proteção);
 - Resfriamento da peça.

Quanto ao posicionamento da tocha para a deposição de material, dois ângulos são levados em conta, sendo o ângulo de trabalho, representado por α , entre a direção perpendicular percorrida pela tocha e a normal do plano de trabalho, e o ângulo de deslocamento, representado por β , entre a direção de deslocamento da tocha e a normal do plano de trabalho. O ângulo β determina a deposição do cordão ser feita puxando ou empurrando. Uma deposição puxando ocasiona um cordão mais estreito com uma maior penetração, enquanto o processo empurrando define um cordão mais largo com uma menor penetração (Scotti e Ponomarev, 2008). Os ângulos citados estão representados na Figura 23.

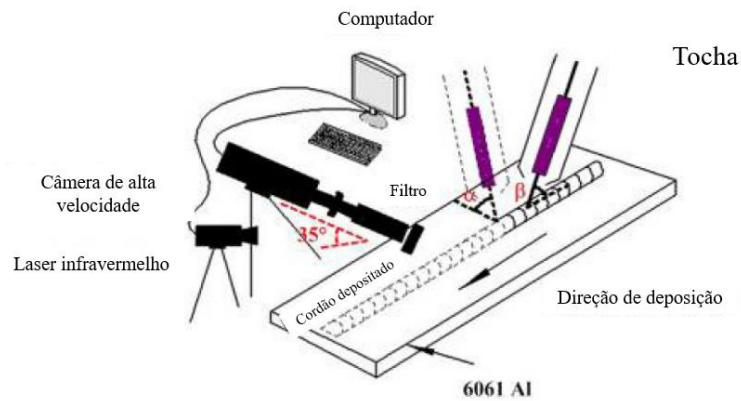


Figura 23 Representação dos ângulos de trabalho α e de deslocamento β (Adaptado de Su e Chen, 2019)

Su e Chen (2019) também realizaram uma comparação entre cordões gerados utilizando diferentes configurações de α e β , presente na Figura 24, permitindo a visualização da influência no fluxo de material, difusão de calor e morfologia do cordão. Tais análises contribuem para otimização do processo de deposição, pois auxiliam a estabilidade e controle do fluxo da poça de fusão, resultando em uma morfologia mais uniforme da camada depositada. O autor menciona que para os ângulos α e $\beta = 90^\circ$, o cordão depositado apresentou uma alta porosidade, devido a intensidade do arco elétrico e uma baixa componente para a força de buoyancy, componente muito atuante para o fluxo de material no interior da poça de fusão. Os baixos valores da força de buoyancy geram uma diminuição da velocidade de saída de gás da região, propiciando uma maior formação de poros de gás. Em contrapartida, tais ângulos também contribuem para a redução de irregularidades na poça de fusão, reduzindo defeitos de deformação com a minimização da flutuação.

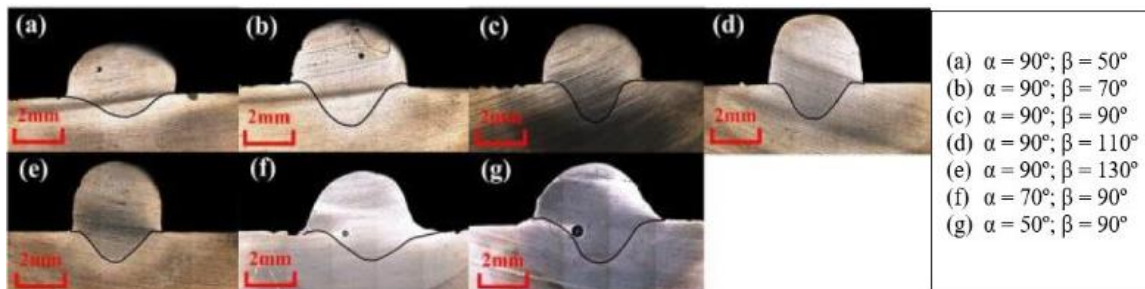


Figura 24 Seção transversal dos cordões para diferentes configurações de ângulo da tocha (adaptado de Su e Chen, 2019)

Alberti, *et al.* (2014) mencionam que a escolha da direção de deposição afeta na distribuição de calor durante o processo, avaliando as direções ilustradas na Figura 25 durante a deposição de uma peça. De acordo com o autor, a trajetória influencia a estrutura solidificada, o gradiente térmico e as tensões residuais geradas pelo processo de solidificação. Os autores enfatizam que a estrutura gerada pela deposição unidirecional, na Figura 25(a), tende a ser mais homogênea, com uma direção de solidificação constante em todas as camadas. Com o uso da trajetória bidirecional, mostrado na Figura 25 (b), o fluxo de calor ocasiona uma interrupção no crescimento das estruturas dendríticas, além de reduzir as tensões residuais ao longo do cordão devido ao gradiente térmico.

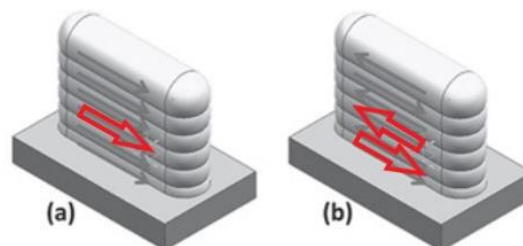


Figura 25 Direção de deposição (a) unidirecional; (b) Bidirecional para a deposição linear de uma parede (adaptado de Alberti, et al, 2014)

A taxa de deposição de material possui grande influência na qualidade do cordão, por envolver mudanças no aporte térmico da peça, velocidade de alimentação de arame e o deslocamento da tocha. Tecnologias de deposição limitam esse parâmetro devido às diferentes formas de transferência envolvidas, como globular, spray e goticular (Scotti e Ponomarev, 2008), e ainda a modulação dos parâmetros de soldagem (Li, *et al.*, 2020). A Tabela 1 apresenta os valores típicos de deposição para os processos GMAW e a variante CMT, GTAW e PAW.

Tecnologia de deposição	Taxa de deposição típica (kg/h)
GMAW convencional	3-4
CMT-GMAW	2-3
GTAW	1-2
PAW	2-4

Tabela 1 Taxa de deposição para as tecnologias de deposição (adaptado de Wu, *et al.*, 2018a)

Alberti, *et al.* (2014) também comentam sobre a influência da distância entre a tocha e a peça na quantidade de calor fornecido para o material em processos WAAM. A área afetada pela temperatura e a quantidade de material depositado são fatores dependentes desse parâmetro e que afetam também a geometria e o gradiente térmico submetido pelo cordão.

Quanto aos parâmetros de soldagem, Li, *et al.* (2020) realizam uma análise da morfologia de cordões compostos pela liga de alumínio Al6.2Zn-2.2Mg, depositados pelo processo GMAW com arame de 1,2 mm, em diferentes configurações de tensão, corrente e velocidade de deslocamento da tocha, com as amostras registradas na Figura 26. O gás argônio com 99,99% de pureza foi utilizado, dada a compatibilidade com o material.

Welding direction →		Weld bead macromorphology				Parameter combination	V (cm/min)	I (A)	U (V)	Heat input (J/cm)
		10 mm								
1	2	3	4	5	6	1	20	97	16.2	4243
7	8	9	10	11	12	2	20	102	16.6	4572
13	14	15	16	17	18	3	20	107	17	4911
19	20	21	22	23	24	4	20	112	17.4	5262
25	26	27	28	29	30	5	25	97	17.3	3625
31	32	33	34	35	36	6	25	102	17	3745
37	38	39	40	41	42	7	25	107	16.5	3813
43	44	45	46	47	48	8	25	112	16.1	3895
49	50	51	52	53	54	9	30	97	16.6	2898
55	56	57	58	59	60	10	30	102	16.1	2956
61	62	63	64	65	66	11	30	107	17.4	3351
67	68	69	70	71	72	12	30	112	16.9	3407
73	74	75	76	77	78	13	35	97	16.9	2529
79	80	81	82	83	84	14	35	102	17.3	2723
85	86	87	88	89	90	15	35	107	16.2	2674
91	92	93	94	95	96	16	35	112	16.6	2868

Tradução:

Welding Direction – Direção de deposição

Weld Bead Macromorphology – Macromorfologia dos cordões de solda

Parameter Combination – Combinação de parâmetros

Heat Input – Aporte de calor

Figura 26 Morfologia dos cordões depositados para diferentes configurações dos parâmetros de deposição (adaptado de Li, *et al.*, 2020)

Além da morfologia apresentada na Figura 26, a seção transversal do cordão foi analisada para determinar a penetração de material no substrato para as mesmas amostras, com as imagens registradas na Figura 27.

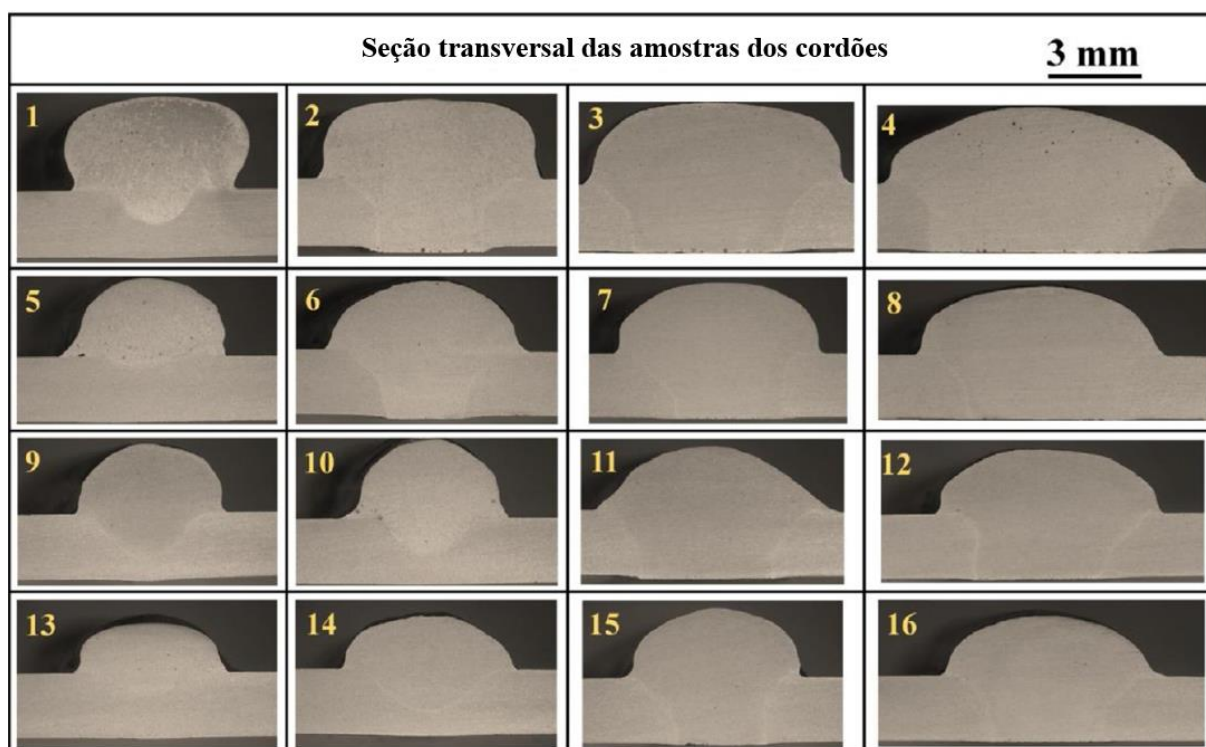


Figura 27 Seção transversal dos cordões depositados (Adaptado de Li, et al., 2020)

Na análise dos dados obtidos, a Figura 26 de Li, *et al.* (2020) apresentou que as amostras 4, 8, 12 e 16, submetidas a uma corrente de 112 A, possuem uma largura maior do cordão e maior penetração do material no substrato. As amostras 1, 5, 9 e 13, que utilizaram uma corrente de 97 A, a penetração e a largura dos cordões são bem menores, possuindo uma qualidade superficial inferior, devido a maior instabilidade do arco elétrico por conta da baixa corrente. Na Figura 27, os autores mostraram que, com o aumento da velocidade de deslocamento da tocha V (valores presentes na Figura 25), as amostras 13, 14, 15 e 16 (submetidas a uma velocidade de 35 cm/min) apresentam uma raiz do cordão mais fina e com menor penetração, em consequência ao baixo aporte térmico no substrato. As amostras 2,3 e 4, submetidas a uma velocidade de 20 cm/min, apresentaram uma raiz mais espessa, devido à maior concentração de calor na região de deposição.

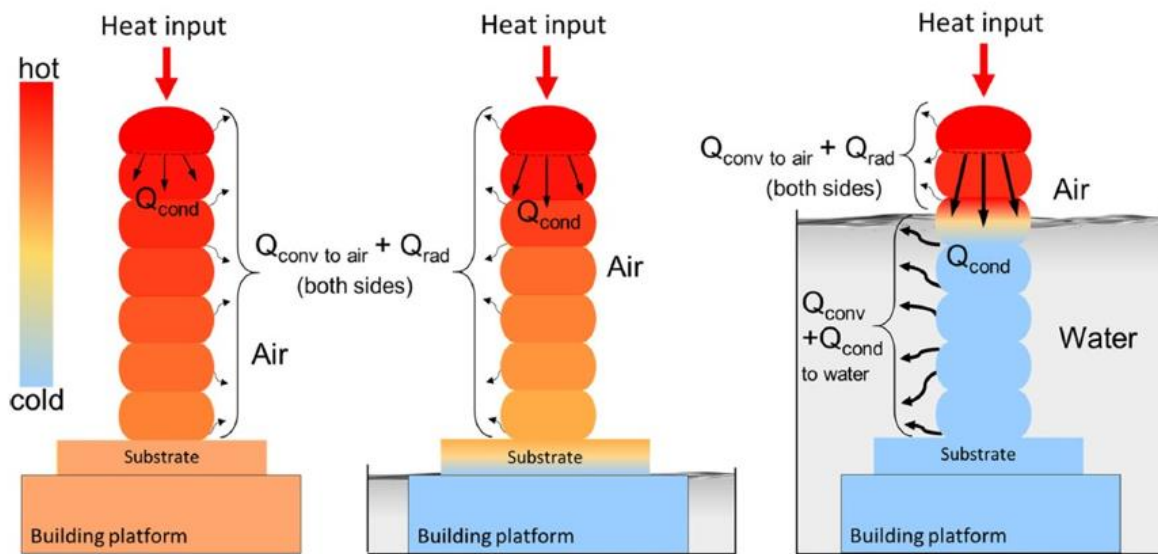
Por último, o controle da taxa de resfriamento do material é de grande importância para a obtenção da estrutura desejada e ainda na homogeneidade do componente manufaturado. Para isso, diversos métodos são utilizados para um resfriamento forçado da peça, aumentando a produtividade do processo, uma vez que não é necessário o tempo de resfriamento por convecção natural.

Hackenhaar, *et al.* (2020) propuseram um método de resfriamento ativo utilizando jateamento de ar para controle da temperatura de interpasso das camadas depositadas. Os autores determinam a efetividade do processo através de ensaios e simulações (apresentado na seção 2.6).

Outra técnica desenvolvida para resfriamento ativo durante a deposição por arco elétrico é apresentada por Da Silva, *et al.* (2020), utilizando uma cuba de água com sistema de circulação e controle de nível para manutenção da temperatura em camadas já depositadas inferiormente. Esse método, denominado NIAC (*near-immersion active cooling*), contribui com a redução do estresse térmico submetido pelo material, com a temperatura do substrato de 350°C com o resfriamento natural para abaixo de 50°C com o uso do NIAC. Com isso, é obtido uma maior homogeneidade da composição microestrutural das camadas, uma vez que evita o reaquecimento do material.

A Figura 28 apresenta um esquema representativo do NIAC, com a representação dos gradientes de temperatura do processo, com o resfriamento do substrato e da peça em comparação com o resfriamento natural. Da Silva, *et al.* (2020) concluíram com o trabalho que a parede depositada apresentou uma espessura e formato constante com o uso do método de resfriamento, mostrando uma maior homogeneidade da geometria dos cordões depositados, e assim gerando uma peça com maior qualidade superficial, apresentado na Figura 29 pelo uso do NIAC por Reis, *et al.* (2020).

O trabalho de Da Silva, *et al.* (2020) Obteve uma redução da anisotropia da peça, mostrado através de ensaios de resistência à tração em corpos de prova usinados em diferentes direções. O uso da água no resfriamento não acarretou nenhum defeito para a peça quando os parâmetros certos de deposição foram utilizados, não induzindo a formação de porosidade pela presença de hidrogênio.



Tradução:

Heat Input – aporte de calor
Building plataforma – Plataforma de construção
Substrate – Substrato
Q_{conv} – Troca de calor por convecção
Q_{rad} – Troca de calor por radiação
Q_{cond} – Troca de calor por condução

Water – Água
Air – Ar
Hot / Cold – Quente / Frio
Both sides – Ambos os lados

Figura 28 Metodologia NIAC utilizada para resfriamento ativo do processo de deposição WAAM. (Da Silva, et al., 2020)

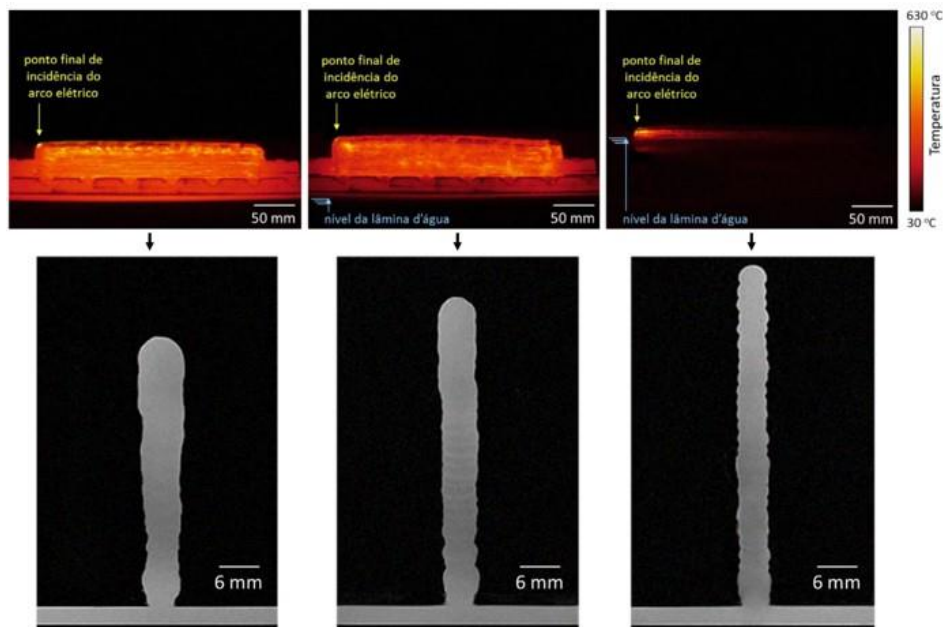


Figura 29 Influência do método NIAC para a geometria dos cordões depositados em uma parede (adaptado de Reis, et al., 2020)

2.5 DESCONTINUIDADES E DEFEITOS

O processo de deposição por arco elétrico está suscetível a diversos defeitos e/ou descontinuidades, caso as condições de ambiente e os parâmetros não sejam devidamente escolhidos de acordo com a tecnologia e o material de deposição. Visando reduzir esses defeitos e aumentar o padrão de qualidade das peças confeccionadas, o estudo desses defeitos é um foco grande em diversos trabalhos no meio acadêmico.

2.5.1 Porosidade

A porosidade excessiva pode ser causada por valores inapropriados de tensão e corrente, uma vez que Traidia, *et al.* (2011) mencionam que a formação de poros de gás na estrutura possui uma forte associação com a poça de fusão, controlada pela frequência de pulsação e corrente do arco. Um material que possui uma porosidade excessiva consequentemente apresentará valores de resistência mecânica inferiores.

Wang, *et al.* (2018) apresentam um estudo para a redução da porosidade e refinamento dos grãos da liga de alumínio Al-5Si através do ajuste da frequência de pulsação do arco elétrico e da corrente. Na aferição dos dados de porosidade, para as frequências de 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 50 Hz, 200 Hz e 500 Hz, foi determinada a distribuição de poros de gás encontrados na amostra, presente na Figura 30. Com os dados gerados, é possível determinar que a pulsação a 50 Hz foi a opção com menor presença de poros. Os autores comentam que a formação dos poros de gás no processo de manufatura pode ser descrito em 4 etapas, sendo nucleação, crescimento, descolamento e escape. O crescimento dos poros depende do aumento da intensidade do arco, que aumentará a pressão exercida nos poros preenchidos de gás. No descolamento, o ângulo de infiltração determina o desprendimento total ou não dos poros de gás, e o escape possui grande influência quanto ao fluxo e a densidade do poro (Wang, *et al.*, 2018).

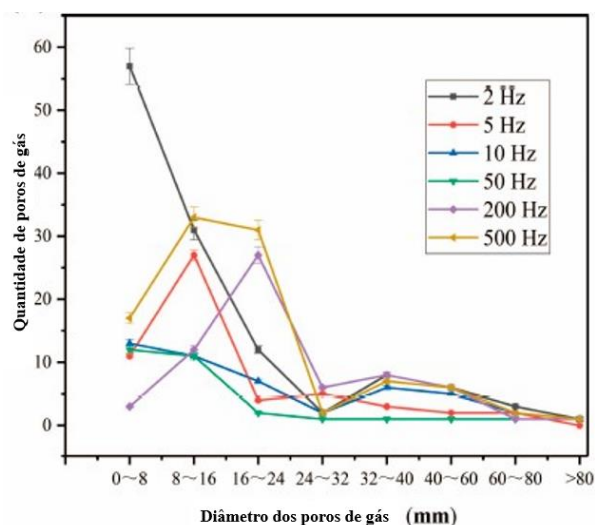


Figura 30 Distribuição dos poros na estrutura em diferentes tamanhos. (Adaptado de Wang, et al., 2018)

2.5.2 Deformações e problemas de acabamento superficial

Deformações e problemas no acabamento superficial da peça manufaturada podem ser ocasionados pela falta de precisão, instabilidade do arco e/ou uso inadequado da tecnologia no processo de deposição. Um exemplo de ocorrência encontra-se na Figura 26 onde o uso de parâmetros fora da faixa de otimização acarreta uma deposição heterogênea e instabilidade da poça de fusão. Nesses casos, é necessário um maior trabalho de pós-processamento, encarecendo a fabricação do produto.

Como exemplos da presença do defeito, Liu, *et al.* (2019) apresentam os ensaios realizados em amostras depositadas por PAW através do CC-WAAM, variando a velocidade de deslocamento da tocha, com as amostras presentes na Figura 31(a), e vazão de gás de proteção com o argônio 99,99%, na Figura 31(b). É possível visualizar uma queda da qualidade do cordão tanto para velocidades acima

de 75 cm/min quanto para vazão de gás de 15 l/min. Pela Figura 31(a), é possível visualizar que o aumento da velocidade de deslocamento da tocha gerou camadas mais finas, devido ao menor calor concentrado na região de deposição. Todas as camadas mantiveram uma boa linearidade, com exceção da amostra 7, com o deslocamento em 95 cm/min. A alta velocidade não permitiu o tempo suficiente de exposição do plasma no aquecimento da poça de fusão, causando um processo de solidificação precoce e instável. A Figura 31(b) apresentou uma boa qualidade de cordão para a amostra 3, com vazão de gás 12 l/min. A amostra 1, com vazão de 6 l/min, segundo os autores apresentou uma oxidação forte devido à baixa vazão de gás e, conseqüentemente, maior exposição ao ambiente. A amostra 4, com a vazão de 15 l/min, apresentou problemas na morfologia do cordão causadas pela alta turbulência gerada no bocal da tocha com o fluxo de gás, prejudicando a transferência de material. (Liu, *et al.*, 2019)

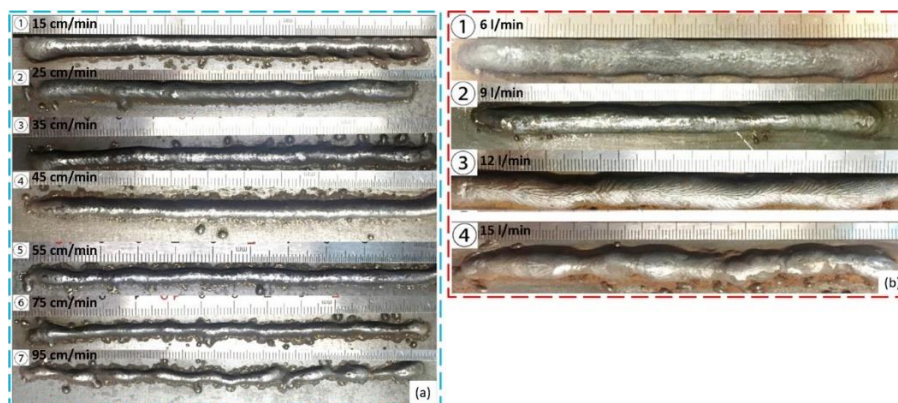


Figura 31 Análise da morfologia do cordão depositado para: a) Diferentes velocidades de deslocamento da tocha; b) Diferentes vazões de gás de proteção. (adaptado de Liu, et al. 2019)

2.5.3 Trincas

Devido aos altos ciclos térmicos que podem envolver a deposição por arco elétrico, o processo de solidificação do material se encontra sujeito a obstruções do fluxo dos grãos solidificados e, juntamente com a deformação na região da poça de fusão, acarretam a geração de trincas na estrutura. O defeito ocasiona efeitos de anisotropia e/ou fragilização da estrutura e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas do material. (Wu, *et al.*, 2018a)

Seow, *et al.* (2020) abordam os efeitos das trincas e o comportamento desses defeitos para a fratura no processo WAAM para a liga de Níquel Inconel 718. Uma parede foi depositada através do uso de um sistema PAW, com um caminho de deposição unidirecional oscilatório, apresentado na Figura 32. A otimização de parâmetros não foi o objetivo deste trabalho, focando os estudos apenas na identificação das trincas e usinagem dos corpos de prova para os ensaios mecânicos de tenacidade à fratura, na região mostrada na Figura 32(b).

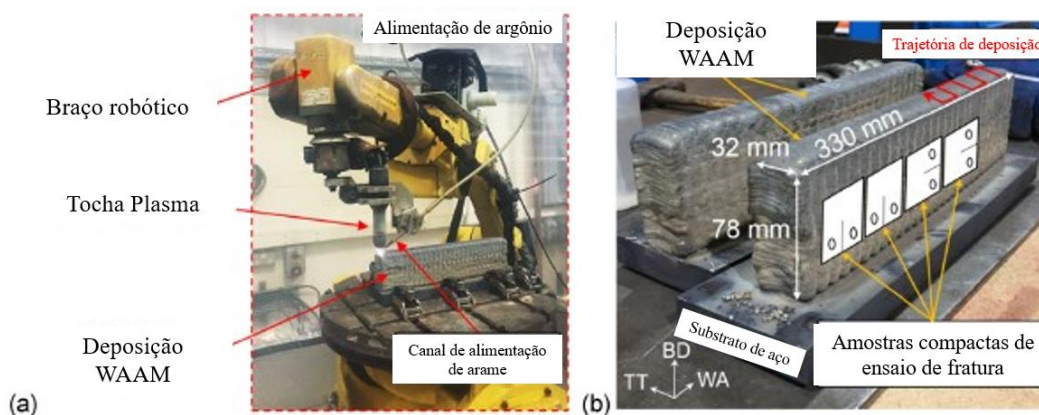


Figura 32 (a) Sistema utilizado para a deposição; (b) Paredes depositadas pela trajetória oscilatória da tocha e representação das regiões retiradas para confecção dos corpos de prova. (Adaptado de Seow, et al. 2020)

Por se tratar de defeitos que, em diversas vezes, são de difícil visualização, Seow, et al. 2020 utilizaram um método de inspeção através da aplicação de líquido penetrante fluorescente nas superfícies da parede depositada, sendo limpos posteriormente em um banho ultrassônico de acetona. A Figura 33 apresenta as imagens obtidas no teste realizado na vista superior (a) e lateral (b) da parede.

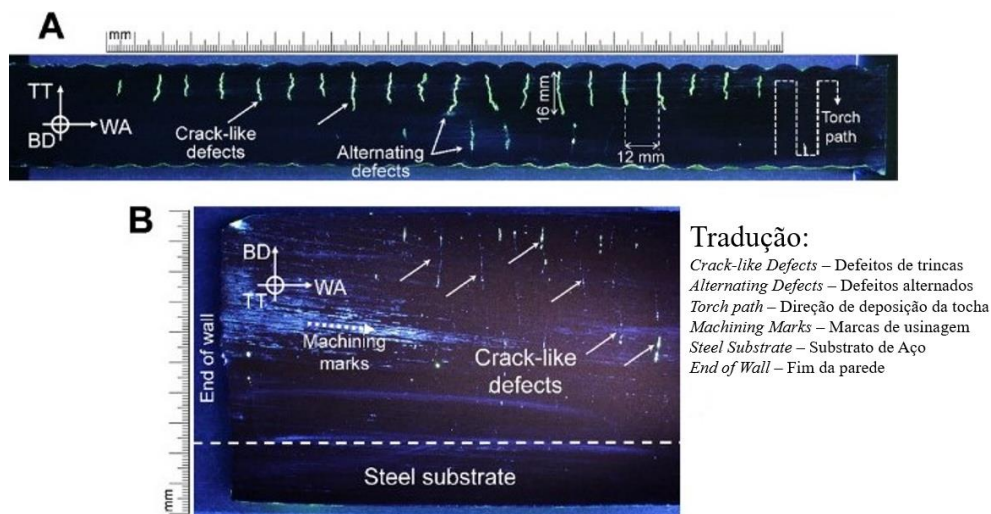
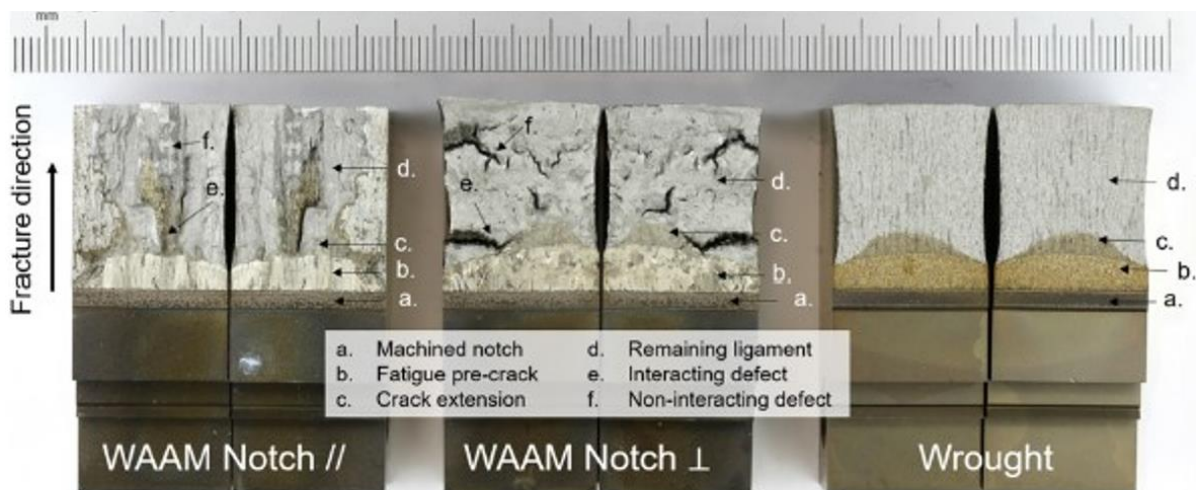


Figura 33 Imagens obtidas no teste de detecção de trincas com revelador fluorescente na: (a) seção superior; (b) lateral da parede depositada. (Adaptado de Seow, et al. 2020)

No ensaio de revelação das trincas feito por Seow, *et al.* (2020), é possível constatar que as trincas estão atribuídas ao processo de oscilação da tocha na Figura 33(a), com os defeitos posicionados alternadamente devidos ao movimento de retorno da tocha, que aumenta o tempo de exposição ao calor, intensificando os efeitos de deformação nas regiões próximas à poça de fusão criada na região.

Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados por Seow, *et al.* (2020), com um corpo de prova usinado na direção paralela e outro perpendicular à direção de deposição, presentes respectivamente na Figura 34. Juntamente aos dois corpos de prova citados, um corpo de prova padrão foi usinado e ensaiado para comparação das amostras. Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados de acordo com a norma ASTM E647-99.



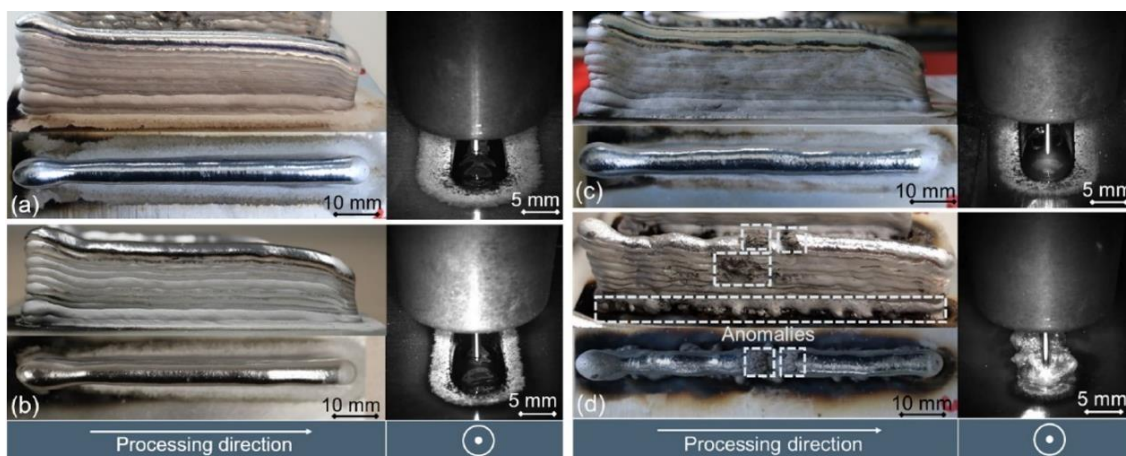
Tradução:
Fracture Direction – Direção de fratura
Machined Notch – Entalhe usinado
Fatigue pre-crack – Pré-trinca de fadiga
Crack extension – Extensão da trinca
Remaining Ligament – Ligamento remanescente
Interacting defect – Defeito interativo
Wrought - Forjado

Figura 34 Superfícies da fratura dos corpos de prova obtidos pelo processo WAAM (paralelo e perpendicular à direção de deposição) em comparação com o padrão (Adaptado de Seow, et al. 2020).

Quanto aos ensaios dos corpos de prova da Figura 34, Seow, *et al.* (2020) enfatizaram que a amostra usinada paralela a direção de deposição apresentou uma menor tenacidade à fratura, com uma taxa de liberação de energia potencial de aproximadamente 179 KJ/m². A amostra usinada perpendicular ao trajeto de deposição apresentou aproximadamente 339 KJ/m² e o corpo de prova padrão obteve cerca de 307 KJ/m². A primeira amostra citada obteve uma tenacidade menor devido as trincas geradas durante o processo de deposição serem paralelas a direção de propagação da trinca no ensaio, fragilizando o componente. Já a peça perpendicular apresentou um valor maior que o espécime padrão, onde os defeitos de trincas retardam a propagação da trinca durante o ensaio similarmente aos efeitos dos entalhes. Essa disparidade de valores entre as duas amostras confirma uma forte anisotropia presente no material depositado.

2.5.4 Oxidação

A exposição à um ambiente muito rico em oxigênio durante o processo de deposição de material pode ocasionar problemas de oxidação, fragilizando a estrutura do cordão depositado, devido aos óxidos gerados atuarem como impurezas na poça de fusão e contribuírem em outros defeitos como trincas e poros de gás. Hauser, *et al.* (2021) realizaram uma análise quanto aos efeitos de oxidação em superfícies e a geração de anomalias, para peças de alumínio AW4043 no processo WAAM. O objetivo foi estudar potenciais métodos de controle para esses efeitos e aumentar a compreensão do processo na manufatura aditiva. Para o estudo, foram manufaturadas 4 paredes de material utilizando o processo CMT, com a variação decrescente de fluxo de argônio, gás de proteção utilizado, na faixa de 10 l/min a 4 l/min (Figura 35). Pelos resultados, é possível visualizar as zonas mais afetadas, com a concentração de óxidos para a vazão menor de gás nas Figura 35(c, d), pela maior exposição ao ambiente. As amostras presentes nas Figura 35(a, b) não apresentam regiões de oxidação, com melhor acabamento superficial dos cordões depositados.



Tradução:

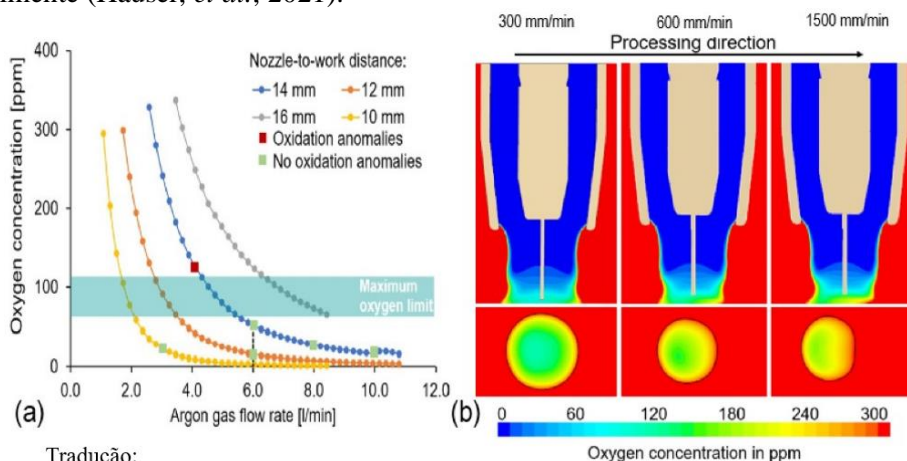
Processing Direction - Direção de processamento/deposição

Anomalias - Anomalias

Figura 35 Resultados das paredes depositadas e as imagens da deposição da primeira camada com as vazões de argônio em: (a) 10 l/min; (b) 8 l/min; (c) 6 l/min; (d) 4 l/min. (Adaptado de Hauser, *et al.*, 2021)

Além da variação do fluxo de gás, outras duas análises foram realizadas por Hauser, *et al.* (2021), sendo a variação da distância de trabalho do bocal da tocha com o substrato e a variação da velocidade de deslocamento da tocha para um valor fixo de vazão de gás. Ambos os ensaios foram realizados juntamente com o uso de um modelo computacional para verificar as interações com a atmosfera. Para a variação da distância de trabalho da tocha, as distâncias de 16 mm a 10 mm foram avaliadas para diferentes fluxos de argônio, registrando os resultados na Figura 36(a). Foi constatado que a vazão pode ser reduzida para menores distâncias de trabalho, porém para evitar os efeitos de oxidação, a concentração de oxigênio deve se manter inferior a 100 ppm (partes por milhão). Para a análise da velocidade de deslocamento, a Figura 36(b) apresenta os resultados das simulações feitas para as velocidades de 350 mm/min, 600 mm/min e 1500 mm/min. Obteve-se que a concentração de oxigênio

é 2 vezes maior para 600 mm/min e 4 vezes maior para 1500 mm/min em comparação ao valor de 300 mm/min, o que indica a maior facilidade para oxidação caso a vazão de gás não aumente proporcionalmente (Hauser, *et al.*, 2021).



Tradução:
Nozzle-to-work distance – Distância Bocal-Peça
Processing direction – Direção de processamento/deposição
Oxidation anomalies – Anomalias de oxidação
Oxidation concentration in ppm – Concentração de oxigênio em partes por milhão
Maximum oxygen limit – Limite máximo de oxigênio
Argon gas flow rate – Taxa de fluxo de gás.

Figura 36 (a) Progressão da concentração de oxigênio na região central de deposição para diferentes fluxos de gás de proteção e distâncias de trabalho da tocha; (b) Variação da concentração de oxigênio para um fluxo constante de argônio (10 l/min) na zona de deposição para diferentes velocidades de deslocamento da tocha (Adaptado de Hauser, *et al.*, 2021)

2.5.5 Delaminação

O descolamento das camadas depositadas revela uma baixa penetração do cordão, consequência de um baixo aporte térmico, o que fragiliza a região entre camadas e compromete a estrutura. Como mostrado na seção 2.4, os parâmetros de soldagem influenciam a energia introduzida no processo e devem ser avaliados para evitar esse defeito.

Porém o defeito ainda possui forte relação com as características do material depositado, como mencionado por Wu, *et al.* (2018a). O uso de compostos bimetálicos também se torna mais suscetível à delaminação, devido as diferentes temperaturas de solidificação e disposições a reações químicas dos materiais constituintes. Isso gera uma fase intermetálica fraca, induzindo mais facilmente a geração de trincas e fraturas nas regiões.

2.5.6 Tensões residuais

Tensões residuais são geradas devido ao stress térmico que o material é submetido, fragilizando a estrutura. Wu, *et al.* (2020) apresentam uma análise da influência de diferentes parâmetros e os efeitos geradores do defeito. Para isso, são utilizados algoritmos de *Machine Learning* e um modelo computacional para a medição da influência dos parâmetros de deposição, como potência do arco elétrico, velocidade de deposição, pré-aquecimento do substrato entre outros parâmetros de soldagem citados na seção 2.4. No trabalho, determinaram-se as três componentes das tensões normais σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , apresentados respectivamente nas Figura 37(a, b, c), onde a Figura 37(d) apresenta os valores determinados para uma configuração de parâmetros. O uso do *Machine Learning* permitiu a análise de 243 configurações, para o qual foi composta em algoritmos de redes neurais e árvores de decisão aleatória.

Foi verificado que a maior componente presente para as tensões residuais se refere à direção de deposição do cordão. Wu, *et al.* (2020) concluíram que os algoritmos apresentaram uma precisão de 97% na previsão das tensões residuais, onde a temperatura de pré-aquecimento é o parâmetro de maior influência, seguidos pela potência do arco elétrico e espessura do substrato para o controle das tensões.

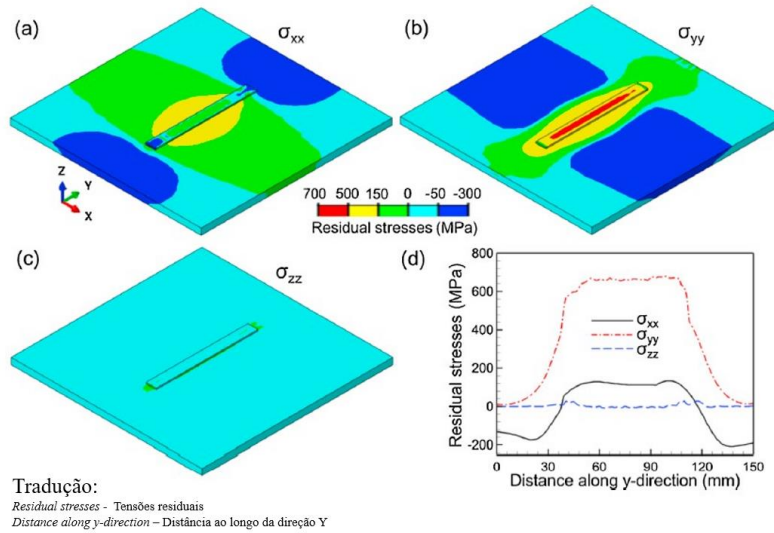


Figura 37 Componentes das tensões residuais obtida por uma simulação computacional realizada por Machine Learning (Adaptado de Wu, et al. 2020)

2.5.7 Análise geral dos defeitos

Para uma análise geral dos defeitos, Wu, *et al.* (2018a) realizou uma análise de diferentes trabalhos, abordando diversos materiais e compilando os resultados em um gráfico-radar (Figura 38) correlacionando o grau de severidade dos defeitos abordados. Os defeitos foram listados em grau crescente de gravidade com nota de 1 (menor) a 5 (maior) na classificação dos materiais mais comumente utilizados na manufatura aditiva de metais. Para o aço, os defeitos quanto ao acabamento superficial possuem maior gravidade entre os defeitos, seguido pela ocorrência de trincas, tensões residuais e deformação. O alumínio apresenta maior severidade para defeitos de porosidade, seguido pela ocorrência de tensões residuais, deformações e defeitos de oxidação e trincas com menor gravidade. O titânio apresenta maior gravidade em defeitos de oxidação, seguido por deformações e tensões residuais em menor severidade. Ligas bimetálicas mostram grande ocorrência de defeitos relacionados as trincas, deformações e tensões residuais e para ligas de níquel, apresentam a ocorrência de trincas como defeito de maior gravidade. (Wu, *et al.*, 2018a)

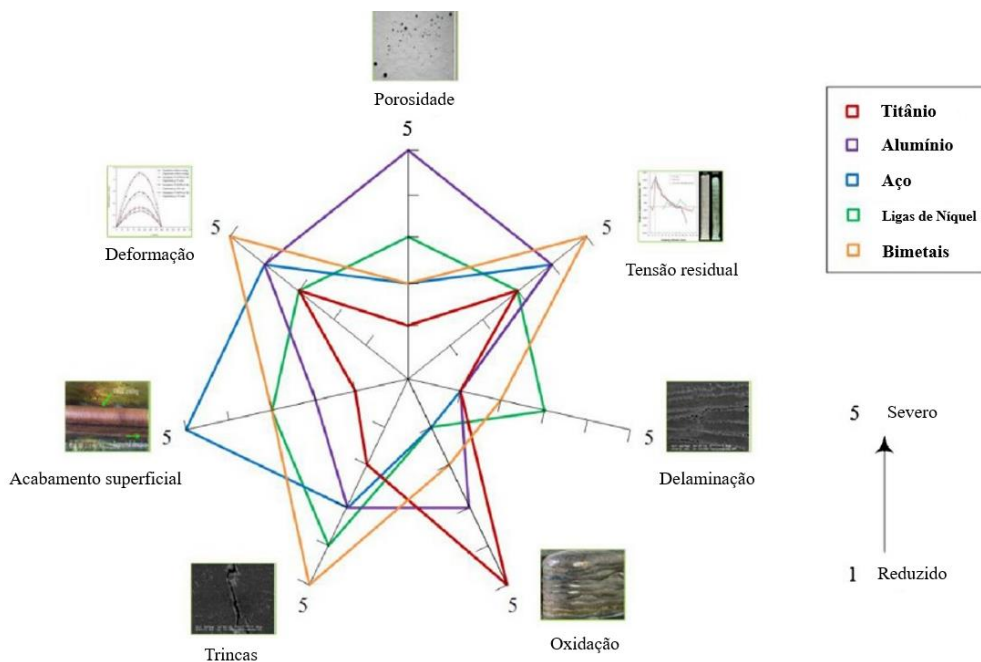


Figura 38 Correlação entre os materiais e defeitos presentes em processos WAAM (Adaptado de Wu, et al. 2018a)

2.6 MODELOS COMPUTACIONAIS

Com a complexidade física do processo WAAM, modelos numéricos computacionais passaram a ser criados para auxiliar na aquisição de dados e determinação de parâmetros, reduzindo os custos com ensaios e testes experimentais. Tais modelos, além de reduzirem o tempo de otimização do processo, também podem servir para uma melhor compreensão dos efeitos envolvidos e as particularidades de cada manufatura.

Um exemplo de aplicação apresentado por Abe, *et al.* (2020) consistiu em um processo de manufatura aditiva utilizando o aço JIS Z 3312 YGW16, onde a deposição de material foi feita camada por camada, utilizando um gás de proteção a mistura de Ar+20%CO₂. O objetivo foi determinar um valor ótimo de tensão a ser utilizada durante o processo, baseando-se em parâmetros de calor e material depositado obtidos em uma simulação numérica. Uma das análises utilizadas no trabalho foi a comparação do perfil do cordão depositado com o resultado obtido na simulação numérica, representado na Figura 39(a). A comparação das seções dos cordões apresentou uma boa similaridade, podendo assim apresentar resultados confiáveis. Além disso foi mostrada a influência da temperatura do substrato no formato do cordão depositado, presente na Figura 39(b), sendo mais um parâmetro que pode ser utilizado para controle do processo. A Figura 39(c) apresenta os resultados da deposição de um cordão pelo modelo tridimensional, apresentando a distribuição de temperatura para o tempo de 6,64 s do processo.

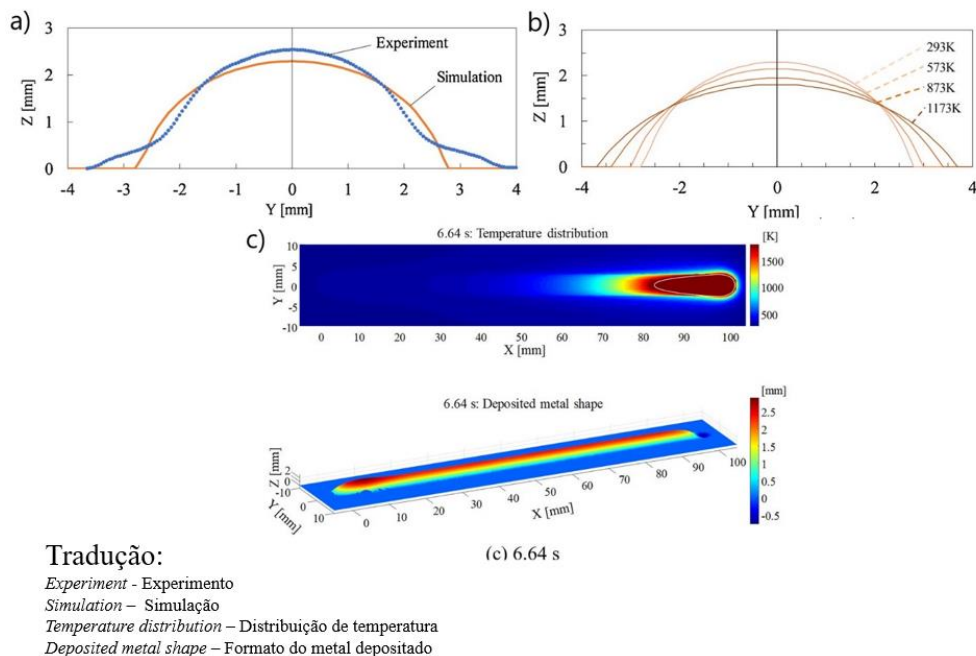


Figura 39 Resultados obtidos na simulação térmica e estrutural. (Adaptado de Abe, et al., 2020)

Em outro trabalho, Wu, *et al.* (2017) analisaram o efeito da poça de fusão na geração da microestrutura e nas propriedades mecânicas para a deposição de Ti-6Al-4V através do processo GTAW-WAAM. Além dos ensaios experimentais, também foi criado um modelo computacional no ABAQUS para uma análise térmica, com intuito de identificar a zona termicamente afetada (ZTA) ao longo do ciclo térmico no processo de deposição. A malha foi mais refinada na região de geração do arco elétrico e da fonte de calor para captar melhor o gradiente ao redor da região de fechamento do arco (Figura 40(a)), com elementos mais grosseiros nas regiões mais externas do substrato, como apresentada na Figura 40(c). Uma sub-rotina foi utilizada para gerar uma fonte de calor móvel, representando o movimento da tocha. Para determinar a precisão dos resultados da simulação, foi realizada uma análise da temperatura, a taxa de resfriamento e o gradiente de temperatura para os pontos selecionados (Figura 40(e)). Tais valores foram comparados com dados experimentais.

Nos resultados (Wu, *et al.*, 2017), os dados de taxa de resfriamento e gradiente de temperatura foram obtidos e utilizados na previsão da morfologia granular gerada nos pontos de medição, através

de mapas de solidificação. Essas previsões foram comparadas com as análises microestruturais, atingindo resultados similares da constituição. Com a previsão correta das constituições granulares, é possível realizar previsões igualmente satisfatórias quanto às propriedades mecânicas atingidas no processo, otimizando parâmetros no processo de manufatura aditiva GTAW-WAAM afim de obter a composição microestrutural mais recomendada para aplicação.

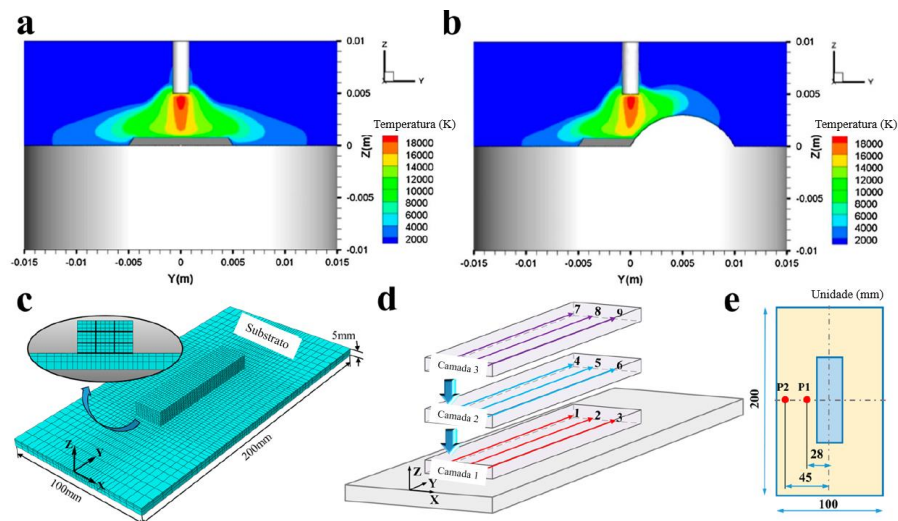


Figura 40 Resultados da simulação para: (a) passe único; (b) sobrepasso; (c) malha gerada para o modelo de análise térmica; (d) sequência de deposição das camadas; (e) pontos de medição para comparação dos resultados (Adaptado de Wu, et al., 2017)

Quanto aos métodos de resfriamento, a simulação computacional pode ajudar quanto à otimização do resfriamento, permitindo abordar diferentes métodos e compará-los de forma mais detalhada. Hackenhaar, *et al.* (2020) abordam uma modelagem em elementos finitos para um sistema de resfriamento por jateamento de ar implementado em um sistema GMAW-WAAM. Os ensaios computacionais foram acompanhados dos ensaios físicos utilizando o sistema em diferentes tempos de interpasso e avaliando o histórico térmico registrado pela simulação e os experimentos físicos. O sistema foi também simulado com o resfriamento natural por convecção livre, comparando a eficiência obtida entre os métodos. Os resultados obtidos para as temperaturas de interpasso em cada camada estão apresentados na Figura 41. O modelo também abordou comparação dos resultados para dois pontos de medição, analisando o processo de deposição com convecção natural e com o jateamento de ar para um tempo de 120 s de interpasso. As simulações apresentaram resultados condizentes com os ensaios experimentais e mostraram que o sistema de jateamento de ar é efetivo para o controle da temperatura de interpasso, parâmetro importante na manufatura aditiva quanto à qualidade do processo (Hackenhaar, *et al.*, 2020).

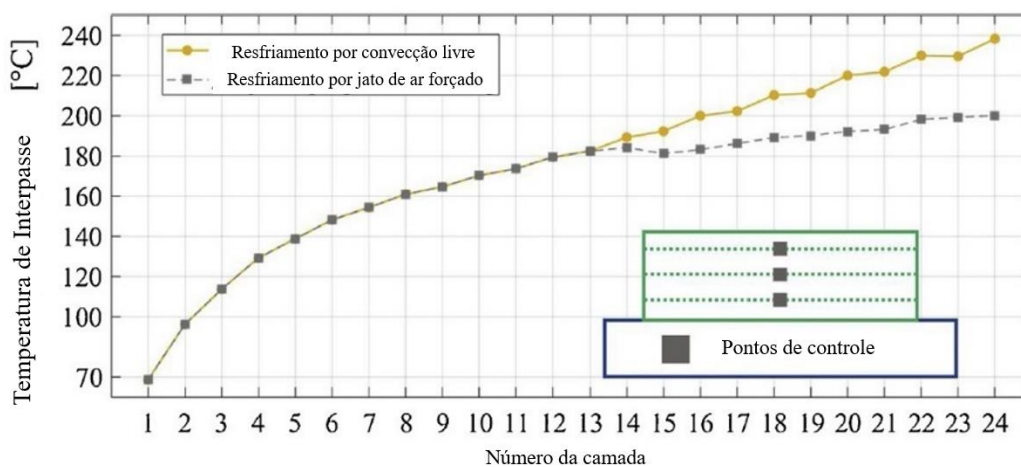


Figura 41 Comparação da temperatura de interpasso presente nas camadas depositadas para o resfriamento por convecção natural e jateamento de ar (Adaptado de Hackenhaar, et al., 2020)

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 EQUIPAMENTO E CONSUMÍVEIS

O sistema utilizado para a deposição é constituído pelo Robô Cartesiano MAXR23-S42-H42-C42 da Schneider Electric, apresentado na Figura 42 , utilizado para deslocamento ao longo da área de trabalho, percorrendo a trajetória definida de deposição. O volume de trabalho do robô é de 800x800x500 mm, com uma resolução de 0,1 mm e com trajetória programada por código G (Fernandes, 2016).

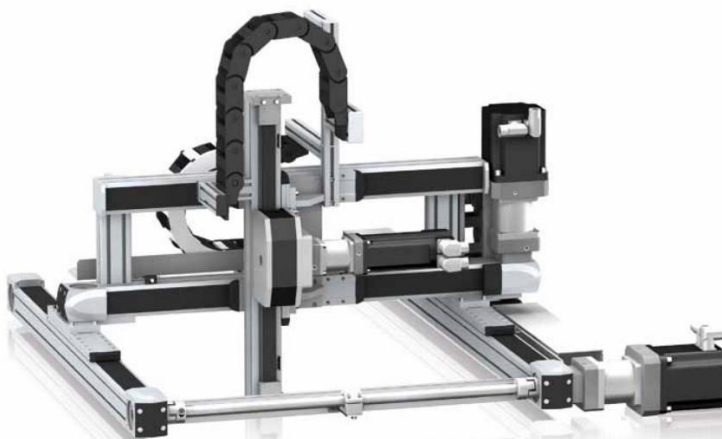


Figura 42 Robô cartesiano MAXR-23-S42-H42-C42 (Schneider Electric, 2021)

A fonte utilizada é a TransPuls Synergic 5000 CMT da *Fronius*, apresentada na Figura 43 junto com os acessórios, compatível com os processos GMAW convencional e pulsado, CMT-GMAW convencional e pulsado, e GTAW. Um termômetro infravermelho digital laser da marca KLX é utilizado para monitoramento da temperatura de interpasse durante a manufatura, com resolução de 0,10°C e precisão de $\pm 1,50^\circ\text{C}$, ajustado para emissividade de corpo negro.

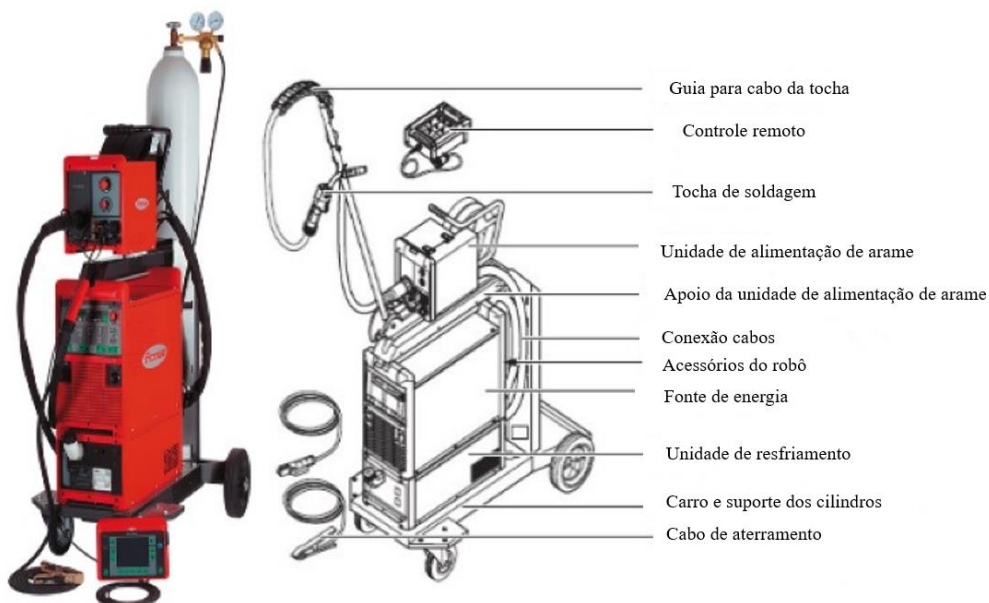


Figura 43 Fonte TransPuls Synergic 5000 CMT (Adaptado de FRONIUS,2020)

Quanto aos consumíveis, o arame escolhido foi o ER70S-6 com 1,20 mm de diâmetro, com especificações presentes na Tabela 2. Este foi escolhido pelo baixo custo e pela grande disponibilidade de trabalhos que o utilizam para auxílio na análise dos efeitos. O gás de proteção recomendado para os processos GMAW é o Argônio (Ar) sendo utilizado a mistura Ar + 18% CO₂, onde o gás carbônico é utilizado para ajudar na estabilização do arco e melhora de fluidez do material. O gás foi utilizado com vazão de 15 l/min a 20 l/min em todos os ensaios realizados.

Composição química típica do arame (%)									
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0,06-0,15	0,4-1,85	0,2-1,15	0,025 Máx.	0,035 Máx.	0,15	0,15 Máx.	0,15 Máx.	0,03 Máx.	0,5 Máx.
Propriedades mecânicas típicas									
Limite escoamento (MPa)		Resistência à tração (MPa)			Alongamento %		Resistência ao impacto Charpy-J		
400 Mín.		480 Mín.			22 Mín.		27 J Mín. (-30°C)		

Tabela 2 Propriedades do arame ER70S-6 (TECHNO ALLOYS, 2016)

3.2 METODOLOGIA

No presente trabalho, para a construção da metodologia adotada nos ensaios, consideraram-se as seguintes etapas de preparação:

Etapas	Procedimento	Descrição
1	Conhecimento geral do equipamento	Identificação do equipamento utilizado, organização dos manuais de operação, determinação das limitações do sistema e área de trabalho permitida na operação.
2	Determinação dos métodos de deposição	Determinar quais métodos de deposição serão utilizados e quais parâmetros serão analisados nos ensaios, baseados no equipamento a disposição.
3	Listagem dos materiais	Listagem dos consumíveis que serão utilizados nos ensaios (gás de proteção, eletrodo arame, material de base, entre outros)
4	Programação Básica do equipamento	Programação do equipamento para a operação, que inclui a calibragem dos eixos e parâmetros do processo, determinação das trajetórias realizadas

Tabela 3 Etapas de preparação para os ensaios

Na preparação do experimento, foi feita a fixação do material de base na mesa de trabalho do equipamento e a realização do programa para a delimitação da região disponível de deslocamento da tocha. O material de base foi preparado com uma limpeza e lixamento da superfície de contato com o material de deposição e parafusado em suportes presentes na mesa do equipamento. A fixação é importante para garantir que não haja nenhuma folga, e com o deslocamento da base, acarrete problemas durante a manufatura dos cordões/camadas. Todas as amostras tiveram a base com 6,35 mm (1/4") de espessura e 200 x 200 mm de dimensão, utilizando a mesma fixação e composição, sendo compostos pelo aço carbono 1020, material compatível com o material de adição e que possui melhor custo-benefício.

Após a fixação do material de base, foi feita a preparação do equipamento e alimentação dos consumíveis para condução do pré-teste. Este consistiu na deposição simples de um cordão com o objetivo de aferir a qualidade do cordão para diferentes parâmetros de deposição escolhidos. A

trajetória foi determinada para o equipamento através de um código G, com o trajeto a ser realizado pela tocha.

Com a determinação dos parâmetros ideais através da análise do pré-teste (grupo A), novos códigos foram introduzidos para o trajeto da deposição de paredes com 5 camadas (grupo B), 10 camadas (grupo C), e 20 camadas (grupo D), nas direções de deposição unidirecional e bidirecional. Para as amostras com arco interrompido, um termômetro infravermelho foi utilizado para a aferição da temperatura, com o intuito de controlar a temperatura de interpasse entre a deposição das camadas.

Para uma análise da geometria dos cordões depositados nas paredes, medidas de altura e um corte de seção foi realizado com uma serra fita horizontal com lubrificação a óleo solúvel, para possibilitar a visualização da geometria da seção transversal obtida em cada configuração. A largura (L) e reforço do cordão no substrato, além do ângulo de molhamento (Θ) a espessura total e efetiva das camadas foi registrado através do software IMAGEJ, com as medidas feitas como apresentado na Figura 44.

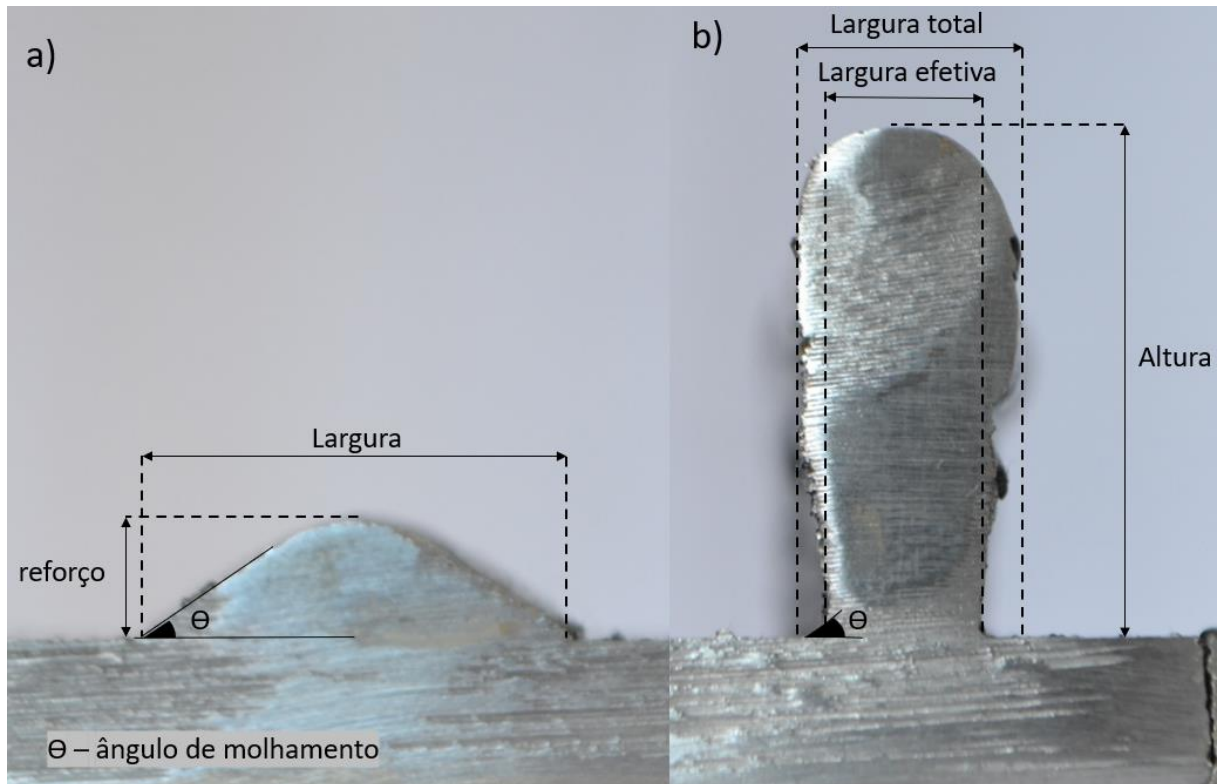


Figura 44 Representação das medidas a serem avaliadas para: a) cordão simples; b) parede.

O fluxograma completo de descrição das atividades encontra-se na Figura 45, onde os grupos referem-se como:

- O grupo A consiste em 10 cordões únicos depositados com diferentes configurações.
- O grupo B abrange 5 paredes constituídas com 5 camadas cada, utilizando alguns parâmetros utilizados no grupo A e avaliando o efeito na geometria.
- O grupo C envolve 5 paredes com 10 camadas cada, avaliando a geometria e a influência do comprimento das camadas, utilizando os melhores parâmetros provenientes do grupo B.
- O grupo D se baseia em dados do grupo C para otimização dos parâmetros utilizados nas 6 amostras avaliadas, sendo uma com 10 camadas, 4 com 20 camadas e ainda uma amostra final com 100 camadas.

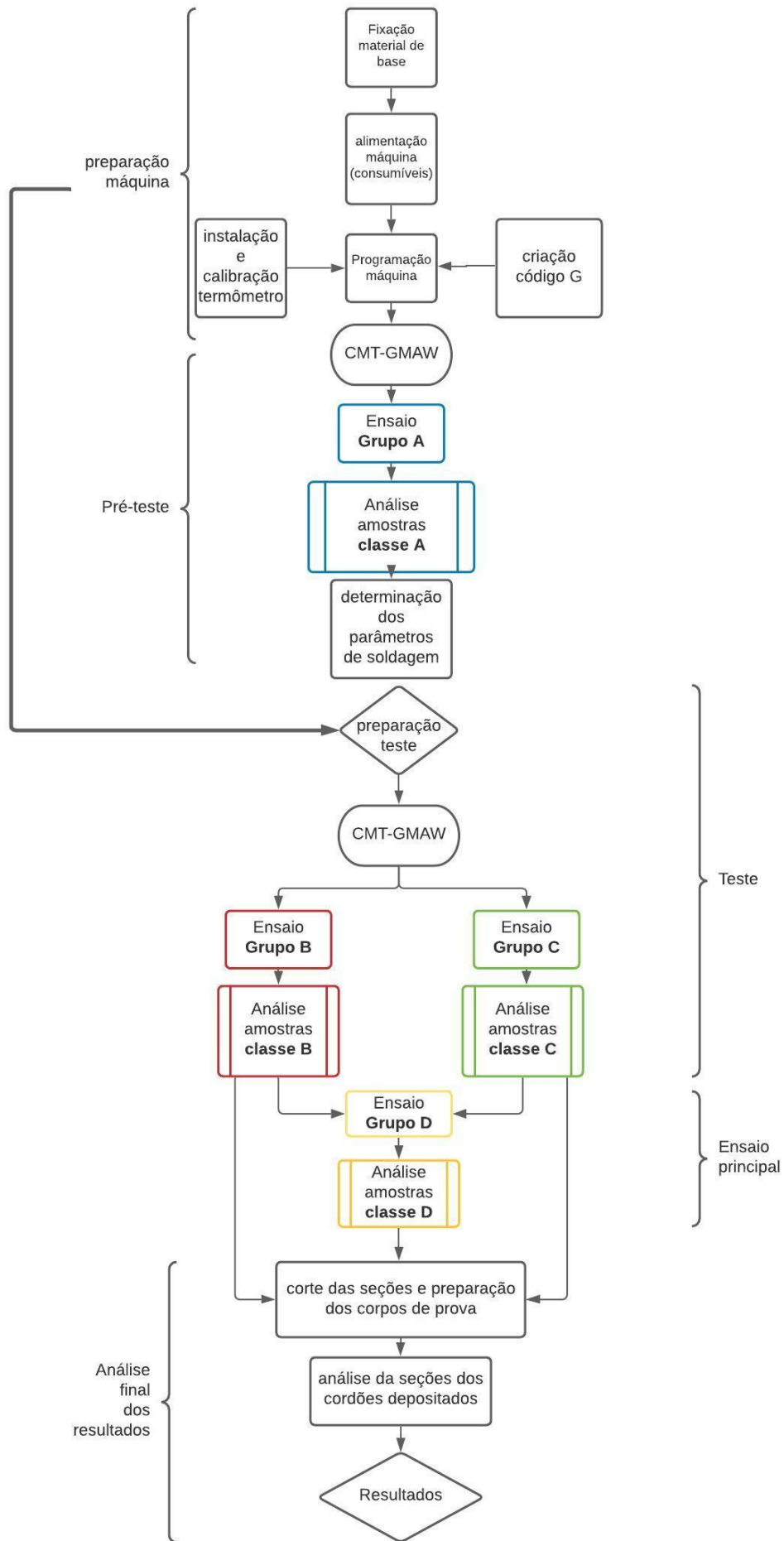


Figura 45 Fluxograma de atividades

3.2.1 Métodos de deposição

Para os ensaios, utilizou-se o processo CMT-GMAW, escolhido devido ao seu baixo aporte térmico e elevado controle da deposição. Quanto ao método de deposição, foi utilizado a deposição contínua bidirecional, sem interrupção do arco, e a deposição unidirecional, com controle das temperaturas de interpasse. O uso dos dois diferentes métodos verificou o efeito da direção de deposição nas características geométricas da parede fabricada, indicando quais cuidados devem ser levados a fim de resfriá-lo em 30°C, a fim de se aproximar a uma situação de temperatura ambiente, e também para 70°C, valor determinado a fim de não sobreaquecer a peça após um ciclo de deposição.

Pretende-se avaliar o desempenho da deposição para diferentes parâmetros de tensão e corrente, assim com diferentes velocidades de deslocamento da tocha e alimentação de arame, a fim de determinar a melhor configuração a ser utilizada em um processo de fabricação de acordo com o tempo de deposição, tamanho e geometria requerida. Assim buscou-se determinar o parâmetro com menor variação da geometria, maior altura e menor largura.

3.2 OPERAÇÃO DO SISTEMA

O sistema completo encontra-se representado na Figura 46, destacando-se o computador e a tela de comando do robô cartesiano à esquerda, utilizados para introdução do código G, zeramento da máquina e ajuste de parâmetros de deslocamento da tocha, e a tela de comando da fonte, utilizados para ajuste dos parâmetros de tensão e corrente, velocidade de alimentação do arame e seleção do método de deposição utilizado. Para a introdução do código G, utiliza-se o programa *SoMachine*, e para o acionamento dos drivers do robô na tela de comando, utiliza-se o tutorial de passo a passo na operação do sistema definido no trabalho de Mendes (2019).

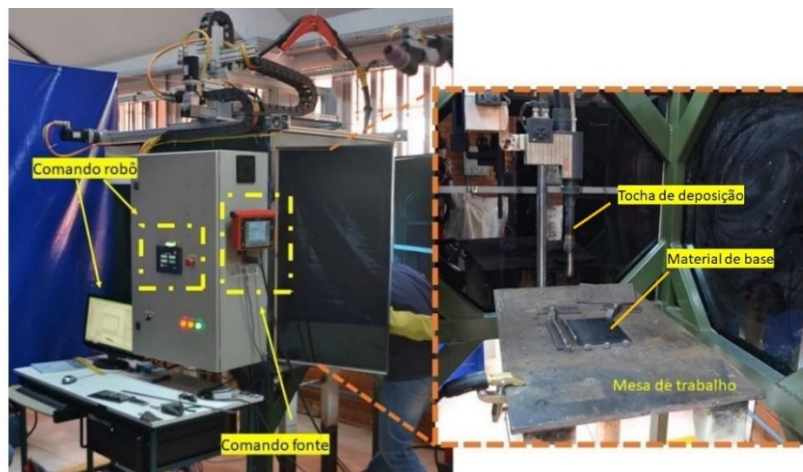


Figura 46 Representação do layout do sistema utilizado para os ensaios.

Quanto a operação da fonte, os modos de deposição disponíveis são os modos MIG/MAG ou CMT, podendo ser pulsado ou contínuo e sinérgico ou manual. A tela de comando, presente na Figura 47, permite ajustar a curva sinérgica característica selecionando o processo de deposição, gás de proteção utilizado e a velocidade de alimentação do arame. As configurações de intensidade são feitas com base no ajuste da espessura do substrato na tela de controle. Definido a espessura “e”, a tensão e corrente média são ajustados para a intensidade do arco elétrico necessário. É possível também definir a porcentagem de correção automática do arco voltaico e do impulso, feitos pelo controle da fonte durante o processo, para os modos sinérgicos disponíveis na fonte.

Vale ressaltar que antes da operação, o substrato deve ser posicionado na mesa de trabalho e corretamente fixado com apoios ou parafusado a fim de evitar deslocamento durante a deposição. A conferência da distância bico de contato a peça DBCP deve ser feita sempre antes de iniciar uma rotina e verificar a trajetória X e Y para que a tocha não colida com nenhum suporte ou objeto na mesa

de trabalho. Vale ressaltar que o deslocamento do eixo Z é feito inversamente, ou seja, o eixo sobe para valores negativos de deslocamento no código G.



Figura 47 Tela de comando da fonte de soldagem Fronius TPS5000.

3.3 MEDIÇÕES

A metodologia utilizada para o processo de medição consistiu na separação da amostra em pontos de medição separados em 5 mm ao longo de todo o comprimento da amostra. Esses pontos nomeados com letras, são medidos utilizando um calibre de solda USHS-4 da marca Roktools (resolução de 0,1 mm com faixa nominal de 12 mm) para altura das amostras do grupo A e B, e um paquímetro da marca Eccofer® (resolução de 0,05 mm com faixa nominal de 150 mm) para medir a altura das paredes dos grupos C e D e a largura de todas as amostras, onde cada ponto é medido 5 vezes e obtido a média e desvio padrão para cada ponto.

O intervalo de confiança utilizado em todas as medições foi de 99,73%, utilizando o princípio da Regra Empírica para o desvio padrão (DP). Os valores obtidos de altura e largura média da amostra também utilizou um intervalo de confiança na faixa.

3.4 NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS

Para a nomeação das amostras, utilizou-se a seguinte nomenclatura, exemplificada a seguir:

$$G 2 T 8/24 y _ xxx \pm \theta n$$

Onde o termo G refere ao grupo pertence a amostra (A, B, C ou D), juntamente com o número especificando a configuração da fonte (Tabela 4), que se baseia na espessura do substrato. O termo T refere-se à velocidade de deslocamento da tocha, juntamente com o valor do parâmetro em mm/s. Caso haja dois valores separados por barra, o primeiro diz respeito a velocidade horizontal e o segundo velocidade vertical. No exemplo, T8/24 refere-se à velocidade de deslocamento horizontal da tocha de 8 mm/s e deslocamento vertical de 24 mm/s para transição das camadas. O termo “y” refere-se ao tipo de passo vertical dado pela tocha por camada, sendo “c” um passo variável onde se mantém a distância DBCP constante, e “f” quando a amostra utilizou um passo vertical fixo para todas as camadas. O termo destacado “xxx” após o a linha refere-se ao tipo de deslocamento utilizado na amostra:

- **Uni** – Deposição unidirecional;
- **Bidi** – Deposição Bidirecional com arco interrompido;
- **Bidc** – Deposição Bidirecional com arco contínuo.

Por último o termo “θ” refere-se ao ângulo de inclinação da tocha, sendo positivo um passe da tocha puxando, ou negativo um passe da tocha empurrando. O termo “n” distingue amostras que utilizarem mesmos parâmetros de deposição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo aborda as medições e análises dos 4 grupos de amostras realizados, avaliando as características geométricas e a presença de descontinuidades/defeitos durante ou após o processo de deposição. Vale ressaltar que todas as figuras das amostras nessa seção apresentam a escala de uma régua milimetrada.

4.1 ANÁLISE DOS ENSAIOS

4.1.1 Amostras do grupo A

O grupo A consistiu na deposição de cordões simples de 70 mm de comprimento, a fim de permitir a deposição de mais amostras em uma chapa do material de base, utilizando diferentes parâmetros de deposição, organizados de acordo com a variação da curva sinérgica. Com o aumento da espessura de penetração especificada no módulo de controle da fonte, as faixas de tensão e a corrente também eram acrescidas, aumentando o aporte térmico. Os parâmetros utilizados estão representados na Tabela 4, onde o ajuste dos parâmetros foi realizado pela fonte seguindo a curva sinérgica ajustada para o processo CMT-GMAW, o gás de proteção e o material utilizados na deposição. Uma taxa de correção de 5% dos parâmetros de abertura do arco, padrão da fonte na configuração sinérgica, foi colocada a fim de auxiliar na estabilização do arco elétrico durante o processo de deposição.

Grupo A – Parâmetros médios utilizados				
Amostras	Corrente (A)	Voltagem (V)	V_a (m/min)	V_d (mm/s)
A1T6	65	19,1	2,0	6,0
A2T6	112	21,0	3,7	6,0
A3T6	131	20,5	5,2	6,0
A4T6	170	23,2	6,6	6,0
A5T6	189	24,6	7,6	6,0
A6T6	229	25,5	8,7	6,0
A7T6	266	28,5	10,9	6,0
A8T6	277	29,1	10,9	6,0
A3T12	131	20,5	5,2	12,0
A3T18	131	20,5	5,2	18,0
A1T8+45 (45° puxando)	66	19,3	2,1	8,0
A1T8-45 (45° empurrando)	66	19,3	2,1	8,0

Obs: V_a - Velocidade de alimentação do arame; V_d - Velocidade de deslocamento da tocha

Tabela 4 Parâmetros utilizados nas amostras do grupo A.

O perfil de cada cordão foi registrado nas Figuras 48 a 59, juntamente com os pontos de medição de A até N e as medidas de altura e largura, apresentadas nas Tabelas 5 a 13.

A amostra A1T6, presente na Figura 48, apresentou características superficiais constantes até o ponto M, seguida de uma zona de maior concentração de material, gerando um desnível, devido a parada da tocha. Os parâmetros utilizados apresentaram uma baixa penetração e um bom controle da deposição.

O baixo aporte térmico e a alta qualidade superficial apresentados na amostra A1T6 são aspectos atrativos em processos mais longos, a fim de evitar um alto estresse térmico do material depositado, mantendo uma alta qualidade. Por esse motivo, o ajuste foi escolhido para a deposição das amostras do grupo D., que consiste em paredes de maior comprimento e maior número de camadas, e será apresentado posteriormente.

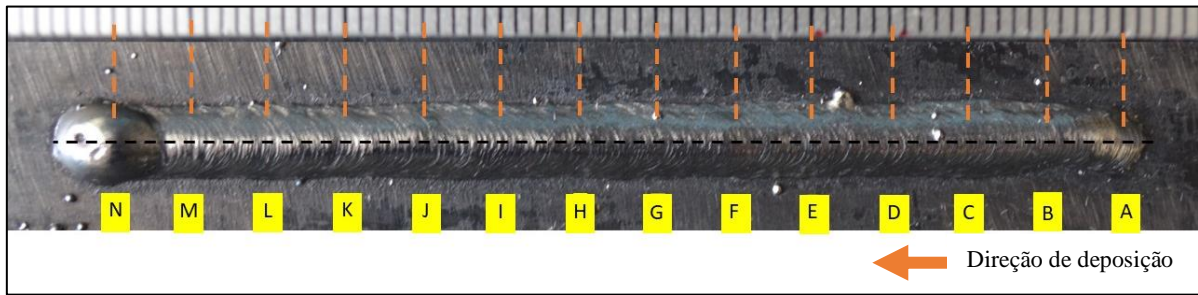


Figura 48 Amostra A1T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.

Amostra A1T6 - cordão simples $V_d = 6$ mm/s															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	1,60	1,96	1,84	1,76	1,78	1,74	1,68	1,66	1,76	1,76	1,92	1,86	1,88	1,98	1,80
DP	0,47	0,17	0,17	0,17	0,39	0,17	0,14	0,27	0,40	0,17	0,14	0,17	0,25	0,54	0,11
Largura															
Média	4,46	4,44	5,26	4,82	5,22	5,02	5,16	5,00	5,06	5,28	4,86	5,18	4,88	5,10	4,98
DP	0,17	0,55	0,27	0,25	0,14	0,39	0,40	0,21	0,17	0,14	0,40	0,14	0,14	0,21	0,27

Tabela 5 Medições de altura e largura da amostra A1T6.

A amostra A2T6, presente na Figura 49, apresentou características sólidas quanto ao acabamento superficial e largura, apesar do cordão ainda apresentar valores baixos de reforço. Também é visível a presença do efeito de rechupe de cratera, defeito registrado como 1.4-2025 na norma ISO 5817-1 (ISO, 2003), destacado pela seta vermelha na Figura 49, devido ao efeito de contração do material durante a solidificação, gerando uma região não preenchida. Apesar disso, devido à alta qualidade superficial e geométrica do cordão, os parâmetros utilizados apresentaram potencial para a deposição de paredes e foram utilizados em amostras do grupo D para visualização da performance da configuração.

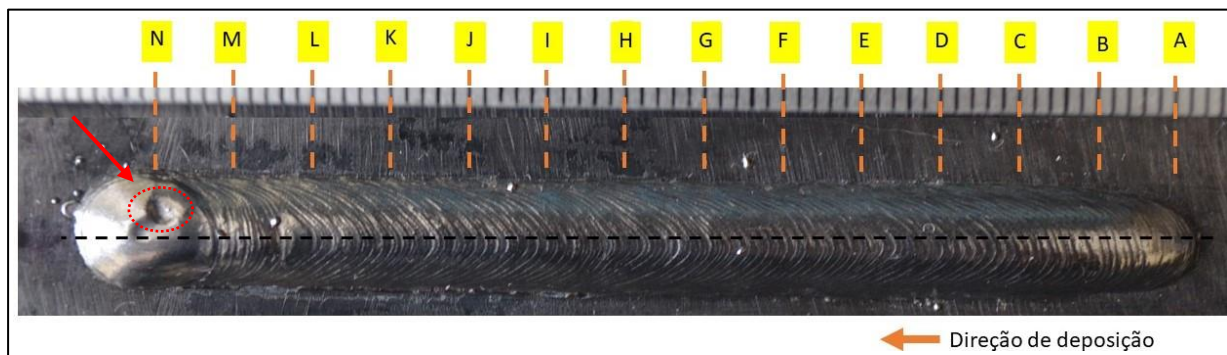


Figura 49 Amostra A2T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.

Amostra A2T6 - cordão simples $V_d = 6$ mm/s															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	1,62	2,58	2,70	2,30	2,12	2,20	2,28	2,06	2,10	2,14	2,12	2,14	2,22	2,20	2,20
DP	0,39	0,39	0,21	0,21	0,14	0,30	0,33	0,27	0,21	0,17	0,14	0,34	0,25	0,21	0,25
Largura															
Média	5,42	7,16	7,74	7,48	7,66	7,40	7,54	7,46	7,36	7,18	7,36	7,56	7,40	7,70	7,32
DP	0,39	0,17	0,17	0,68	0,46	0,21	0,17	0,17	0,55	0,39	0,50	0,17	0,21	0,21	0,57

Tabela 6 Medições de altura e largura da amostra A2T6.

A amostra A3T6, apresentado na Figura 50, apresentou características geométricas satisfatórias, com um cordão contínuo e com altura maior nos pontos de medição que os cordões depositados

inicialmente. Porém a deposição apresentou um número mais elevado de respingos que as amostras apresentadas anteriormente.

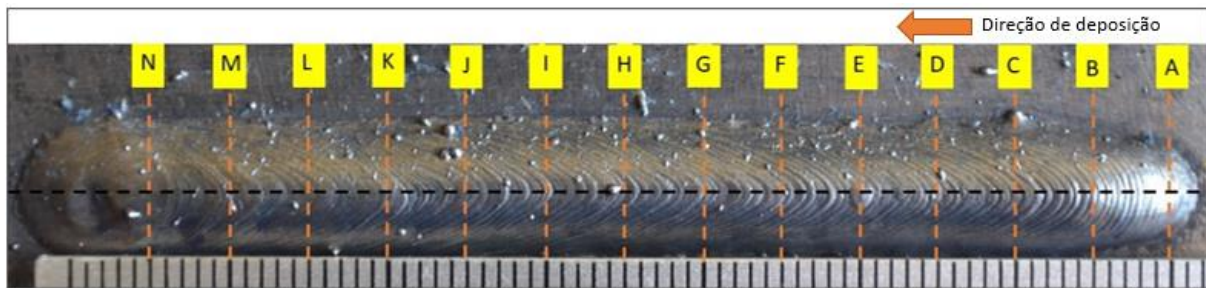


Figura 50 Amostra A3T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6 \text{ mm/s}$.

Amostra A3T6 - cordão simples $V_d = 6 \text{ mm/s}$															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	2,82	3,00	2,80	2,80	2,80	2,72	2,38	2,46	2,32	2,26	2,24	2,06	1,90	1,88	2,46
DP	0,14	0,21	0,21	0,30	0,21	0,25	0,33	0,46	0,33	0,17	0,17	0,16	0,30	0,25	0,37
Largura															
Média	6,02	8,26	8,70	8,70	8,45	8,62	8,62	8,62	8,74	8,70	8,70	8,72	8,78	8,96	8,47
DP	0,39	0,59	0,47	0,37	0,62	0,39	0,44	0,25	0,46	0,42	0,47	0,25	0,25	0,46	0,72

Tabela 7 Medições de altura e largura da amostra A3T6.

Para verificar que o efeito não provinha da configuração utilizada para a deposição, um novo cordão foi depositado com os mesmos parâmetros, presente na Figura 51. O cordão não se diferenciou em aspectos geométricos, como altura e largura, porém apresentou uma superfície mais limpa dos respingos, com as marcas de fluxo de material bem definidas e constantes. Com isso, supõe-se que os respingos foram originados por contaminantes presentes na chapa do substrato na região de deposição.

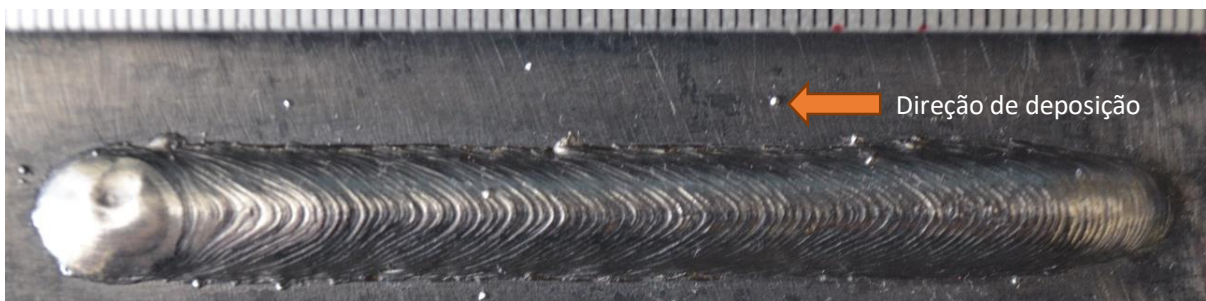


Figura 51 Segundo cordão depositado com as configurações da amostra A3T6 para avaliar a ocorrência de respingos.

A amostra A4T6, presente na Figura 52, apresentou inconstâncias superficiais na região de contorno da poça de fusão, indicando um menor controle da deposição, provavelmente devido ao maior aporte térmico gerado pela configuração. O final do cordão, nos pontos M e N, apresenta um formato distorcido do material em comparação as amostras anteriores, refletindo o formato gerado pela poça de fusão durante a deposição. O rechupe de cratera (1.4-2025 da ISO 5817-1 (ISO, 2003)) também foi gerado ao final da deposição, destacado em vermelho na figura. Apesar disso, os valores de largura e altura ainda permaneceram constantes ao longo do cordão.

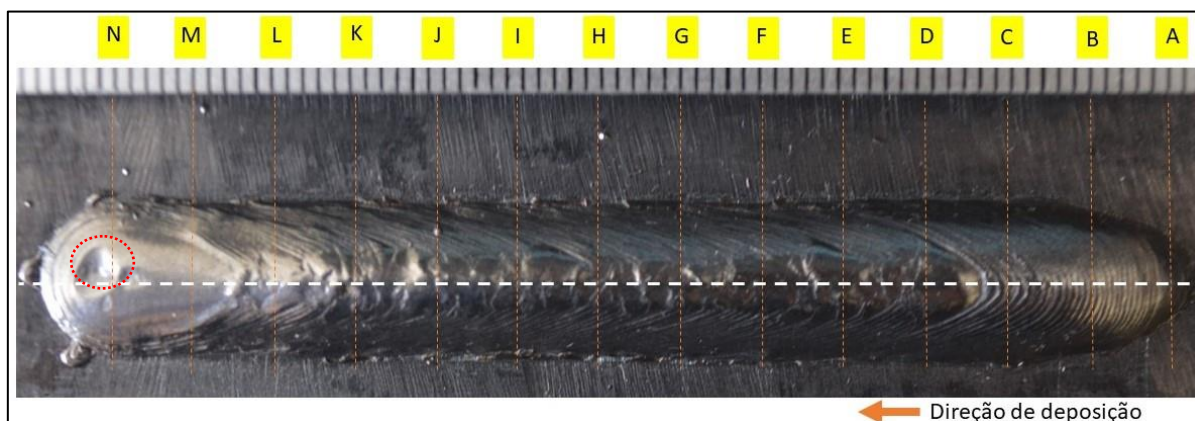


Figura 52 Amostra A4T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.

Amostra A4T6 - cordão simples $V_d = 6$ mm/s															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	2,60	3,64	3,52	3,42	3,26	3,12	3,22	3,08	3,08	3,20	3,12	2,90	2,24	1,66	3,00
DP	0,30	0,59	0,25	0,39	0,17	0,14	0,14	0,14	0,14	0,00	0,25	0,21	0,17	0,27	0,53
Largura															
Média	7,00	10,00	10,62	10,62	10,06	10,18	10,08	9,90	10,02	10,06	9,82	10,12	9,50	9,82	9,84
DP	0,21	0,67	0,25	0,39	0,78	0,54	0,89	0,42	0,78	0,27	0,83	0,25	0,37	0,65	0,87

Tabela 8 Medições de altura e largura da amostra A4T6.

A Figura 53 apresenta a amostra A5T6, onde o cordão apresentou uma variação considerável da altura ao longo dos pontos de medição. Devido aos altos valores de tensão e corrente, a quantidade de material também foi aumentada para suprir a estabilidade da deposição. Isso ocasionou uma maior região ocupada da poça de fusão, gerando um cordão mais largo, e em consequência uma maior penetração do material de adição no substrato por conta do alto aporte térmico. Esse efeito é visível através da parte inferior da chapa e se intensifica a partir desta configuração para as amostras A6T6, A7T6 e A8T6.

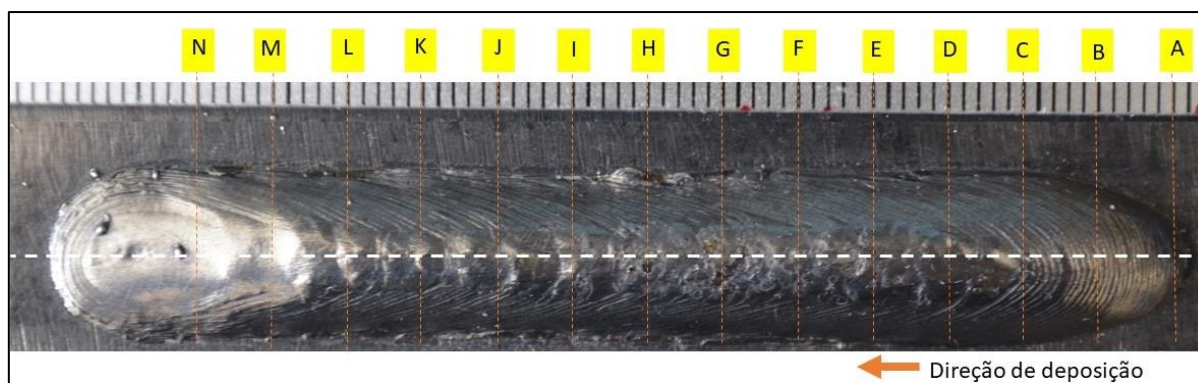


Figura 53 Amostra A5T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.

Amostra A5T6 - cordão simples $V_d = 6$ mm/s															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	3,10	3,76	3,78	3,84	3,66	3,32	3,24	3,20	3,20	3,34	3,24	2,92	2,24	1,62	3,18
DP	0,47	0,17	0,25	0,17	0,59	0,25	0,17	0,21	0,30	0,34	0,27	0,49	0,17	0,39	0,61
Largura															
Média	8,52	11,22	11,80	11,48	11,30	11,26	10,66	10,78	10,46	10,74	10,88	10,96	11,00	10,96	10,86
DP	0,25	0,49	0,21	0,44	0,47	0,86	0,50	0,68	0,17	0,17	0,25	0,50	0,21	0,62	0,76

Tabela 9 Medições de altura e largura da amostra A5T6.

Na Figura 54, a amostra A6T6 apresentou uma intensificação da variação da altura ao longo do comprimento e aumento da largura média do cordão de 10,85 mm na amostra A5T6 para 12,06 mm na amostra A6T6. Houve também em maior expressividade o efeito de rechupe da cratera, destacado em vermelho, com o aumento da região da cratera e o aparecimento de trincas de solidificação na região constatado pela análise visual, pela referência 2.1-100 na ISO 5817-1 (ISO, 2003). O incorreto apagamento do arco normalmente ocasiona o rechupe da cratera, que é um ponto de concentração de tensões, podendo originar trincas durante sua formação, conforme pode ser observado na Figura 54, conforme a norma ISO 5817-1 (ISO, 2003).

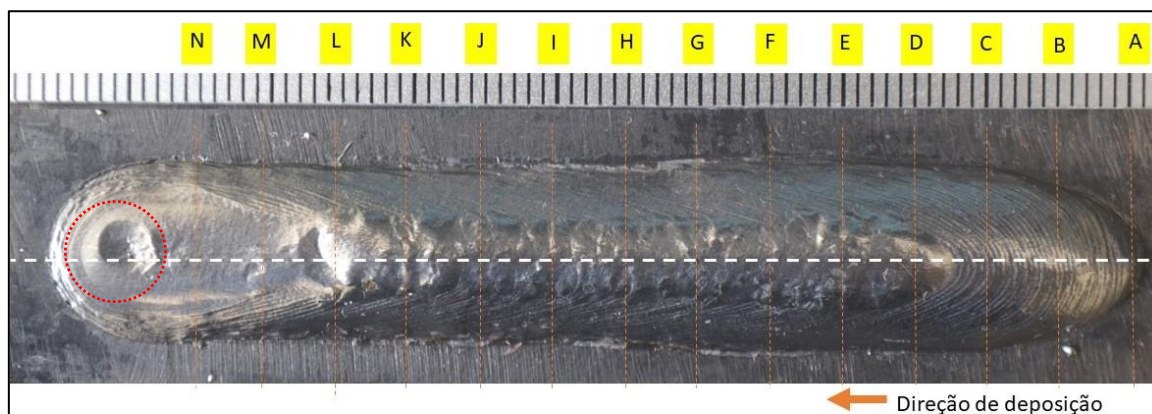


Figura 54 Amostra A6T6 – cordão simples depositado com $V_d = 6$ mm/s.

Amostra A6T6 - cordão simples $V_d = 6$ mm/s															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	2,68	3,88	3,80	4,04	3,98	3,56	3,34	3,34	3,18	3,18	3,18	2,54	1,94	1,38	3,14
DP	0,39	0,14	0,30	0,27	0,14	0,59	0,34	0,17	0,33	0,49	0,14	0,27	0,27	0,49	0,78
Largura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	7,44	11,84	12,94	12,96	12,90	13,16	12,22	12,00	12,00	11,96	12,08	12,22	12,24	12,88	12,06
DP	0,62	0,34	0,46	0,86	1,14	0,69	0,91	0,30	0,52	0,66	0,25	0,33	0,34	0,49	1,41

Tabela 10 Medições de altura e largura da amostra A6T6.

A amostra A7T6, presente na Figura 55, intensificou a variação de altura ao longo do cordão e da largura média, que passou a ser de 14,06 mm. A região da poça de fusão, registrado pela região circulado em preto, foi maior que o cordão A6T6, refletindo na geometria do cordão ao final da deposição. O efeito de rechupe gerou uma cratera mais alongada na região do ponto L e M, destacado em vermelho, uma posição anterior ao visto na amostra A6, onde a cratera se localizava após o ponto N de medição. Alguns pequenos pontos de oxidação superficial foram registrados no ponto E, mas as anomalias não afetaram a integridade estrutural do cordão.

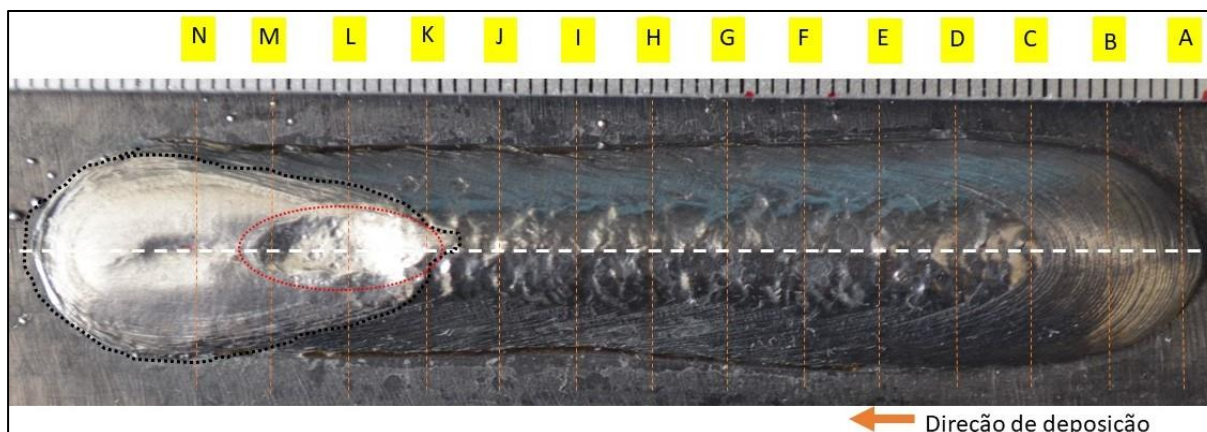


Figura 55 Amostra A7T6 – cordão simples depositado com velocidade de deposição de 6 mm/s.

Amostra A7T6 - cordão simples $V_d = 6\text{mm/s}$															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	3,04	3,98	4,28	4,38	4,10	4,04	3,88	3,74	3,58	3,74	3,12	1,98	1,72	1,16	3,34
DP	0,17	0,25	0,25	0,25	0,21	0,17	0,25	0,17	0,72	0,17	0,25	0,14	0,14	0,17	1,02
Largura															
Média	10,24	14,08	15,26	15,40	15,34	15,06	14,44	14,04	13,60	13,86	13,98	13,68	13,70	14,18	14,06
DP	0,16	0,49	0,34	0,21	0,34	0,17	0,55	0,27	0,42	0,50	0,49	0,78	0,37	0,44	1,28

Tabela 11 Medições de altura e largura da amostra A7T6.

Para a deposição da amostra A8T6, percebeu-se que a poça de fusão atravessou a espessura do substrato, tornando inviável a utilização desta configuração. Sendo assim não foi realizada a medição desta amostra para comparação com as demais.

Durante a deposição do grupo A, optou-se por analisar ainda o efeito da velocidade e o impacto nas características do cordão. Por esse motivo, foi depositado mais 2 amostras (A3T12 e A3T18) para as velocidades de 12mm/s (A3T12) e 18 mm/s (A3T18).

A amostra A3T12, mostrado na Figura 56, apresentou um bom acabamento superficial e altura constante ao longo dos pontos de medição, porém a região final do cordão, após o ponto N até o ponto O, apresentou uma largura maior devido ao maior aporte térmico da região e a concentração maior de material devido ao fluxo da poça de fusão na direção de deslocamento da tocha. No geral a amostra A9 apresentou características constantes e foi utilizado em ensaios futuros na confecção de paredes.

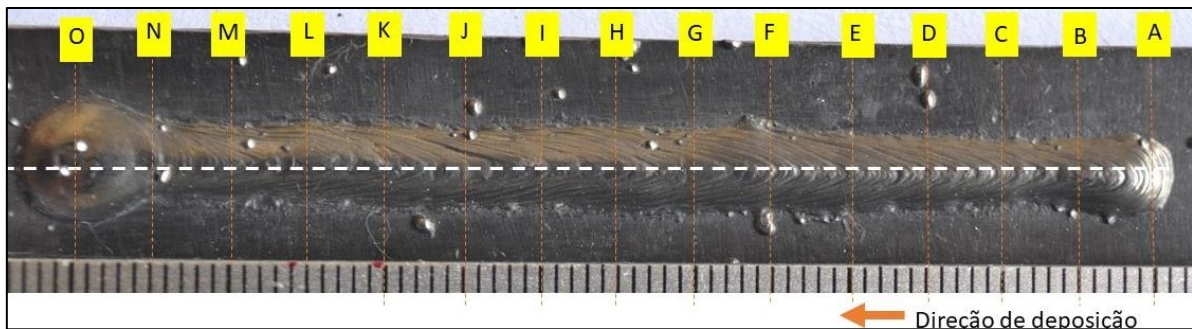


Figura 56 Amostra A3T12 – cordão simples depositado com velocidade de deposição de 12 mm/s.

Amostra A9 – Cordão Simples ($V_d = 12\text{mm/s}$)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	média
Média	1,80	2,06	1,96	2,04	2,02	1,98	1,76	1,94	1,66	1,88	1,72	1,84	2,02	1,98	1,72	1,89
DP	0,30	0,17	0,17	0,17	0,25	0,14	0,17	0,17	0,27	0,39	0,25	0,17	0,14	0,14	0,14	0,13
LARGURA																
Média	5,66	5,96	5,60	5,90	5,90	5,76	5,72	5,76	5,48	5,58	5,58	5,30	5,38	6,92	7,02	5,83
DP	0,40	0,27	0,52	0,60	0,42	0,46	0,44	0,75	0,58	0,65	0,39	0,21	0,44	0,68	0,89	0,50

Tabela 12 Medições de altura e largura da amostra A3T12.

Na Figura 57, a amostra A3T18 apresentou uma maior variação da geometria ao longo dos pontos de medição. A região em amarelo na figura apresentou uma pequena variação da superfície, aparentando ser uma região de baixa fusão do arame depositado. O cordão apresentou também pequenas oscilações na largura e altura, representado pelas linhas em vermelho, o que indicam ser o efeito de “pré-humping”. Esse efeito indica que a velocidade de deposição é muito alta para os parâmetros utilizados na fonte, o que gera variações do arco elétrico e atribui essa característica oscilatória no fluxo da poça de fusão. Sendo assim, a velocidade de 18 mm/s não será utilizada nos demais grupos.

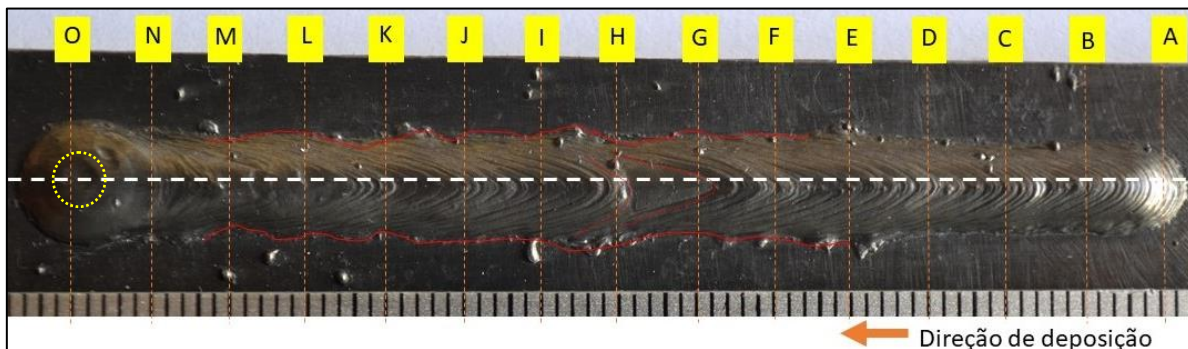


Figura 57 Amostra A3T18 – cordão simples depositado com velocidade de deposição de 18 mm/s.

Amostra A3T18 – Cordão simples ($V_d=18$ mm/s)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	média
Média	1,34	1,28	1,42	1,34	1,42	1,74	1,56	1,60	1,68	1,48	1,66	1,74	1,82	2,06	1,94	1,61
DP	0,17	0,14	0,39	0,17	0,25	0,17	0,17	0,30	0,14	0,39	0,34	0,17	0,14	0,17	0,46	0,23
LARGURA																
Média	5,12	3,86	4,32	4,50	4,92	5,82	5,22	4,74	4,48	4,68	4,56	4,48	4,40	6,10	6,68	4,93
DP	0,62	0,62	0,39	0,48	0,49	0,14	0,39	0,50	0,25	0,25	0,17	0,39	0,37	0,21	0,33	0,75

Tabela 13 Medições de altura e largura da amostra A3T18.

Além das amostras avaliadas para um ângulo reto de deposição da tocha (90°), também foram avaliadas outras duas amostras depositadas com uma inclinação de 45° da tocha, uma puxando (amostra A1T8+45) e outra empurrando (amostra A1T8-45), avaliando a influência da inclinação para a geometria do cordão. Ambas as amostras apresentaram uma geometria prejudicada devido a instabilidade do arco elétrico pela inclinação da tocha. Oscilações da geometria nas amostras A1T8+45 e A1T8-45, presentes nas Figuras 58 e 59 foram superiores à amostra A1T6, referência para os parâmetros utilizados. Houve a presença de respingos no início da deposição da amostra A1T8+45 e uma irregularidade do fluxo de material para a amostra A1T8-45, destacado na Figura 59.

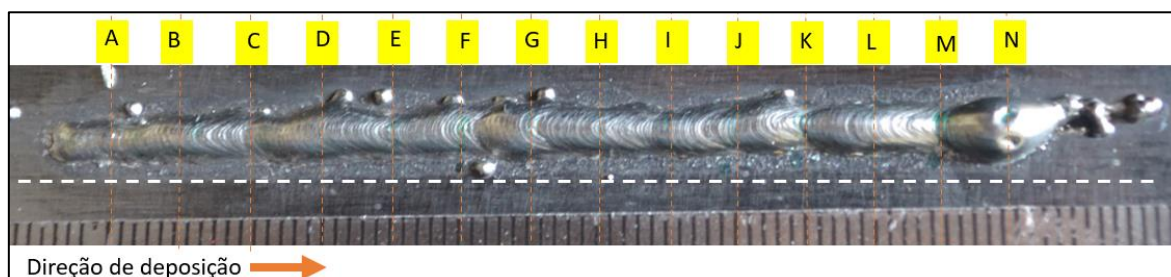


Figura 58 Amostra A1T8+45 – cordão simples depositado com tocha 45° puxando e velocidade de deposição de 8 mm/s.

Amostra A1T8+45 - cordão simples com tocha 45° puxando ($V_d=8$ mm/s)															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	3,04	2,02	2,30	1,94	2,26	2,20	2,36	2,22	1,82	1,96	2,22	2,04	2,26	1,94	2,18
DP	0,16	0,25	0,42	0,46	0,34	0,21	0,27	0,25	0,13	0,16	0,25	0,55	0,27	0,27	0,89
Largura															
Média	4,86	3,00	3,76	3,60	3,14	3,30	3,62	4,30	3,58	3,66	4,22	3,32	3,72	3,32	3,67
DP	0,16	0,21	0,16	0,21	0,34	0,47	0,13	0,21	0,25	0,16	0,13	0,13	0,13	0,25	1,50

Tabela 14 Medições de altura e largura da amostra A1T8+45.

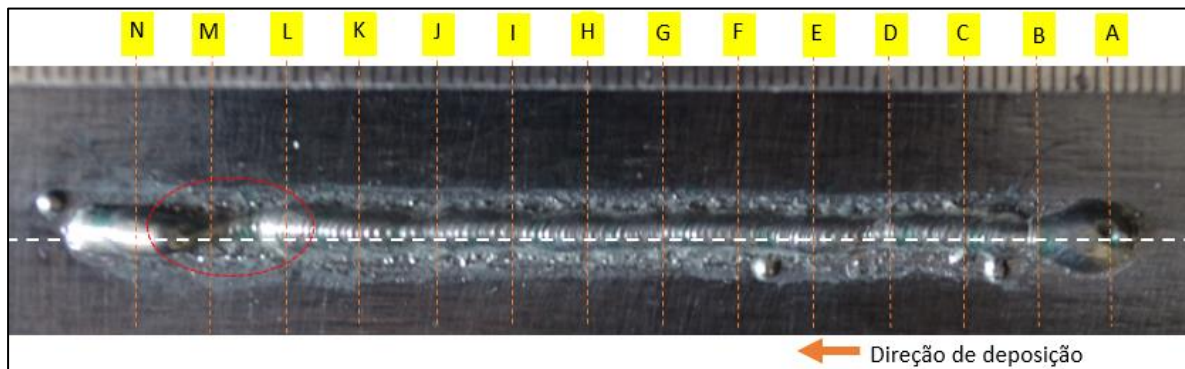


Figura 59 Amostra A1T8-45 – cordão simples depositado com tocha 45° empurrando e velocidade de deposição de 8 mm/s.

Amostra A1T8-45 - cordão simples com tocha 45° empurrando ($V_d = 8\text{mm/s}$)															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	2,84	2,62	2,48	2,22	2,36	2,06	2,40	2,10	1,90	2,12	2,18	2,22	0,84	3,66	2,29
DP	0,164	0,391	0,251	0,134	0,164	0,402	0,367	0,300	0,212	0,251	0,251	0,251	0,342	0,342	1,811
Largura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	média
Média	5,16	3,44	3,72	3,02	3,06	3,08	3,76	3,38	3,44	3,54	3,36	3,72	2,68	3,40	3,48
DP	0,342	0,164	0,445	0,329	0,164	0,391	0,455	0,251	0,402	0,545	0,164	0,134	0,493	0,300	1,714

Tabela 15 Medições de altura e largura da amostra A1T8-45.

4.1.1.1 Análise geral do grupo A

Com a medição de todas as amostras do grupo A, foi feita uma análise geral das amostras, apresentando uma comparação entre a altura e largura de cada amostra e avaliando os cordões de acordo com a geometria, qualidade superficial e aporte térmico submetido pelas amostras.

Na análise de cordões simples, o trabalho de González, *et al.* (2017), também avaliou amostras com faixas de corrente similares para o mesmo material e processo. Realizando análises topográficas, o estudo buscou apresentar indicativos de análise dos cordões, e para o autor, a análise da altura e largura, encontrando o desvio padrão desses parâmetros é um bom indicativo para avaliar estabilidade na deposição, facilitando também para processos de acabamento, auxiliando estratégias de usinagem para economia de material.

Com isso, foi realizado o gráfico de altura das amostras, mostrado na Figura 60, onde é possível visualizar a variação da altura entre os pontos de medição e entre as amostras. A amostra A7T6 apresentou o maior pico de altura entre todas as amostras, porém também apresentou a maior desvio padrão da média dos pontos de medição, sendo de 1,02 mm. As amostras A1T6, A2T6, A3T6, A3T12 e A3T18 apresentaram os menores desvios padrões, sendo respectivamente, 0,11 mm, 0,25 mm, 0,37 mm, 0,13 mm e 0,23 mm.

Quanto às medidas de largura, a Figura 61 apresenta o comparativo entre as amostras e a variação ao longo dos pontos de medição. As amostras A2T6 e A3T6 apresentaram uma maior estabilidade entre pontos de medição a partir do ponto B, com a largura média de 7,32 mm e 8,47 mm, respectivamente. A amostra A3T18 apresentou a menor largura média, com 4,93 mm, porém devido ao efeito pré-humping, obteve a maior variação entre os pontos de medição, apresentando um desvio padrão de 0,754 mm. A amostra A1T6 foi a segunda menor, com 4,98 mm de largura média, com o desvio padrão de 0,268 mm.

O gráfico radar presente na Figura 62, apresenta uma classificação das amostras diante as características observadas e comentadas durante a seção. A classificação envolve como nota 5 a melhor configuração e 1 a pior configuração, avaliando qualidade superficial e presença de descontinuidades superficiais, geometria do cordão com uma análise em conjunto da altura e largura das amostras e aporte térmico, considerando a quantidade de calor introduzido na confecção do cordão de acordo com os parâmetros utilizados.

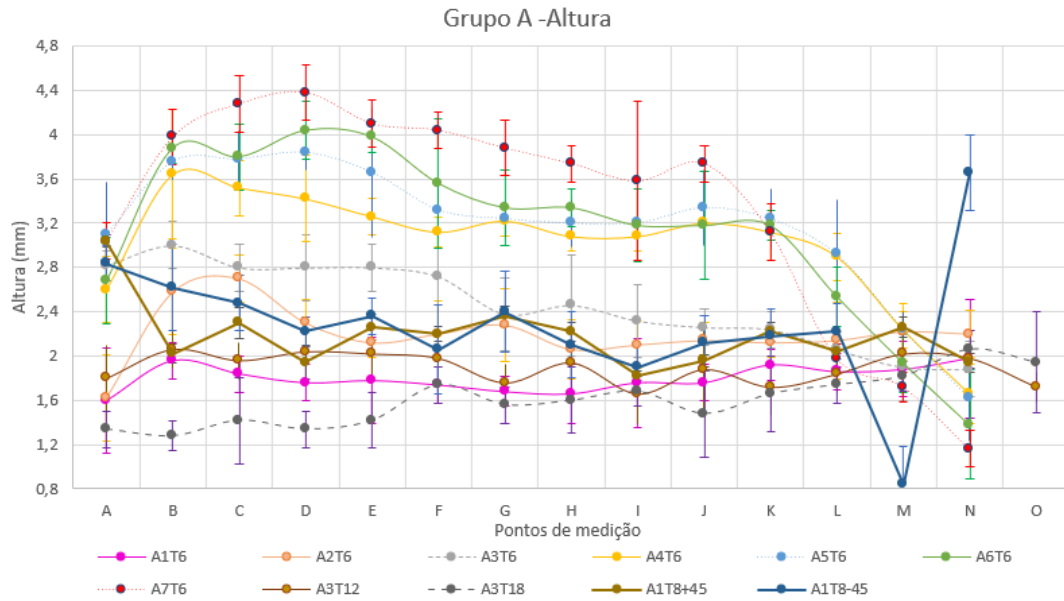


Figura 60 Comparativo das amostras grupo A – Altura.

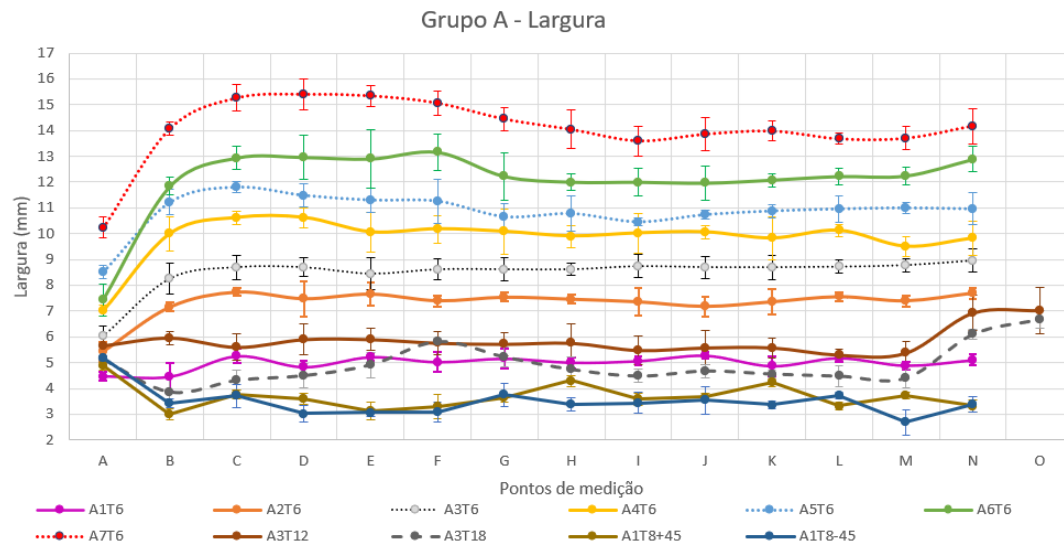


Figura 61 Comparativo das amostras do grupo A - Largura.

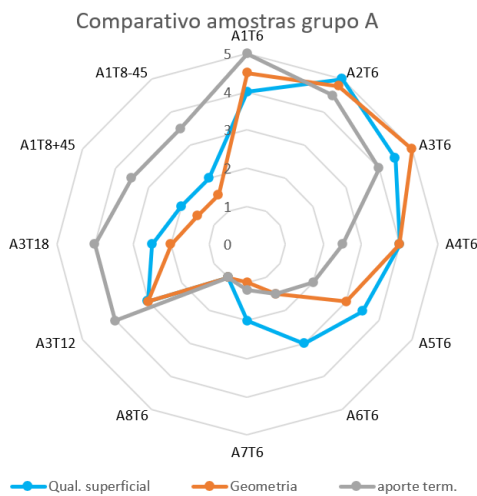


Figura 62 Análise de qualidade para as amostras do grupo A.

Através do comparativo das amostras, foi constatado que as amostras A1T6, A2T6 e A3T6 apresentaram as melhores características de largura e altura do cordão e as configurações destes foram selecionadas para as amostras do grupo B. A amostra A3T12, sendo uma variante da amostra A3, também foi avaliada no grupo B para estudo dos efeitos da velocidade de deslocamento da tocha. Também foi constatado que a inclinação da tocha em 45° não beneficiou a qualidade da geometria para deposições simples de cordão, como visto nas amostras A1T8+45 e A1T8-45.

4.1.2 Amostras do grupo B

Para o grupo B, as amostras foram submetidas a diferentes direções de deposição e DBCP para as configurações A2T6, A3T6 e A3T12 do grupo A com arco contínuo e interrompido. Os parâmetros utilizados para cada amostra encontram-se registrado na Tabela 16.

A distância inicial admitida para o DBCP foi de 12 mm, podendo seguir a deposição com um passo fixo entre cada camada ou corrigindo a altura para cada camada para as deposições com arco interrompido, com o objetivo de manter a deposição sempre constante quanto ao DBCP. A amostra B3T6_Bic em especial utilizou distâncias de subida da tocha para cada camada baseando nas medidas de altura das camadas feitas na amostra B3T6_Bii, variando a subida da tocha para cada camada depositada.

Grupo B – Parâmetros médios utilizados					
Amostras	Corrente (A)	Voltagem (V)	V_{arame} (m/min)	$V_{deposição}$ (mm/s)	Deposição / arco
B3T6f_Uni (passo fixo 1,2 mm)	138	20,8	5,0	6,0	Unidirecional / interrompido
B3T6c_Uni (DBCP 12 mm)	137	20,9	5,3	6,0	Unidirecional / interrompido
B3T6c_Bidi (DBCP 12 mm)	137	20,9	5,3	6,0	Bidirecional / interrompido
B3T6c_Bidc (DBCP 12 mm aproximado)	NR	NR	NR	6,0	Bidirecional / contínuo
B3T12f_Bidc (passo fixo 2,1 mm)	139	20,2	6,2	12,0	Bidirecional / contínuo

*NR – não registrado

Tabela 16 Parâmetros utilizados para as amostras do grupo B.

A Figura 63 apresenta a amostra B3T6f_Uni, que obteve uma largura constante ao longo dos pontos de medição, porém também resultou em um desnível elevado entre os pontos A e N, causado pelo alto gradiente de temperatura entre os pontos. No ponto A é a região de abertura do arco elétrico, com a peça inicialmente à uma temperatura menor no início da deposição das camadas, tornando a região menos estressada termicamente. Para o ponto N, trata-se da região de parada da tocha, que concentra o calor na região durante o processo de interrupção do arco elétrico. Pontos de escorrimento de material das camadas também podem ser visualizados na figura, ocasionados pela concentração de calor e, conseqüentemente, expansão da poça de fusão.

Quanto a distância bico de contato-peça, percebeu-se que a subida fixa de 1,20 mm da tocha para deposição de cada camada por um lado era muito pequena na região dos pontos A, B, C e D, porém tornava-se acima do ideal, que é de até 13 mm para o processo CMT-GMAW, para os pontos finais de deposição, devido ao desnível, necessitando uma correção maior da fonte para estabilizar o arco elétrico. Para resolver essa questão, optou-se em corrigir a altura de elevação da tocha manualmente para a amostra B3T6-Uni, diante a altura dos cordões depositados.

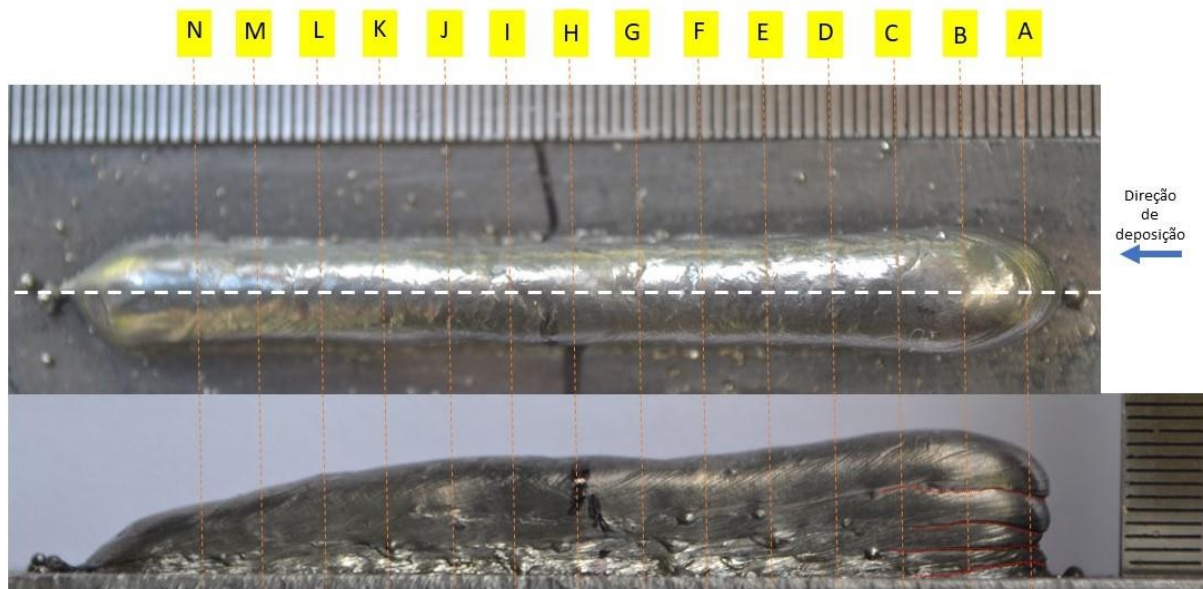


Figura 63 Amostra B3T6f_Uni - Parede de 5 camadas com deposição unidirecional e subida fixa da tocha em 1,2 mm por camada.

Amostra B3T6f_Uni - Parede de 5 camadas com subida fixa da tocha em 1,2 mm por camada															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Média
Média	11,00	11,24	11,30	10,62	10,04	9,56	9,28	9,38	9,18	9,08	8,62	7,96	6,94	5,54	9,27
DP	0,21	0,17	0,42	0,39	0,34	0,50	0,58	0,44	0,39	0,33	0,33	0,27	0,27	0,46	1,64
Largura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Média
Média	8,48	10,46	8,96	8,34	8,34	8,12	7,70	8,08	7,22	8,00	7,64	7,46	7,82	8,74	8,24
DP	0,25	0,17	0,27	0,50	0,40	0,44	0,21	0,25	0,25	0,21	0,17	0,17	0,14	0,34	0,80

Tabela 17 Medições de altura e largura da amostra B3T6f_Uni.

Para reduzir o desnível comparado com a amostra B3T6f_Uni, a amostra B3T6c_Uni, presente na Figura 64, trabalhou-se com um controle da temperatura de interpasse em 30°C. Apesar disso, o desnível de altura ainda permaneceu presente ao longo do comprimento, mas dessa vez mais suavizado em relação à amostra B3T6f_Uni. Visualizando a disposição entre as camadas, é possível detectar que a linha da superfície segue constante até o ponto K antes de decair, sendo que na amostra B3T6f_Uni, o decaimento da altura é visível logo nos primeiros pontos de medição. A largura se manteve constante ao longo do cordão e o acabamento superficial melhorou em relação à amostra B3T6f_Uni, provavelmente devido ao ajuste na DBCP.

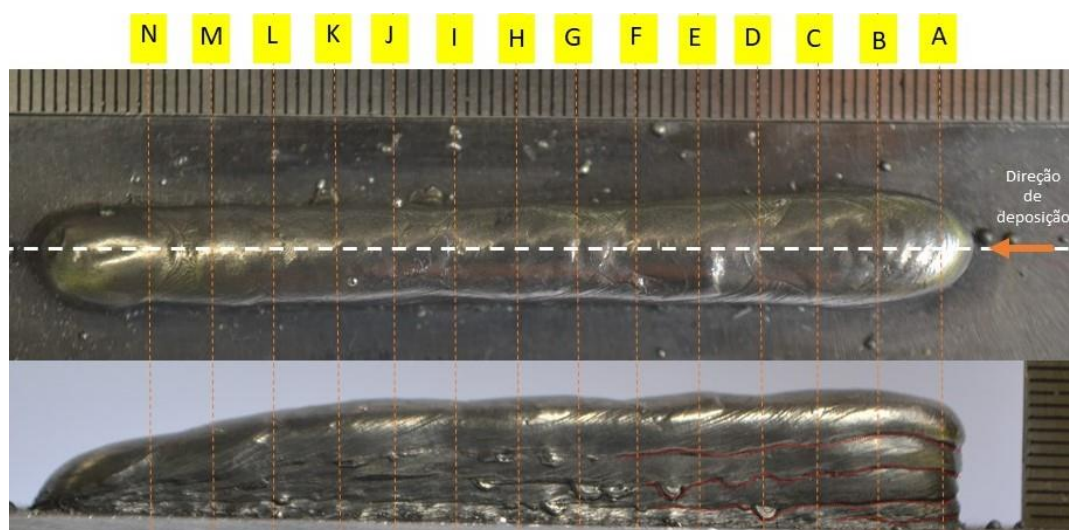


Figura 64 Amostra B3T6c_Uni - Parede de 5 camadas com DBCP constante em 12 mm.

Amostra B3T6c_Uni - Parede de 5 camadas com DBCP constante em 12 mm															
Altura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Média
Média	10,68	11,06	11,02	10,54	10,46	9,96	10,08	9,68	9,28	9,60	9,02	8,02	5,96	4,92	9,31
DP	0,25	0,27	0,44	0,40	0,34	0,27	0,14	0,44	0,39	0,21	0,25	0,39	0,46	0,39	1,84
Largura															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Média
Média	7,58	9,56	9,06	8,72	8,62	8,12	8,18	8,10	7,54	8,00	7,88	8,32	8,16	8,62	8,32
DP	0,39	0,17	0,17	0,25	0,14	0,33	0,39	0,30	0,17	0,00	0,25	0,33	0,17	0,14	0,56

Tabela 18 Medições de altura e largura da amostra B3T6c_Uni.

Como alternativa para a solução do desnível presentes nas amostras B3T6f_Uni e B3T6c_Uni, a amostra B3T6c_Bidi, presente na Figura 65, foi depositada seguindo uma trajetória bidirecional com controle da temperatura de interpasse em 30°C. O objetivo da mudança foi reduzir o gradiente térmico ao longo de todo o cordão, e assim possuir maior controle do fluxo de material ao longo da deposição. A amostra apresentou largura e altura constantes ao longo do comprimento da parede, com apenas uma região de desnível reduzida a partir do ponto M. A superfície da parede apresentou três regiões de depressão devido à contração do material durante a solidificação, destacado na Figura 65 nos pontos C, H e J, que prejudicaram a qualidade superficial do cordão, porém não afetaram as características geométricas de forma agressiva.

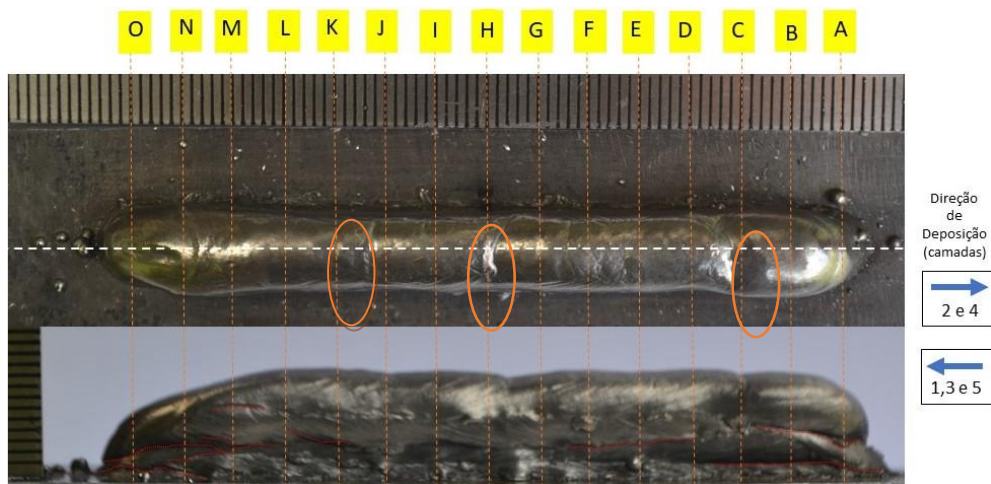


Figura 65 Amostra B3T6c_Bidi - Parede de 5 camadas com DBCP constante em 12 mm e deposição bidirecional.

Amostra B3T6_Bidi - Parede de 5 camadas com DBCP constante em 12 mm e deposição bidirecional																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Média
Média	8,20	9,96	9,98	10,16	10,10	10,16	10,06	9,96	10,08	10,00	10,16	10,12	9,80	8,12	6,68	9,57
DP	0,21	0,17	0,25	0,46	0,30	0,34	0,27	0,27	0,25	0,00	0,17	0,25	0,56	0,72	0,25	1,04
LARGURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Média
Média	6,72	8,80	8,56	8,00	8,04	7,90	8,24	8,14	7,90	7,98	8,06	8,28	9,12	9,08	7,14	8,13
DP	0,58	0,21	0,17	0,21	0,27	0,00	0,17	0,17	0,21	0,25	0,27	0,14	0,33	0,14	0,27	0,64

Tabela 19 Medições de altura e largura da amostra B3T6c_Bidi.

Por conta do controle da temperatura de interpasse, a deposição da amostra B3T6c_Bidi necessitou de um tempo elevado de espera entre a deposição das camadas. Sendo assim, para a amostra B3T6c_Bidc, representada na Figura 66, optou-se em realizar a deposição contínua das camadas para analisar os efeitos.

Vale ressaltar que a subida da tocha para a deposição de cada camada foi determinada de acordo com as alturas das camadas da amostra B3T6c_Uni, buscando manter um valor de DBCP próximo dos 12 mm para uma deposição contínua.

Apesar de a amostra apresentar uma boa qualidade superficial, a parede apresentou uma largura excessiva, com variação expressiva ao longo do comprimento, como visto pelas linhas vermelhas na Figura 66, e uma altura menor que as amostras anteriores devido ao alto aporte térmico que a amostra foi submetida, gerando características pouco benéficas para o objetivo.

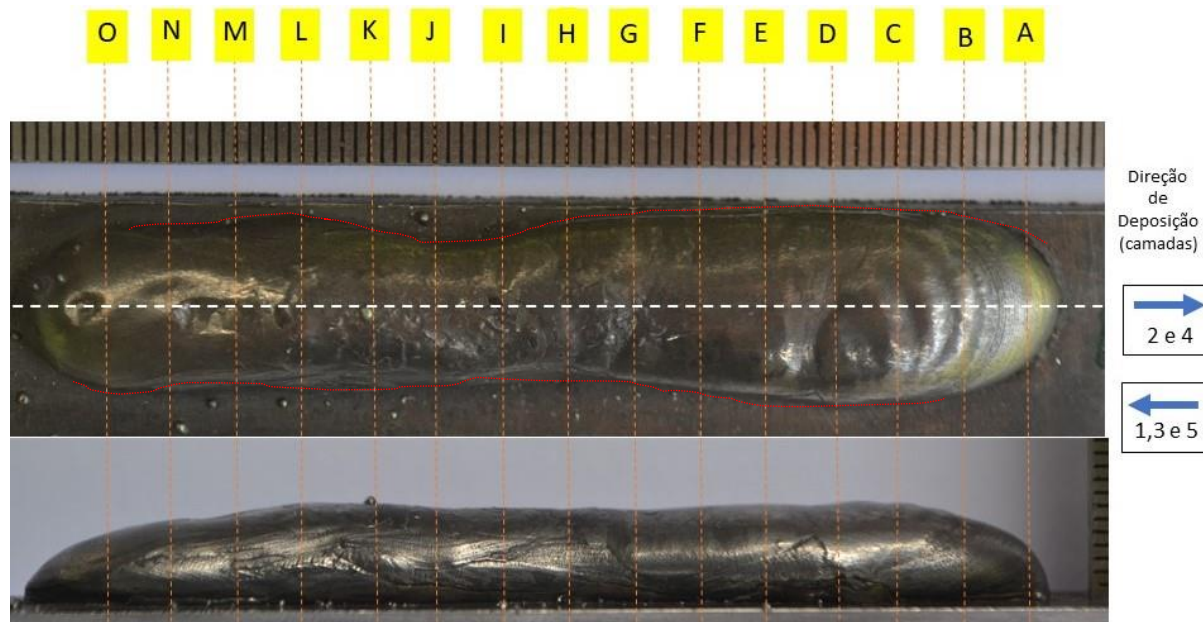


Figura 66 Amostra B3T6c_Bidc -Parede de 5 camadas com DBCP aproximado em 12 mm e deposição bidirecional contínua.

Amostra B3T6c_Bidc - Parede de 5 camadas com DBCP aproximado de 12 mm e deposição bidirecional contínua (Vd=6mm/s)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Média
Média	5,24	6,56	7,02	6,74	6,82	6,62	6,38	6,42	6,58	6,98	7,22	6,96	6,12	5,80	4,98	6,43
DP	0,50	0,59	0,25	0,17	0,39	0,54	0,58	0,49	0,44	0,44	0,14	0,27	0,33	0,52	0,65	0,65
LARGURA																
Média	12,06	14,26	14,92	14,30	13,54	12,88	12,04	11,50	11,18	11,80	13,16	13,04	12,70	12,62	10,82	12,72
DP	0,34	0,17	0,25	0,21	0,17	0,25	0,17	0,30	0,25	0,21	0,17	0,27	0,00	0,14	0,25	1,19

Tabela 20 Medições de altura e largura da amostra B3T6c_Bidc.

Como uma tentativa de reduzir a largura do cordão, optou-se em aumentar a velocidade de deslocamento da tocha de 6 mm/s para 12 mm/s para a amostra B3T12f_Bidc, apresentada na Figura 67. A subida da tocha para cada camada também foi aumentada para 2,1 mm a fim de que não houvesse uma aproximação tão grande da tocha com a parede como ocorreu na amostra B3T6f_Uni.

Com a variação da velocidade de deslocamento da tocha, a amostra apresentou uma redução expressiva da largura, porém ainda com a acentuação nas extremidades devido ao maior aporte térmico na região. Para amenizar tal efeito, as amostras seguintes, dos grupos C e D, foram depositadas com um comprimento maior para facilitar no resfriamento da peça durante a deposição e evitar o espalhamento da poça de fusão.

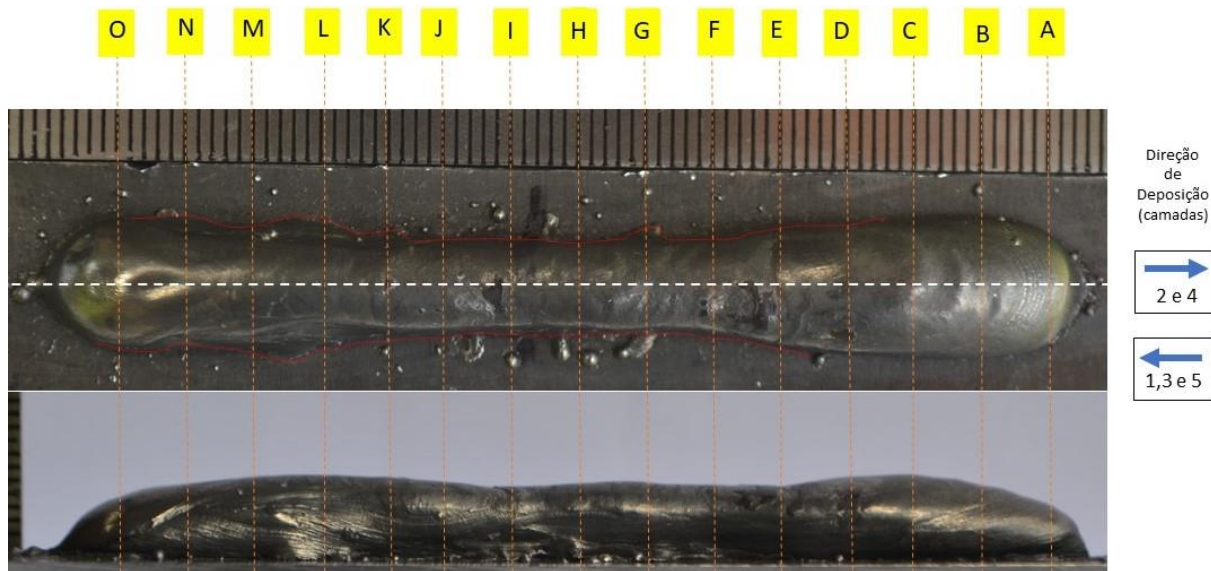


Figura 67 Amostra B3T12f_Bidc - Parede de 5 camadas com subida fixa em 2,1 mm por camada e deposição bidirecional contínua.

Amostra B3T12f_Bidc - Parede de 5 camadas com subida fixa em 2,1 mm por camada e deposição bidirecional contínua (Vd = 12mm/s)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	média
Média	3,76	5,12	6,02	6,06	5,50	5,14	5,34	5,50	5,06	5,36	5,76	6,22	5,92	6,12	4,50	5,39
DP	0,62	0,25	0,25	0,34	0,47	0,27	0,50	0,42	0,17	0,69	0,34	0,25	0,33	0,25	0,21	0,64
LARGURA																
Média	8,74	10,40	10,22	9,84	9,06	7,08	7,00	6,90	6,92	7,38	7,10	8,92	9,16	9,84	9,26	8,51
DP	0,50	0,21	0,25	0,17	0,17	0,25	0,21	0,30	0,14	0,44	0,37	0,62	0,27	0,17	0,17	1,30

Tabela 21 Medições de altura e largura da amostra B3T12f_Bidc.

4.1.2.1 Análise geral do grupo B

O comparativo das alturas entre as amostras está presente na Figura 68, onde é possível visualizar que a amostra B3T6c_Bidi apresentou a maior estabilidade da altura ao longo da parede, apresentando um desvio padrão de 3,12 mm ao longo de toda a amostra.

É possível também visualizar a sutil melhoria da amostra B3T6c_Uni em relação à B3T6f_Uni nos pontos intermediários de E à K, porém apesar do controle da temperatura de interpasse, o final do cordão apresentou uma altura menor que a amostra B3T6f_Uni. O desvio padrão dos valores médios dos pontos medidos foi de 4,93 mm e 5,53 mm para as amostras B3T6f_Uni e B3T6c_Uni, respectivamente.

Para a configuração da fonte utilizada (ajuste da amostra A3T6 e A3T12) visualizou-se que a deposição bidirecional contínua não foi efetiva na construção da parede, com as amostras B3T6_Bidc e B3T12f_Bidc apresentando uma altura bem inferior às demais. Os desvios padrões das medições da altura para as amostras B3T6c_Bidc e B3T12f_Bidc são de 3,57 mm e 3,89 mm respectivamente.

Para a largura das amostras, a Figura 69 apresenta o comparativo entre todas as amostras. É possível visualizar que a amostra B3T6c_Bidc destoa significativamente em relação às demais amostras do grupo B e como a velocidade de deslocamento da tocha influencia a largura do cordão comparando as amostras B3T6c_Bidc e B3T12f_Bidc, que apresentaram um desvio padrão dos valores médios de 3,57 mm e 3,89 mm respectivamente. A amostra B3T6f_Uni apresentou o menor desvio padrão dentre as amostras, com 1,67 mm, seguidos pela amostra B3T6c_Bidi, com 1,91 mm e a amostra B3T6f_Uni com 2,40 mm.

Avaliando as amostras do grupo B, a Figura 70 apresenta o comparativo das amostras quanto a qualidade superficial, geometria e aporte térmico, assim como realizando no grupo A. A amostra B3T6c_Bidi apresentou a melhor geometria dentro do grupo, enquanto a amostra B3T6c_Bidc apresentou as piores características quanto a largura e altura do cordão. Quanto ao aporte térmico, a

amostra B3T6c_Bidi apresentou melhor distribuição do aporte térmico devido ao controle da temperatura de interpasse e a deposição bidirecional do cordão.

Grupo B - Altura

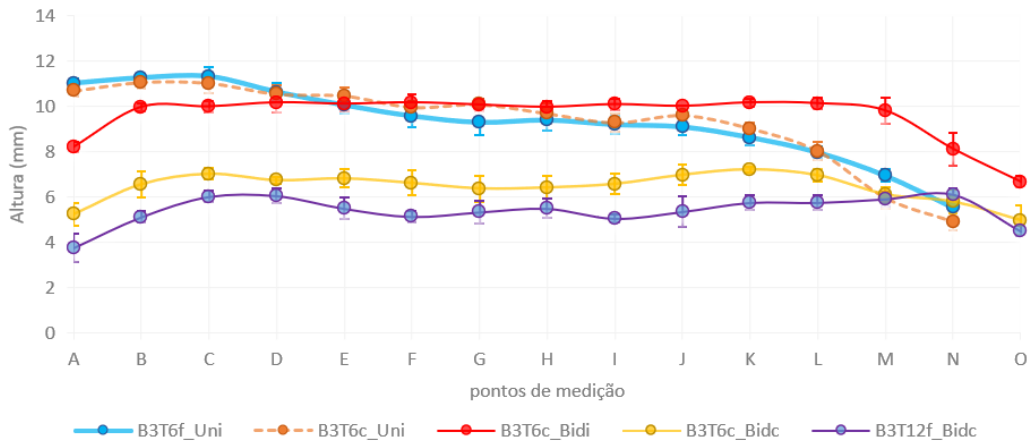


Figura 68 Comparativo das amostras grupo B – Altura.

Grupo B - Largura

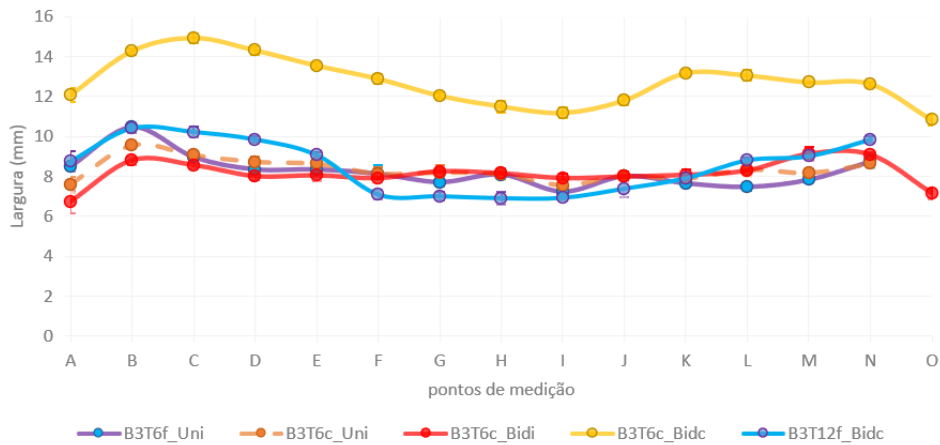


Figura 69 Comparativo das amostras do grupo B - Largura.

Comparativo amostras - Grupo B

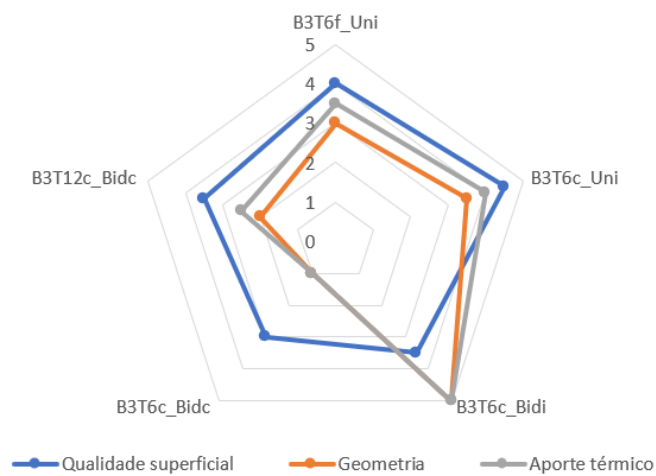


Figura 70 Análise de qualidade para as amostras do grupo B.

Baseando os resultados obtidos no grupo B, decidiu-se por confeccionar paredes de maior comprimento, com o intuito de prolongar mais os ciclos térmicos e possibilitar um melhor resfriamento. Os métodos de deposição bidirecional e unidirecional ainda serão avaliados para determinação da influência para deposições de maior comprimento.

4.1.3 Amostras do Grupo C

O grupo C consistiu na deposição de 5 amostras com 10 camadas, utilizando os parâmetros de tensão e corrente utilizados na configuração 3. O objetivo foi observar a influência do comprimento para o ciclo térmico, e comparar a influência da velocidade de deposição e da distância bocal-peça na deposição. Os parâmetros utilizados para o grupo C estão registrados na Tabela 22.

Grupo C – Parâmetros médios utilizados					
Amostras	Corrente (A)	Voltagem (V)	V _{arame} (m/min)	V _{deposição} (mm/s)	Deposição / arco
C3T6f_Bidc (passo fixo 1,9 mm)	141	20,5	5,6	6,0	Bidirecional / contínuo
C3T12f_Bidc (passo fixo 1,9 mm)	NR	NR	NR	12,0	Bidirecional / contínuo
C3T12f_Bidc2 (passo fixo 1,2 mm)	NR	NR	NR	12,0	Bidirecional / contínuo
C3T12f_Uni (passo fixo 1,2 mm)	143	19,8	5,1	12,0	Unidirecional / interrompido
C3T24f_Bidc (passo fixo 1,0 mm)	NR	NR	NR	24,0	Bidirecional / contínuo

*NR – Não registrado

Tabela 22 Parâmetros utilizados para as amostras do grupo C.

Para a amostra C3T6f_Bidc, presente na Figura 71, utilizou-se uma velocidade de deslocamento da tocha de 6 mm/s, com passo fixo de 1,9 mm para cada camada das 10 depositadas com 160 mm de comprimento, iniciando de um DBCP de 12 mm. A amostra apresentou um colapso da poça de fusão, circulado na figura, durante a deposição da última camada, ocasionado pelo intenso aporte térmico aplicado na região pela mudança de trajetória da tocha. A largura ao longo do cordão também apresentou variações e deformações devido ao stress térmico. Apesar disso, o cordão apresentou uma altura constante durante todos os pontos de medição até a região colapsada.

Com isso, optou-se em aumentar a velocidade de deslocamento da tocha para 12 mm/s na amostra C3T12f_Bidc, com o objetivo de reduzir o stress térmico nas regiões de mudança da trajetória da tocha e, em consequência, melhorar o acabamento superficial e reduzir a largura da parede.

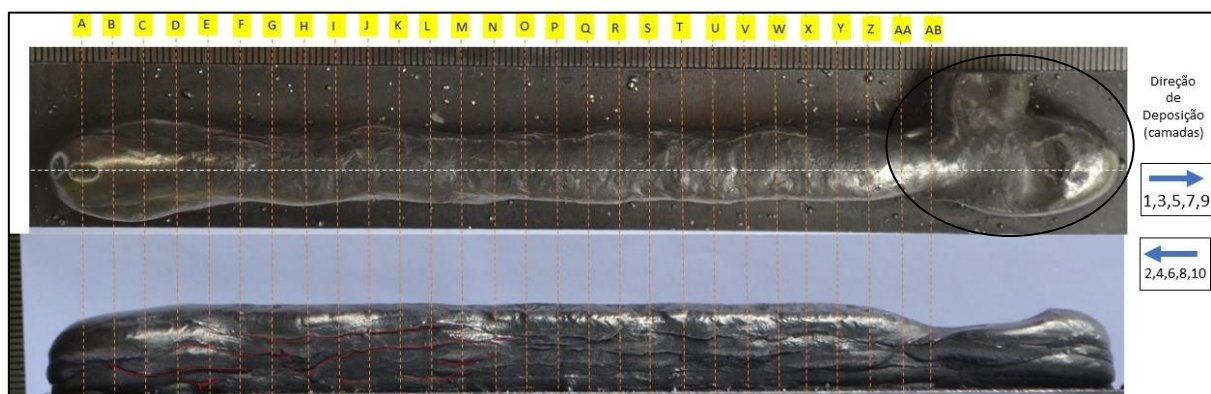


Figura 71 Amostra C3T6f_Bidc - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,9 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo.

Amostra C3T6f_Bidc - Parede de 10 camadas com subida fixa em 1,9 mm por camada (DBPC inicial = 12mm) e deposição bidirecional com arco contínuo (Vd = 6mm/s) (L= 160mm)															
ALTURA															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Média	11,26	12,78	13,10	13,66	13,92	14,34	13,84	13,78	14,04	14,04	13,98	13,82	13,78	13,80	14,06
DP	0,50	0,25	0,37	0,27	0,39	0,46	0,46	0,68	0,17	0,59	0,54	0,49	0,14	0,37	0,17
LARGURA															
Média	12,28	14,82	16,36	15,34	13,98	12,60	11,54	12,18	11,56	12,32	11,76	10,88	10,94	10,96	10,56
DP	0,44	0,39	0,17	0,34	0,44	0,21	0,17	0,25	0,17	0,25	0,34	0,14	0,17	0,17	0,17
ALTURA															
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	média	
Média	14,02	13,96	14,02	14,16	14,22	14,06	14,08	14,30	14,30	14,24	13,82	12,86	11,60	13,71	
DP	0,14	0,34	0,25	0,50	0,25	0,17	0,33	0,21	0,56	0,40	0,39	0,69	0,56	2,26	
LARGURA															
Média	10,64	11,56	11,90	11,60	11,24	11,30	11,08	11,82	11,90	12,14	11,72	15,58	12,48	12,25	
DP	0,17	0,46	0,71	0,30	0,17	0,21	0,25	0,39	0,30	0,17	0,44	0,25	0,39	4,62	

Tabela 23 Medições de altura e largura da amostra C3T6f_Bidc.

A deposição da amostra C3T12f_Bidc, presente na Figura 72, utilizou uma velocidade de deslocamento da tocha de 12 mm/s, resultando em uma melhoria da estabilidade da altura e largura da parede em relação à amostra C3T6f_Bidc, com pequenas variações até ponto AA. Porém, devido a problemas de configuração do robô cartesiano, a tocha estagnou por alguns segundos, concentrando o arco na região, colapsando-a. Percebeu-se também que o valor selecionado para o passo de subida da tocha foi elevado em relação à altura da camada. Para reavaliação da configuração utilizada, realizou-se a deposição da amostra C C3T12f_Bidc2 com a mesma velocidade de deposição e comprimento, com o ajuste da subida da tocha para 1,2 mm.

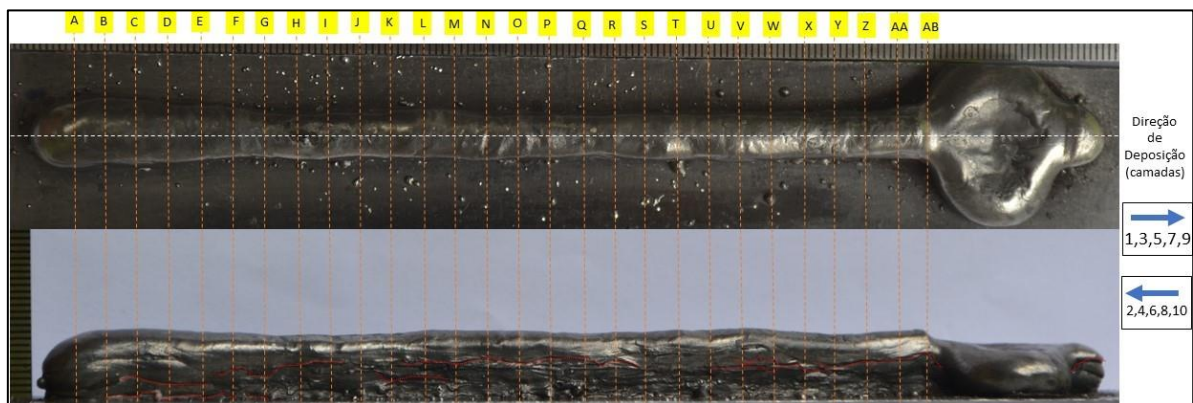


Figura 72 Amostra C3T12f_Bidc - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,9 mm e deposição bidirecional com arco contínuo.

Amostra C3T12f_Bidc – Parede de 10 camadas com subida fixa em 1,9 mm por camada (DBPC inicial = 12mm) e deposição bidirecional com arco contínuo (Vd = 12 mm/s) (L=160 mm)															
ALTURA															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Média	9,00	10,30	10,70	10,44	9,82	9,72	9,64	9,60	9,24	9,28	9,94	10,18	10,06	10,20	10,16
DP	0,30	0,21	0,21	0,46	0,33	0,54	0,55	0,52	0,17	0,58	0,17	0,65	0,50	0,21	0,34
LARGURA															
Média	9,74	11,68	11,14	10,84	9,76	9,12	8,20	7,48	7,84	8,04	8,50	8,52	8,34	7,84	8,00
DP	0,50	0,33	0,46	0,27	0,17	0,14	0,30	0,14	0,17	0,17	0,37	0,14	0,34	0,17	0,00
ALTURA															
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	Média	
Média	9,90	9,54	9,92	10,02	10,12	10,26	10,60	10,12	9,82	9,64	9,92	10,10	10,06	9,94	
DP	0,56	0,17	0,25	0,14	0,33	0,50	0,37	0,58	0,25	0,34	0,25	0,21	0,27	1,18	

Tabela 24 Medições de altura e largura da amostra C3T12f_Bidc.

LARGURA														
Média	7,50	7,30	7,24	7,74	7,64	8,02	8,08	7,58	7,62	7,74	7,42	7,84	8,10	8,39
DP	0,21	0,00	0,17	0,17	0,17	0,25	0,14	0,14	0,14	0,46	0,14	0,34	0,35	3,56

Continuação da Tabela 24 Medições de altura e largura da amostra C3T12f_Bidc.

Para a amostra C3T12f_Bidc2, apresentada na Figura 73, foi reproduzido a configuração da amostra C3T12f_Bidc, com o ajuste da distância de subida da tocha para 1,2 mm. A parede apresentou valores de altura estáveis, com uma altura média de 10,46 mm, e largura média de 8,30 mm, com oscilações na região dos pontos de medição de X até AD, destacado em vermelho na figura. O desvio padrão para a altura e largura da camada foi de 1,82 mm e 3,42 mm, respectivamente. A qualidade superficial foi levemente inferior à amostra C3T12f_Bidc, mas sem afetar a integridade do cordão.

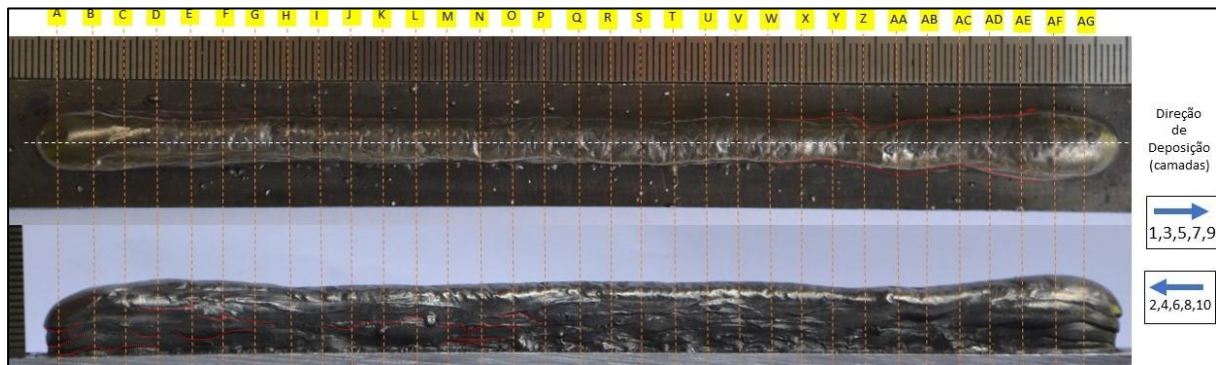


Figura 73 Amostra C3T12f_Bidc2 - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,2 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo.

Amostra C3T12f_Bidc2 - Parede de 10 camadas com subida fixa em 1,2 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo (Vd = 12 mm/s) (L = 160 mm)															
ALTURA															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Média	9,12	10,30	10,94	11,12	10,96	10,76	10,14	9,74	9,60	9,92	10,06	10,04	10,06	10,36	10,36
DP	0,49	0,47	0,27	0,58	0,27	0,27	0,34	0,17	1,85	0,14	0,17	0,17	0,27	0,40	0,40
LARGURA															
Média	9,60	9,86	10,00	9,18	9,16	9,12	8,60	7,50	7,18	7,56	7,66	7,36	7,36	7,72	7,60
DP	0,30	0,17	0,00	0,14	0,17	0,14	0,21	0,21	0,14	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,00
ALTURA															
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
Média	10,66	10,68	10,52	10,58	10,56	10,86	10,66	10,10	10,00	9,94	9,90	10,00	10,54	11,00	11,74
DP	0,17	0,14	0,25	0,25	0,46	0,17	0,55	0,30	0,00	0,27	0,30	0,37	0,27	0,00	0,17
LARGURA															
Média	7,38	7,40	7,60	7,70	7,32	7,70	7,50	7,30	7,08	8,24	7,42	7,78	7,76	8,68	10,36
DP	0,14	0,00	0,00	0,21	0,14	0,00	0,21	0,00	0,25	0,17	0,14	0,14	0,17	0,14	0,17
ALTURA															
	AE	AF	AG	média											
Média	11,96	11,54	10,46	10,46											
DP	0,17	0,55	0,66	1,82											
LARGURA															
Média	10,88	10,72	9,54	8,30											
DP	0,14	0,25	0,40	3,42											

Tabela 25 Medições de altura e largura da amostra C3T12f_Bidc2.

Utilizando os mesmos parâmetros de deposição, a amostra C3T12f_Uni, apresentada na Figura 74, foi depositada seguindo a trajetória de deposição unidirecional e respeitando uma temperatura de interpasse de 70°C. Com isso foi avaliado o impacto da trajetória e da temperatura de interpasse na altura da parede. A amostra manteve uma largura menor que outras amostras do grupo, com uma largura média de 6,20 mm, e apresentou uma altura média de 12,94 mm, maior que a amostra C3T12f_Bidc2. Porém devido a deposição unidirecional, a variação de altura na amostra foi maior que

as demais amostras do grupo C, com um desvio padrão de 5,55 mm. A parede também apresentou um bom acabamento superficial, com poucos respingos presentes na parede.

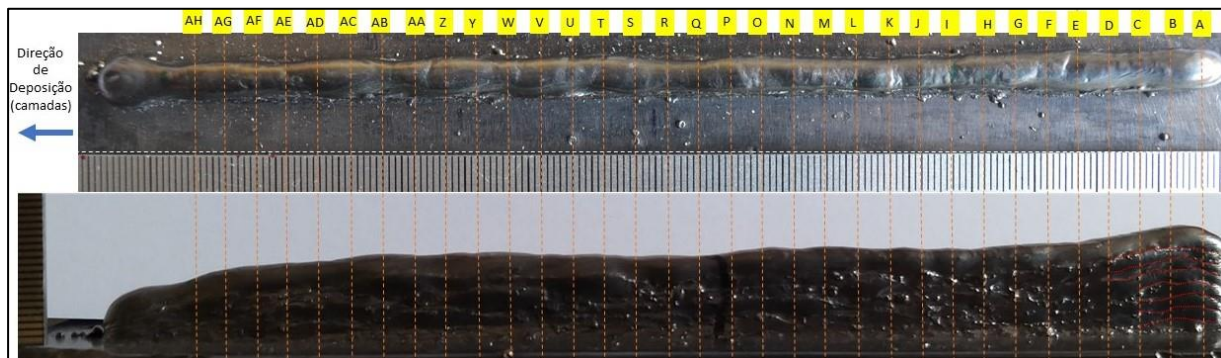


Figura 74 Amostra C3T12f_Uni - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,2 mm por camada e deposição unidirecional e temperatura de interpasse 70°C.

Amostra C3T12f_Uni - Parede de 10 camadas com subida fixa em 1,2 mm por camada e deposição unidirecional e temperatura de interpasse 70°C (Vd = 12 mm/s)															
ALTURA															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Média	15,66	16,82	16,46	15,58	14,72	14,2	14,1	13,88	13,54	13,52	13,62	13,68	13,58	13,86	13,66
DP	0,40	0,14	0,27	0,39	0,72	0,30	0,21	0,25	0,27	0,14	0,44	0,25	0,54	0,46	0,27
LARGURA															
Média	5,90	6,38	6,22	6,80	6,80	6,20	5,88	5,62	5,82	5,44	5,60	5,72	5,56	5,96	5,74
DP	0,30	0,25	0,14	0,21	0,42	0,21	0,25	0,25	0,25	0,34	0,37	0,14	0,27	0,27	0,17
ALTURA															
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
Média	13,42	12,46	12,08	12,00	12,18	12,36	12,36	12,44	12,76	12,70	12,52	12,46	12,50	11,36	11,20
DP	0,49	0,40	0,54	0,42	0,25	0,34	0,34	0,17	0,17	0,30	0,39	0,34	0,37	0,34	0,56
LARGURA															
Média	5,38	5,88	5,68	6,28	6,38	6,80	6,16	6,76	7,22	6,50	6,08	6,68	6,74	6,02	5,94
DP	0,25	0,33	0,14	0,62	0,68	0,21	0,46	0,17	0,39	0,37	0,65	0,14	0,34	0,54	0,34
ALTURA															
	AE	AF	AG	AH	média										
Média	10,86	10,44	9,24	7,78	12,94										
DP	0,78	0,55	0,55	0,49	5,55										
LARGURA															
Média	6,34	6,20	6,12	8,10	6,20										
DP	0,27	0,21	0,49	0,21	1,70										

Tabela 26 Medições de altura e largura da amostra C3T12f_Uni.

Ainda para o grupo C, foi avaliado o efeito de uma deposição de alta velocidade para o estudo da otimização do tempo de deposição. Para isso, a amostra C3T24f_Bidc, apresentada na Figura 75, foi depositada para uma velocidade de 24 mm/s, com uma subida fixa de 1 mm, com o objetivo de avaliar o efeito da velocidade para uma deposição de 10 camadas. O efeito de pré-humping também se tornou presente de forma similar à amostra A3T18, com a parede depositada apresentando variações da altura e largura devido ao fluxo descontínuo de material gerado pela alta velocidade de deslocamento da tocha. Também houve a presença de uma pequena região que ocorreu o rechupe de cratera, destacado com o círculo amarelo. A amostra obteve uma altura e largura médias de 7,00 mm e 6,31 mm respectivamente, com o desvio padrão de 2,101 mm e 3,389 mm para as medidas.

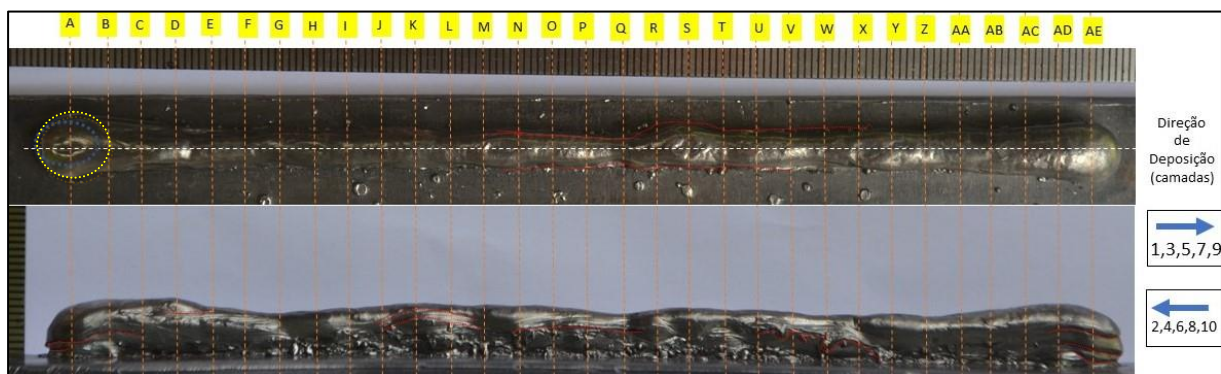


Figura 75 Amostra C3T24f_Bidc - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo.

Amostra C3T24f_Bidc - Parede de 10 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo (Vd = 24 mm/s) (L = 150 mm)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Média	7,00	8,12	7,96	7,98	6,82	5,96	5,84	6,12	6,52	6,92	7,16	7,08	7,12	7,00	6,80	
DP	0,213	0,135	0,267	0,135	0,537	0,342	0,165	0,252	0,252	0,444	0,267	0,252	0,330	0,213	0,213	
LARGURA																
Média	9,20	8,98	7,76	7,02	6,14	5,56	5,84	5,40	5,72	5,70	6,06	6,00	5,38	5,96	5,38	
DP	0,300	0,492	0,267	0,135	0,165	0,267	0,165	0,213	0,135	0,213	0,267	0,213	0,252	0,165	0,135	
ALTURA																
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
Média	6,40	5,98	6,72	6,96	6,94	7,12	6,66	6,30	6,82	6,84	6,52	7,14	7,42	8,36	8,84	7,44
DP	0,474	0,135	0,252	0,621	0,267	0,252	0,267	0,366	0,252	0,342	0,390	0,267	0,537	0,456	0,267	0,915
LARGURA																
Média	5,04	5,20	5,42	6,30	5,42	6,38	5,34	5,76	5,78	6,04	5,64	6,58	6,64	7,24	8,50	8,18
DP	0,267	0,213	0,390	0,213	0,135	0,492	0,165	0,267	0,252	0,342	0,165	0,330	0,165	0,165	0,213	0,390
ALTURA	LARGURA															
Média	7,00	Média	6,31													
DP	2,101	DP	3,389													

Tabela 27 Medições de altura e largura da amostra C3T24f_Bidc.

4.1.3.1 Análise geral do grupo C

Para o comparativo das amostras, a Figura 76 apresenta o gráfico para a altura das amostras do grupo C, ao longo dos pontos de medição. A amostra C3T6f_Bidc, apesar de apresentar um colapso após o ponto AB, apresentou um perfil bem retilíneo ao longo dos pontos de medição. As amostras C3T12f_Bidc e C3T12f_Bidc2 apresentaram características similares quanto à altura, com alguns pontos onde a amostra C3T12f_Bidc2 apresentou alturas maiores. É possível visualizar também a mudança de perfil da amostra C3T12f_Uni em relação as demais por influência da direção de deposição. Por fim, a amostra C3T24f_Bidc apresentou a menor altura dentre as amostras, com a presença de grandes flutuações ao longo dos pontos de medição ocasionados pelo efeito de pré-humping.

Quanto à largura, a Figura 77 apresenta o comparativo das amostras do grupo C, onde a amostra C3T6f_Uni apresentou os maiores valores dentre as amostras, devido à velocidade de 6 mm/s para o deslocamento da tocha. Para as amostras C3T12f_Bidc e C3T12f_Bidc2, para o deslocamento da tocha em 12 mm/s, a largura do cordão diminuiu consideravelmente, de uma largura média de 12,25 mm na amostra C3T6f_uni, para 8,39 mm e 8,30 mm para as amostras C3T12f_Bidc e C3T12f_Bidc2 respectivamente. A amostra C3T12f_Uni, devido ao método de deposição unidirecional e o controle das temperaturas de interpasse, reduziu ainda mais a largura do cordão em comparação as amostras anteriores, com uma largura média medida de 6,20 mm. Por último a amostra C3T24f_Bidc, apesar de utilizar uma velocidade de deslocamento da tocha de 24 mm/s, apresentou uma largura média maior que a amostra C3T12f_Uni, com uma média de 6,31 mm.

Grupo C - Altura

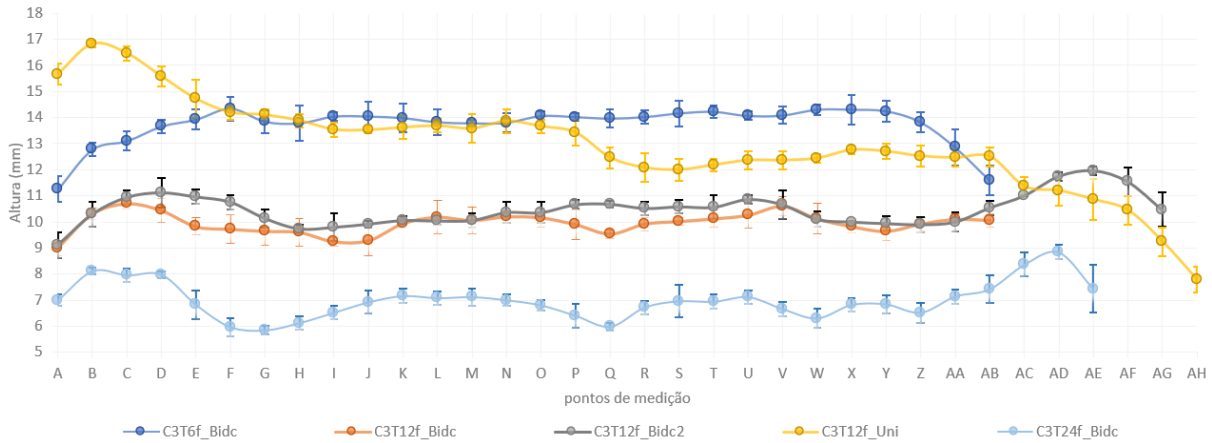


Figura 76 Comparativo das amostras grupo C – Altura.

A amostra C3T12f_Uni apresentou o menor desvio padrão dentre as amostras do grupo C, sendo de 1,69 mm, sendo que as amostras C3T6f_Bidc, C3T12f_Bidc, C3T12f_Bidc2 e C3T24f_Bidc apresentaram um desvio padrão da média dos pontos de 4,62 mm, 3,56 mm, 3,42 mm e 3,39 mm, respectivamente.

Grupo C - Largura

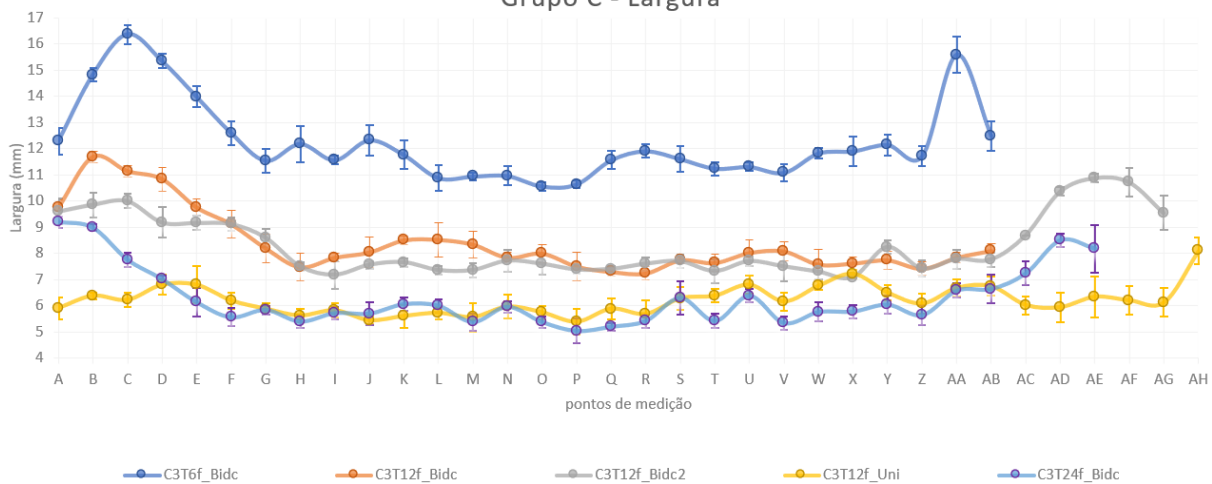


Figura 77 Comparativo das amostras grupo C – Largura.

Avaliando no aspecto geral as amostras do grupo C, a Figura 78 apresenta o comparativo para os quesitos de qualidade superficial, geometria e aporte térmico. A amostra C3T12f_Uni, apesar de apresentar uma variação considerável da altura ao longo dos pontos de medição devido ao método de deposição unidirecional, foi a amostra que apresentou as melhores características, com a menor e mais estável largura da parede e com altura média maior que as amostras C3T12f_Bidc, C3T12f_Bidc2 e C3T24f_Bidc. A amostra C3T12f_Bidc2 foi a segunda amostra mais bem avaliada, levemente superior a amostra C3T12f_Bidc tanto para a altura quanto para a largura. A amostra C3T24f_Bidc foi a que apresentou as piores características, determinando-se que a velocidade de deslocamento da tocha de 24 mm/s ultrapassa os limites de estabilidade das camadas depositadas, sendo este valor desconsiderado nos testes seguintes.

Com a análise do grupo C, percebe-se a forte influência do comprimento na geração da geometria, comparando com as amostras do grupo B. Foi evidente o colapso da poça de fusão devido ao aquecimento excessivo como uma séria problemática para deposições contínuas mais extensas em relação ao tempo. Sendo assim, decidiu-se avaliar o estresse térmico de forma mais atenuante para a deposição de peças maiores, utilizando parâmetros de deposição menores que os utilizados no grupo C, a fim de evitar colapsos semelhantes ao ocorrido na amostra C3T6f_Bidc.

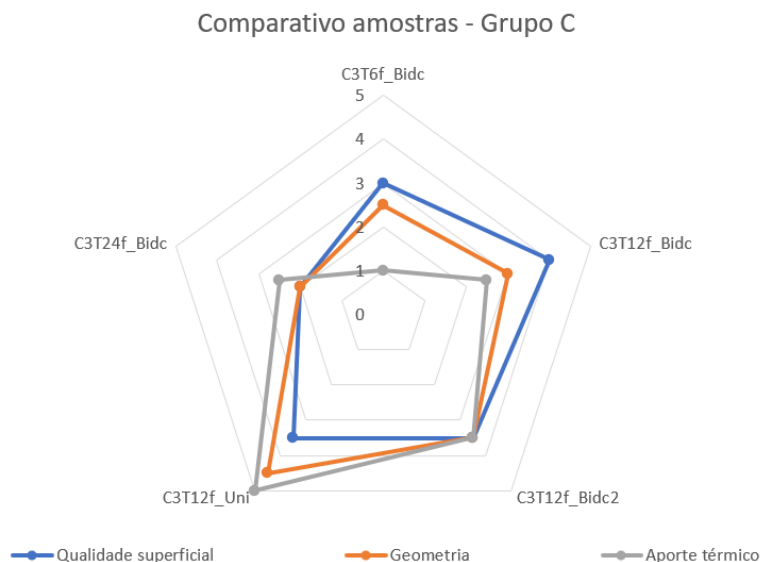


Figura 78 Análise de qualidade para as amostras do grupo C.

4.1.4 Amostras do Grupo D

Com a análise dos grupos A, B e C, é possível determinar um padrão de comportamento da deposição para cada configuração. Através das características das amostras, é possível definir uma faixa de operação aceitável para garantir uma boa qualidade na deposição.

Porém apesar de todas as amostras realizadas, ainda se buscava uma redução da largura média do cordão, a fim de maximizar a altura média, através de uma menor penetração da camada depositada e menor molhabilidade da poça de fusão. Sendo assim, o grupo D utilizou configurações de tensão de corrente menores que os grupos anteriores, que eram baseados na amostra A3T6 do grupo A. Por isso, utilizaram-se as configurações da fonte de 1 e 2, com o objetivo reduzir a largura dos cordões e manter um maior controle da poça de fusão ao longo da deposição, uma vez que tais parâmetros geram um menor aporte térmico durante a deposição do material. As faixas de velocidade de deslocamento da tocha foram refinadas e os valores de subida da tocha foram determinados com o intuito de manter constante a DBCP durante toda a deposição. Os parâmetros utilizados no Grupo D estão presentes na Tabela 28.

Grupo D – Parâmetros médios utilizados					
Amostras	Corrente (A)	Voltagem (V)	V_{arame} (m/min)	$V_{deposição}$ (mm/s)	Deposição / arco
D2T6f_Bidc (10 camadas, passo fixo 1,0 mm)	111	20,1	3,9	6,0	Bidirecional / contínuo
D1T6f_Bidc (20 camadas, passo fixo 1,0 mm)	63	19,1	2,3	6,0	Bidirecional / contínuo
D2T12f_Bidc (20 camadas, passo fixo 1,0 mm)	110	21,4	4,2	12,0	Bidirecional / contínuo
D1T12f_Bidc (7 camadas, passo fixo 1,0 mm)	57	18,3	1,7	12,0	Bidirecional / contínuo
D1T8f_Bidc (20 camadas, passo fixo 1,2 mm)	63	19,4	2,2	8,0	Bidirecional / contínuo
D1T8/24f_Bidc (100 camadas, passo fixo 1,2 mm)	62	20,6	2,6	8,0 (horizontal) 24,0 (vertical)	Bidirecional/ contínuo

Tabela 28 Parâmetros utilizados para as amostras do grupo D.

A amostra D2T6f_Bidc, registrada na Figura 79, foi a primeira depositada no grupo D, utilizando uma corrente menor que as amostras do grupo C, com o intuito de reduzir o aporte térmico. A amostra apresentou uma maior estabilidade na deposição, com um desvio padrão para a altura e largura de 1,05

mm e 1,05 mm respectivamente, bem abaixo dos valores de desvio padrão registrado nas amostras do grupo C.

Porém a baixa velocidade de deslocamento da tocha para a amostra D2T6f_Bidc ainda gerou um aporte térmico alto na região de deposição, gerando um maior espalhamento da poça de fusão. A largura média da parede da amostra D2T6f_Bidc foi de 10,54 mm, inferior a amostra C3T6f_Bidc que teve uma largura média de 12,25 mm, mas acima das demais amostras do grupo C. Para as próximas amostras, o objetivo foi avaliar os efeitos na deposição e na geometria da parede com a redução da corrente (amostra D1T6f_Bidc) e aumento da velocidade de deslocamento da tocha (amostra D2T12f_Bidc).

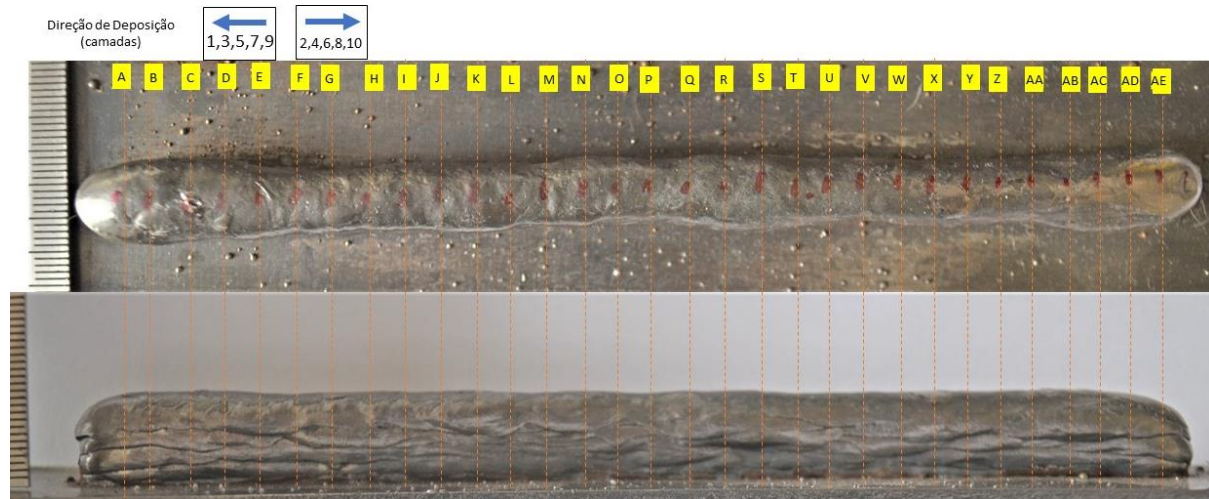


Figura 79 Amostra D2T6f_Bidc - Parede de 10 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 6 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)

Amostra D2T6f_Bidc - Parede de 10 camadas com passo fixo de 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 6 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Média	11,46	12,64	13,12	13,16	13,00	12,94	12,98	12,98	12,64	12,88	12,80	12,66	12,70	12,98	12,90	
DP	0,69	0,34	0,45	0,34	0,42	0,55	0,45	0,33	0,55	0,13	0,30	0,27	0,56	0,58	0,47	
LARGURA																
Média	12,08	12,44	12,62	12,30	10,76	9,76	10,04	9,94	9,58	9,34	9,62	9,74	10,70	11,12	11,00	
DP	0,72	0,46	0,33	0,60	0,69	0,27	0,16	0,27	0,25	0,27	0,13	0,16	0,21	0,13	0,42	
ALTURA																
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
Média	12,72	12,86	13,10	12,96	12,58	12,98	13,58	13,30	12,96	13,24	13,02	13,14	13,32	13,08	13,02	13,10
DP	0,25	0,34	0,47	0,62	0,39	0,32	0,13	0,47	0,16	0,16	0,49	0,16	0,13	0,25	0,62	0,21
LARGURA																
Média	10,00	9,50	9,92	10,28	9,12	9,66	10,26	9,90	9,74	9,48	10,26	10,06	10,34	11,56	11,66	12,42
DP	0,21	0,30	0,39	0,33	0,13	0,34	0,16	0,21	0,16	0,33	0,50	0,46	0,46	0,16	0,16	0,25
ALTURA	LARGURA															
Média	12,93	Média	10,54													
DP	1,05	DP	1,05													

Tabela 29 Medições de altura e largura para a amostra D2T6f_Bidc.

Quanto à amostra D1T6f_Bidc, apresentada na Figura 80, a parede foi realizada com valores de corrente menores, na faixa de corrente da configuração 1 da fonte, com a deposição bidirecional contínua de 20 camadas, mantendo a velocidade de deslocamento da tocha em 6 mm/s. A amostra apresentou uma boa geometria, com estabilidade na deposição das camadas. A altura média da amostra foi de 21,01 mm, com um desvio padrão de 1,36 mm e a largura média foi de 6,56 mm com um desvio padrão de 0,67 mm, demonstrando uma redução considerável em relação à amostra

D2T6f_Bidc. A qualidade superficial da amostra D1T6f_Bidc melhorou em comparação com a amostra D2T6f_Bidc, com menor número de oscilações e oxidações na superfície.

Apesar de a deposição apresentar ótimas características, foi evidenciado que a distância DBCP reduziu ao longo do processo, com uma variação de 12 mm, no início do processo, para 10 mm após a deposição da 20ª camada. Apesar de não gerar nenhum efeito para deposições nesta escala, em casos que exigir deposição de um maior número de camadas, esse efeito pode se intensificar e gerar defeitos, além de prejudicar a qualidade da deposição.

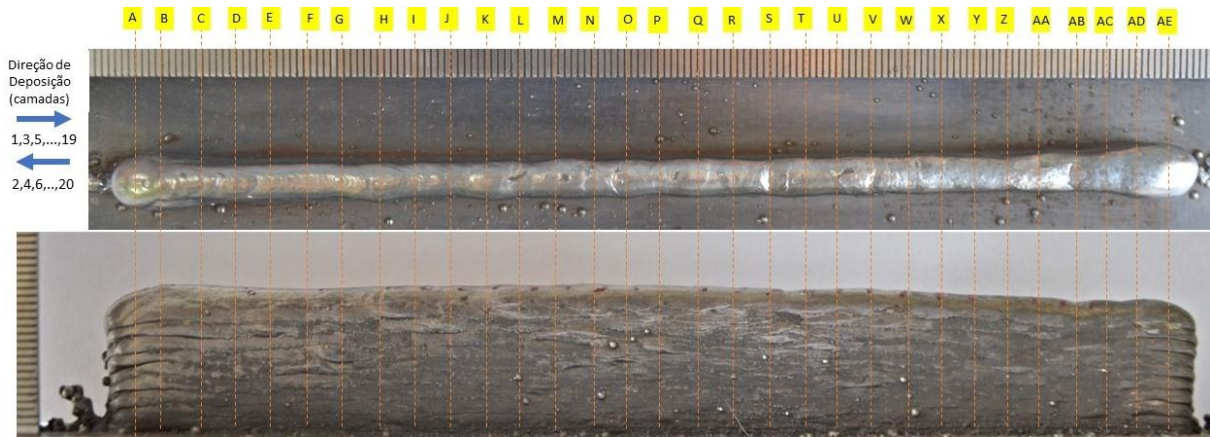


Figura 80 Amostra D1T6f_Bidc - Parede de 20 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 6 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$).

Amostra D1T6f_Bidc - Parede de 20 camadas com passo fixo de 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 6 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)																	
ALTURA																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		
Média	20,22	20,74	20,90	20,48	20,20	20,10	20,76	21,00	20,92	21,20	21,40	21,26	21,46	21,80	21,38		
DP	0,62	0,27	0,30	0,25	0,37	0,30	0,40	0,56	0,54	0,30	0,37	0,40	0,40	0,42	0,39		
LARGURA																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		
Média	8,74	8,18	6,90	6,48	6,64	6,66	6,36	6,38	6,34	6,40	6,28	6,32	6,38	6,36	6,30		
DP	0,34	0,45	0,37	0,39	0,16	0,27	0,16	0,25	0,34	0,21	0,39	0,25	0,13	0,16	0,21		
ALTURA																	
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
Média	21,40	21,44	21,28	21,28	21,30	21,72	21,58	21,36	21,24	20,70	20,92	20,92	20,78	20,50	20,46	20,76	
DP	0,47	0,50	0,33	0,25	0,21	0,39	0,25	0,16	0,86	0,37	0,45	0,39	0,65	0,47	0,46	0,34	
LARGURA																	
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
Média	6,30	6,36	6,20	6,14	6,32	6,36	6,04	6,30	6,14	6,10	5,96	6,06	6,62	6,48	6,84	8,46	
DP	0,42	0,16	0,37	0,16	0,25	0,16	0,16	0,30	0,16	0,37	0,16	0,27	0,25	0,13	0,16	0,16	
ALTURA	LARGURA																
Média	21,01	Média	6,56														
DP	1,36	DP	0,67														

Tabela 30 Medições de altura e largura para a amostra D1T6f_Bidc.

A amostra D2T12f_Bidc, apresenta na Figura 81, buscou avaliar o efeito da velocidade de deslocamento da tocha na geometria da parede em comparação com a amostra D1T6f_Bidc. O ajuste de tensão e corrente utilizados da configuração da fonte 2, mesma utilizada na amostra D2T6f_Bidc, porém com a velocidade de 12 mm/s de deslocamento da tocha e com a deposição de 20 camadas. A parede apresentou algumas regiões de concentração de material nas extremidades durante a deposição das últimas camadas, destacado na figura, ocasionando assim um aumento da largura nessa região.

A altura média da amostra D2T12f_Bidc foi de 18,02 mm (desvio padrão de 1,35 mm) e largura média de 8,69 mm (desvio padrão de 1,24 mm), no qual apresentou uma redução considerável em relação à amostra D2T6f_Bidc, mas que se manteve superior à amostra D1T6f_Bidc. Quanto à altura, a amostra obteve valores abaixo da amostra D1T6f_Bidc, sendo que ambas tiveram o mesmo número de camadas. Analisando a qualidade superficial, a amostra apresentou alguns pontos de oxidação ao

longo do comprimento, mas sem prejudicar a estrutura da parede, além da presença da cratera de rechupe ao final da última camada.

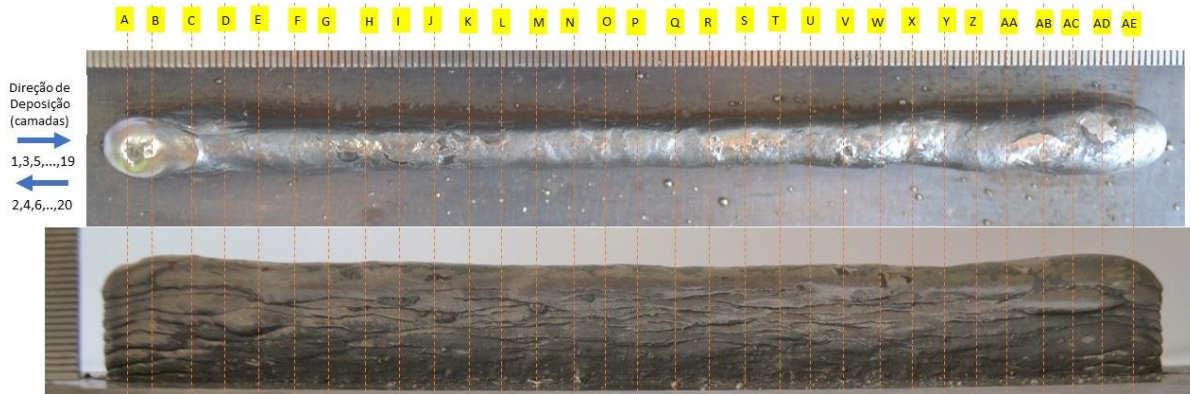


Figura 81 Amostra D2T12f_Bidc - Parede de 20 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 12$ mm/s) ($L = 160$ mm).

Amostra D2T12f_Bidc - Parede de 20 camadas com passo fixo de 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 12$ mm/s) ($L = 160$ mm)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Média	18,18	18,88	19,00	18,68	18,60	17,96	17,60	17,46	17,70	17,92	17,94	17,70	17,66	17,40	17,68	
DP	0,33	0,54	0,60	0,39	0,21	0,34	0,47	0,34	0,37	0,33	0,16	0,42	0,34	0,30	0,45	
LARGURA																
Média	10,50	11,38	11,54	10,26	9,02	9,06	8,94	8,68	8,56	8,46	8,18	7,54	7,68	7,80	7,66	
DP	0,70	0,25	0,27	0,46	0,13	0,27	0,16	0,13	0,16	0,16	0,25	0,16	0,13	0,00	0,16	
ALTURA																
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
Média	17,82	17,68	17,80	17,66	17,70	17,56	17,74	18,04	18,18	18,28	17,88	17,90	17,86	18,56	18,58	18,88
DP	0,33	0,49	0,52	0,62	0,52	0,55	0,46	0,55	0,13	0,25	0,25	0,21	0,62	0,27	0,49	0,78
LARGURA																
Média	7,38	7,56	7,76	8,02	8,08	7,48	7,88	7,72	8,04	7,92	7,92	8,30	8,56	9,64	10,92	10,80
DP	0,13	0,16	0,40	0,25	0,39	0,13	0,39	0,13	0,16	0,25	0,13	0,00	0,50	0,46	0,39	0,21
ALTURA	LARGURA															
Média	18,02	Média	8,69													
DP	1,35	DP	1,24													

Tabela 31 Medições de altura e largura para a amostra D2T12f_Bidc.

Para a amostra D1T12f_Bidc, presente na Figura 82, buscou-se juntar as duas características implementadas para as amostras D1T6f_Bidc e D2T12f_Bidc, sendo a redução da corrente para o ajuste da amostra A1, como realizado na amostra D1T6f_Bidc, e também o aumento da velocidade de deslocamento da tocha para 12 mm/s, como feito na amostra D2T12f_Bidc. A combinação das características levou a uma forte instabilidade durante a deposição de material, devido à baixa intensidade do arco elétrico gerado e a alta velocidade de deposição.

Durante o acompanhamento do processo, as primeiras 3 camadas apresentaram características regulares devido à forte interação com o substrato. Porém com a elevação da parede, a área de fechamento com o arco elétrico se reduz, gerando instabilidade e observou-se o efeito de humping a partir da deposição da quarta camada. Com a intensificação do efeito, decidiu-se em parar a deposição na sétima camada. Diante os resultados da amostra D1T12f_Bidc, que se mostrou inviável para aplicação, decidiu-se reduzir a velocidade de deslocamento da tocha para 8 mm/s com o intuito de atingir um valor ótimo para este parâmetro.

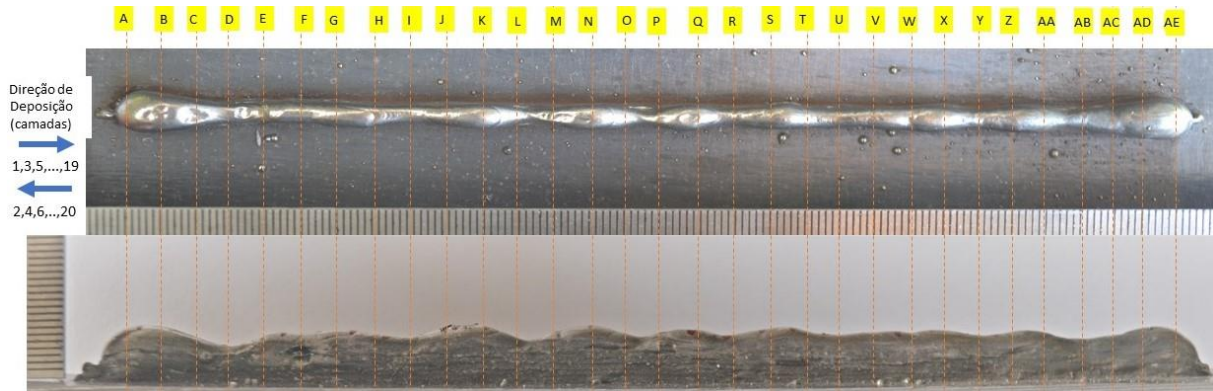


Figura 82 Amostra D1T12f_Bidc - Parede de 7 camadas com subida fixa em 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 12 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)

Amostra D1T12f_Bidc - Parede de 7 camadas com passo fixo de 1,0 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 12 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)																	
ALTURA																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		
Média	8,58	8,14	6,78	6,24	7,52	7,84	7,80	7,06	7,14	8,32	8,22	6,40	7,44	8,26	7,10		
DP	0,45	0,27	0,25	0,46	0,54	0,16	0,30	0,34	0,46	0,45	0,25	0,21	0,27	0,16	0,42		
LARGURA																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		
Média	6,40	4,68	3,98	4,12	3,96	4,18	3,84	3,60	3,60	4,00	3,74	3,42	3,56	3,98	3,58		
DP	0,21	0,39	0,13	0,25	0,40	0,25	0,16	0,60	0,30	0,00	0,16	0,13	0,16	0,13	0,13		
ALTURA																	
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
Média	7,22	7,68	6,96	7,50	7,74	6,96	6,88	6,48	7,26	6,90	6,46	7,06	6,02	6,04	6,94	7,44	
DP	0,49	0,33	0,27	0,37	0,27	0,16	0,45	0,25	0,40	0,70	0,27	0,55	0,75	0,66	0,40	0,16	
LARGURA																	
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
Média	3,76	4,14	3,40	3,78	4,20	3,60	3,58	3,58	4,22	3,94	3,44	4,36	4,04	3,76	4,96	6,10	
DP	0,16	0,27	0,21	0,33	0,00	0,30	0,13	0,13	0,13	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,30	
ALTURA	LARGURA																
Média	7,24	Média	4,05														
DP	2,03	DP	0,69														

Tabela 32 Medições de altura e largura para a amostra D1T12f_Bidc.

A amostra D1T8f_Bidc, presente na Figura 83, buscou avaliar o efeito da velocidade de deslocamento da tocha na faixa intermediária aos valores de 6 mm/s e 12 mm/s utilizados nas amostras D1T6f_Bidc e D1T12f_Bidc respectivamente, com o intuito de obter uma parede com menor largura média. Assim sendo, optou-se em realizar a deposição com a velocidade de 8 mm/s, valor mais próximo da amostra D1T6f_Bidc, uma vez que a amostra D1T12f_Bidc provou que a velocidade de 12 mm/s é muito alta para esse parâmetro de tensão e corrente. A amostra apresentou geometria constante ao longo de todo o comprimento, bem semelhante a amostra D1T6f_Bidc. A altura média do cordão reduziu de 21,01 mm para 18,61 mm, com o desvio padrão reduzindo de 1,36 mm para 1,16 mm. Já com a largura, a amostra D1T8f_Bidc reduziu, com um valor médio de 5,93 mm e desvio padrão de 0,6 mm, em comparação a 6,56 mm e desvio padrão de 0,67 mm referentes a amostra D1T6f_Bidc. Ambas as amostras apresentaram o mesmo padrão quanto a qualidade superficial, sem grande defeitos e deformações ao longo da parede.

Com esses resultados, decidiu-se analisar os efeitos desse parâmetro para processos mais extensos e estressantes de deposição, aplicando o cenário para a amostra D1T8/24f_Bidc, com a deposição de uma parede de 100 camadas utilizando os parâmetros da amostra D1T8f_Bidc. O objetivo é avaliar o estresse térmico submetido pela peça e os efeitos para a geometria do cordão.

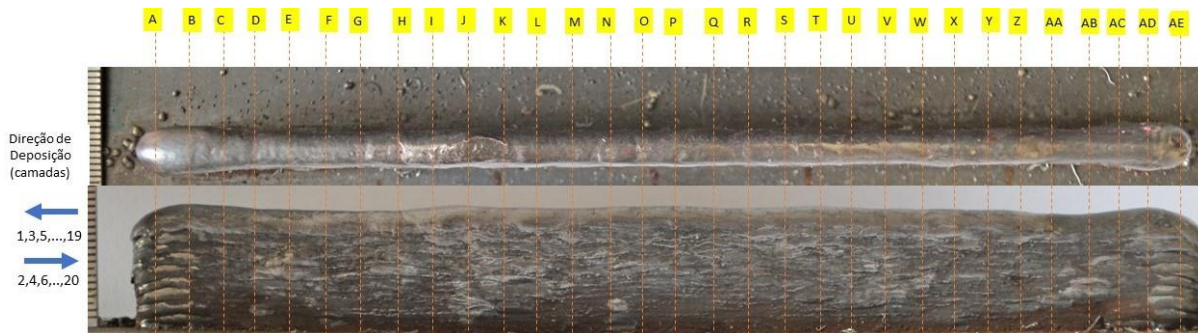


Figura 83 Amostra D1T8f_Bidc - Parede de 20 camadas com subida fixa em 1,2 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 8 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$).

Amostra D5 - Parede de 20 camadas com passo fixo de 1,2 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_d = 8 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Média	18,20	18,98	18,58	17,98	18,06	18,20	18,70	18,80	18,92	18,88	18,96	19,18	19,02	18,70	18,64	
DP	0,47	0,49	0,33	0,39	0,40	0,42	0,37	0,37	0,25	0,25	0,16	0,13	0,13	0,21	0,34	
LARGURA																
Média	7,46	7,52	5,96	5,68	6,12	5,78	5,70	5,80	5,74	5,44	5,44	5,74	5,80	5,74	5,44	
DP	0,16	0,33	0,16	0,13	0,39	0,13	0,00	0,30	0,27	0,27	0,16	0,16	0,21	0,27	0,34	
ALTURA																
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
Média	18,94	18,94	19,00	18,68	18,50	18,56	18,98	19,08	18,80	18,20	18,14	18,10	17,78	18,08	18,48	18,80
DP	0,16	0,50	0,56	0,54	0,21	0,34	0,68	0,33	0,56	0,47	0,40	0,56	0,33	0,54	0,39	0,56
LARGURA																
Média	5,60	5,36	5,64	5,60	5,40	5,80	5,88	5,88	5,78	5,78	5,44	5,44	6,14	6,24	7,10	7,44
DP	0,30	0,27	0,16	0,00	0,21	0,30	0,13	0,13	0,13	0,25	0,27	0,16	0,16	0,34	0,37	0,16
ALTURA	LARGURA															
Média	18,61	Média	5,93													
DP	1,16	DP	0,61													

Tabela 33 Medições de altura e largura para a amostra D1T8f_Bidc.

Para a amostra D1T8/24f_Bidc, apresentado na Figura 84, o objetivo foi avaliar a qualidade da deposição ao longo de um processo mais extenso. Com isso 100 camadas foram depositadas, gerando uma parede com altura média de 85,46 mm e largura média de 7,26 mm. A deposição se mostrou bem estável durante as primeiras 50 camadas, porém com o aumento da temperatura na área de trabalho devido ao ciclo térmico do processo de deposição, a troca convectiva de calor começou a se tornar deficiente e as camadas começaram a aquecer mais. Com isso, a poça de fusão começou a se expandir levemente e as últimas camadas começaram a apresentar uma largura levemente maior, mas se afetou drasticamente a qualidade da deposição, com uma peça final com um perfil estável ao longo de todo o comprimento, com um desvio padrão da altura e largura nos pontos de medição de 1,564 mm e 0,944 mm respectivamente.

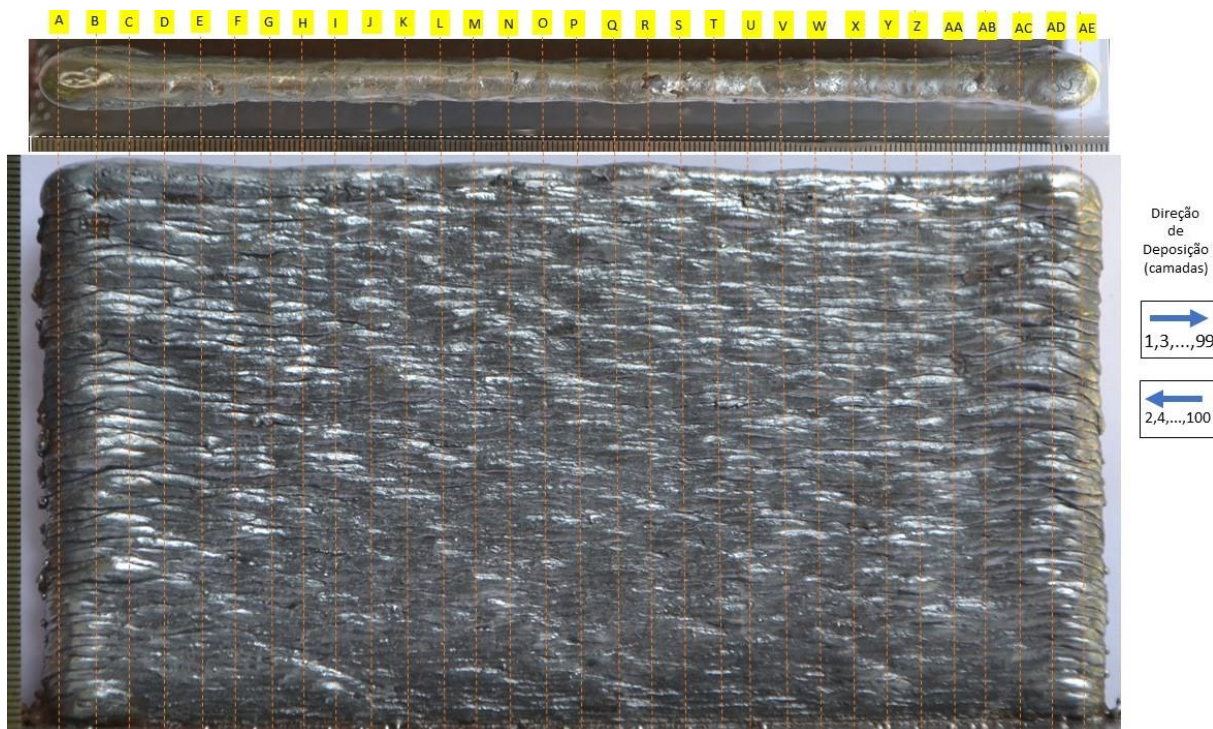


Figura 84 Amostra D1T8/24f_Bidc - Parede de 100 camadas com subida fixa em 1,2 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_{dH} = 8 \text{ mm/s}$; $V_{dV} = 24 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)

Amostra D1T8/24f_Bidc - Parede de 100 camadas com passo fixo de 1,2 mm por camada e deposição bidirecional com arco contínuo ($V_{dH} = 8 \text{ mm/s}$; $V_{dV} = 24 \text{ mm/s}$) ($L = 160 \text{ mm}$)																
ALTURA																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
Média	84,28	85,42	85,36	85,08	84,68	84,72	84,58	84,76	85,20	85,44	85,42	85,84	86,08	86,08	85,92	
DP	0,49	0,33	0,34	0,25	0,25	0,13	0,13	0,27	0,21	0,27	0,13	0,16	0,13	0,13	0,25	
LARGURA																
Média	9,28	9,76	8,14	7,44	7,38	7,08	6,72	6,46	6,50	6,86	7,18	6,32	6,50	6,98	7,06	
DP	0,58	0,40	0,40	0,16	0,33	0,33	0,13	0,16	0,21	0,27	0,49	0,13	0,21	0,13	0,55	
ALTURA																
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
Média	85,86	85,72	86,26	86,32	85,80	85,68	85,22	85,52	85,50	85,38	85,30	85,24	85,10	85,16	86,02	86,20
DP	0,16	0,13	0,27	0,39	0,00	0,13	0,25	0,13	0,00	0,25	0,21	0,16	0,21	0,40	0,13	0,30
LARGURA																
Média	6,48	7,20	6,62	7,02	6,60	6,82	6,76	7,02	6,90	6,82	7,16	6,92	7,00	7,44	8,56	10,10
DP	0,13	0,21	0,13	0,58	0,37	0,39	0,16	0,13	0,37	0,58	0,46	0,25	0,21	0,16	0,27	0,30
ALTURA		LARGURA														
Média	85,46	Média	7,26													
DP	1,56	DP	0,94													

Tabela 34 Medições de altura e largura para a amostra D1T8/24f_Bidc.

Um efeito observado em outras amostras do grupo D, visualizado mais claramente na amostra D1T8/24f_Bidc foi a presença de respingos de material gerados nas extremidades da parede ao longo do processo de deposição. Isso se deve ao desprendimento do arco elétrico, efeito observado durante a deposição, e que promove o desprendimento de material da poça de fusão devido aos efeitos eletromagnéticos e da gravidade nos pontos. Na Figura 85a é possível comparar as amostras e é visível os respingos gerados na deposição de cada amostra.

Outro fator observado na Figura 85b é a formação de óxidos durante a deposição de material da amostra D1T8/24f_Bidc. Apesar disso, o efeito não prejudica a estrutura da amostra, sendo formado apenas uma camada que é facilmente retirada posteriormente.

O processo de deposição da amostra apresentou resultados satisfatórios e promissores para o desenvolvimento durante um processo de manufatura mais elaborado, porém é evidente através desse ensaio que o resfriamento por convecção natural é deficiente para procedimentos mais extensos de fabricação.



Figura 85 (a) Presença de respingos na deposição das amostras do grupo D. (b) Óxidos formados durante o processo de deposição da amostra D1T8/24f_Bidc.

4.1.4.1 Análise geral do grupo D

Na análise geral do grupo D, o comparativo das alturas das amostras encontra-se registrado na Figura 86. Todas as amostras apresentaram valores de altura regulares ao longo do cordão, com exceção da amostra D1T12f_Bidc, onde o efeito de humping é manifestado de forma clara no gráfico através da variação da altura em diversos picos, formados devido ao fluxo de material. É notável também a amostra D1T6f_Bidc apresentando a maior altura dentre as amostras de 20 camadas, sempre acima das amostras D2T12f_Bidc e D1T8f_Bidc em média 2 mm. As amostras D2T12f_Bidc e D1T8f_Bidc também performaram de maneira semelhante quanto à altura, com a amostra D1T8f_Bidc levemente superior ao longo dos pontos. Já a amostra D1T8/24f_Bidc, mais acima devido a extensão da deposição, apresentou uma variação da altura ao longo do comprimento de maneira similar às demais amostras do grupo, mesmo apesar do maior estresse térmico.

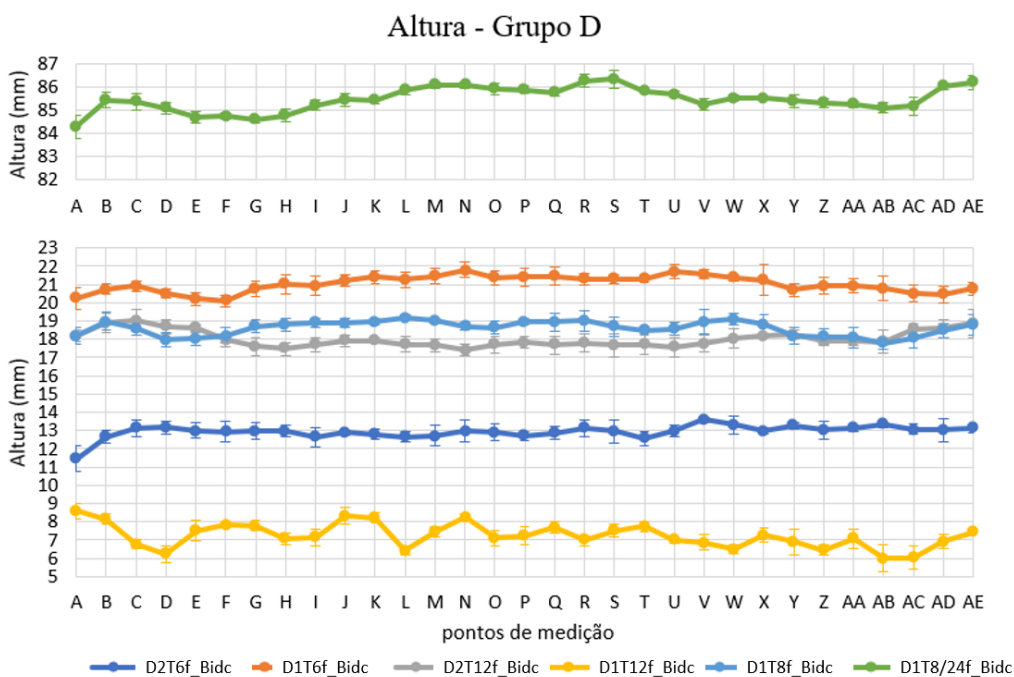


Figura 86 Comparativo das amostras grupo D – Altura.

Na análise da largura, é mais notável as diferenças de desempenho e as características dos processos de deposição das amostras. Com o comparativo presente na Figura 87, percebe-se o

diferencial quanto aos parâmetros de soldagem utilizados (tensão e corrente). As amostras submetidas a configuração da fonte 2, possuem uma corrente maior durante a abertura do arco elétrico, o que aumenta a intensidade do arco elétrico e em consequência, do aporte térmico, levando ao maior espalhamento da poça de fusão. Assim, tais amostras possuem paredes mais largas, como visto nas amostras D2T6f_Bidc e D2T12f_Bidc. A amostra D1T8/24f_Bidc segue logo atrás destas devido ao alto estresse térmico submetido durante a deposição e ao problema de resfriamento relatado a partir do meio do processo, gerando uma espessura maior das últimas camadas depositadas. As amostras D1T6f_Bidc e D1T8f_Bidc apresentaram ótimos valores de largura, mais estáveis ao longo do comprimento enquanto a amostra D1T12f_Bidc apresentou os menores valores de largura devido à alta velocidade de deslocamento da tocha, mas com variações bruscas devido ao humping.

Vale ressaltar também que o desvio padrão da largura nas amostras mantiveram-se na faixa obtida pelos experimentos de Lehmann, *et al.* (2020), utilizando o mesmo material ER70S-6 e o método de deposição CMT. No trabalho, os autores obtiveram amostras que variaram os valores de desvio padrão entre 0,5 mm e 2,0 mm, indicando que o padrão de deposição condiz com o experimento conduzido neste trabalho.

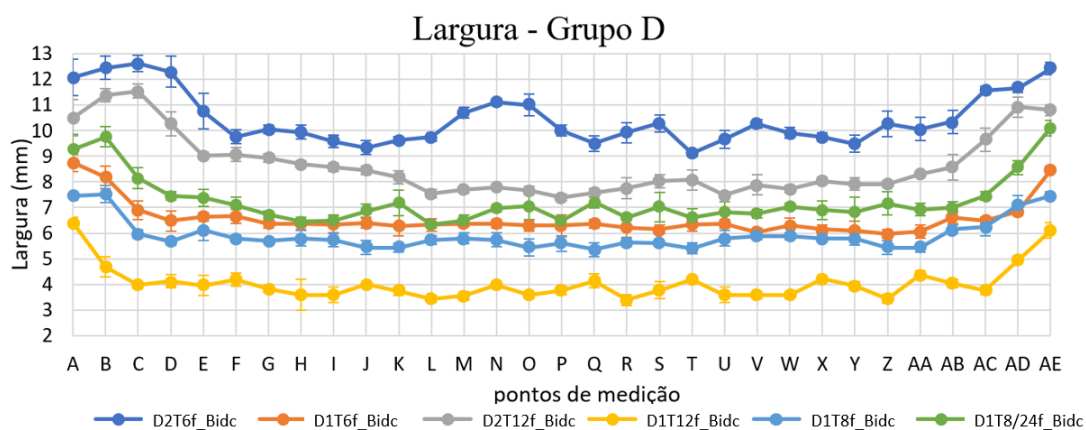


Figura 87 Comparativo das amostras grupo D – Largura.

Em uma análise geral das características, a Figura 88 apresenta a avaliação quanto aporte térmico, geometria e qualidade superficial. As amostras do grupo D apresentaram resultados consistentes que os grupos B e C. Os parâmetros de deposição mostraram melhores resultados para as configurações da fonte 1 e 2. A amostra D1T6f_Bidc apresentou a melhor geometria para as amostras de 20 camadas, e a amostra D1T8/24f_Bidc mostrou potencial para aplicações mais extensas, expondo a influência do resfriamento para melhoria da qualidade do cordão. Uma metodologia de resfriamento ativo é apresentada por Reis, *et al.* (2020) através do método NIAC. A comparação do método, presente na Figura 29, mostra o potencial de melhoria da amostra.

Comparativo amostras - Grupo D

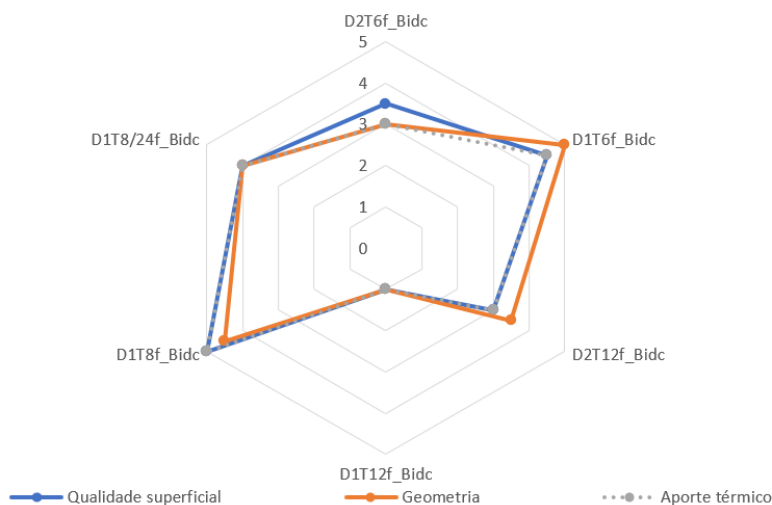


Figura 88 Análise de qualidade para as amostras do grupo D.

4.1.4.2 Análise da deposição de paredes anguladas

Após a análise das amostras do grupo D e a deposição da amostra D1T8/24f_Bidc, optou-se por realizar a deposição de uma estrutura cônica excêntrica para avaliar a geometria da parede e comparar uma região angulada com uma reta. Para isso, um programa de código G foi preparado para realizar a geometria presente na Figura 89. Os parâmetros de deposição utilizados foram idênticos aos utilizados na amostra D1T8/24f_Bidc, com a deposição de 20 camadas que se iniciou com uma circunferência de 60 mm de diâmetro, e encerrou a deposição da vigésima camada com um diâmetro de 50 mm, como representado na Figura 89b.

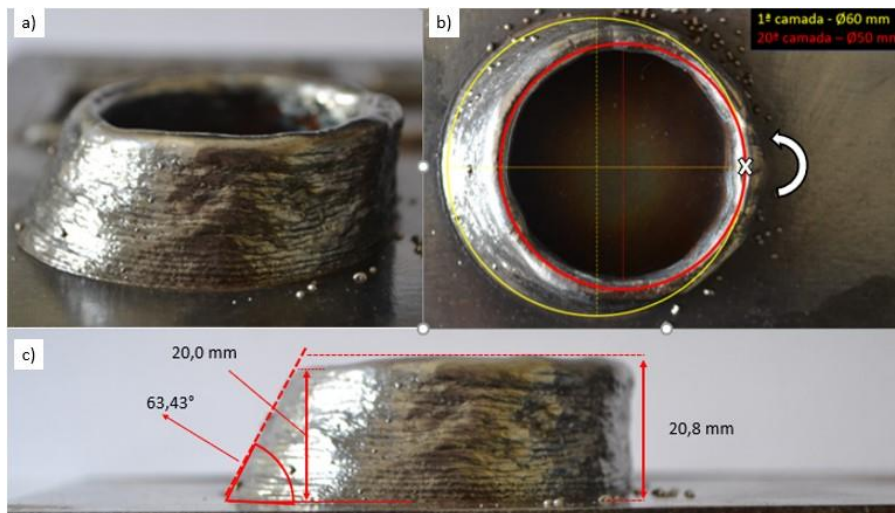


Figura 89 Geometria cônica excêntrica depositada utilizando os parâmetros da amostra D6. Vista isométrica (a), vista superior (b) e vista lateral (c).

O ângulo de inclinação da parede obtido para essa peça foi de aproximadamente $63,43^\circ$, como representado na Figura 89c, e o desnível da parede foi de 0,8 mm entre os pontos opostos da estrutura. O acabamento superficial da parede obteve qualidade satisfatória, tanto externamente quanto internamente sem a presença de defeitos ou anomalias. Um corte foi realizado na amostra ao longo da linha laranja para visualização da seção da parede na seção reta e inclinada, apresentada na Figura 90.

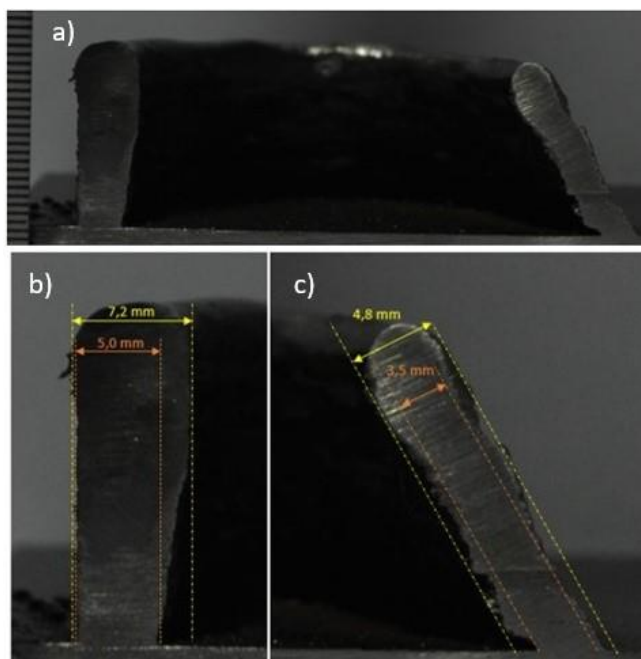


Figura 90 Análise da seção da amostra cônica (a), com as medidas de largura total (amarelo) e efetiva (laranja) do lado da parede reto (b) e angulado (c).

Comparando os resultados com o trabalho de Yan, *et al.* (2021), onde também foi abordado a deposição de paredes anguladas, percebe-se que a geometria apresentou grande semelhanças com as amostras analisadas pelos autores, com uma região perto do substrato mais fino, estabilizando a largura posteriormente para as demais amostras. Em uma comparação entre as amostras, o autor obteve um ângulo máximo de 62,7° para um passo de 1,2 mm, velocidade da tocha em 8 mm/s e velocidade de deposição de arame em 4,5 m/min.

Para a amostra depositada neste trabalho, utilizando o software IMAGEJ, determinou-se que a face reta possui uma largura total de 7,2 mm e largura efetiva de 5 mm. A região angulada apresentou uma largura total de 4,8 mm e uma largura efetiva de 3,5 mm, para os parâmetros de deposição utilizados na amostra D6, com velocidade de arame em 2,8 /min e passo de 1 mm entre camadas.

4.2 ANÁLISE DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS AMOSTRAS

Após a deposição das amostras e da realização das medições de altura e largura das paredes ao longo do comprimento, as amostras foram encaminhadas ao laboratório para serem cortadas e lixadas a fim de ser obter as medidas dos perfis das paredes. Com as seções preparadas, foram produzidas as fotos e estas foram analisadas no software IMAGEJ, para obtenção da altura, largura e ângulo de molhamento dos cordões e paredes, além de determinar a largura total e efetiva das paredes depositadas. Os dados obtidos encontram-se nas Tabelas 35 a 38. Para os grupos A, B, C e D, também foi utilizado o parâmetro R sendo a razão entre a razão entre a largura efetiva e total para comparação.

A análise das seções é importante para visualização das imperfeições geradas entre camadas e determinar a amostra que possuirá maior rentabilidade no processo de pós acabamento. Trabalhos como o de Lehmann, *et al.* (2020), utilizam a análise da seção para comparações estatísticas entre as amostras e determinação do grau de controle da deposição do processo. Para o presente trabalho, utilizou-se o parâmetro R, determinado pela razão da largura efetiva e total, como fonte de comparação entre os perfis das amostras.

Nas amostras do grupo A, apresentada na Tabela 35, apenas a amostra A1T8+45 apresentou um ângulo de molhamento acima de 50°. Comparando com as amostras realizadas no trabalho de Sun e Chen, *et al.* (2019) e presentes na Figura 24, as amostras do grupo A apresentaram uma maior molhabilidade comparado com as amostras de Sun e Chen. Para as aplicações de manufatura aditiva, um ângulo de molhamento próximo de 90° com o intuito de reduzir a diferença da largura total com a largura efetiva para deposições de paredes.


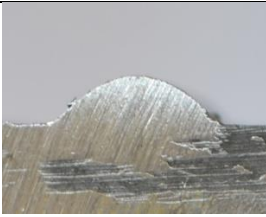


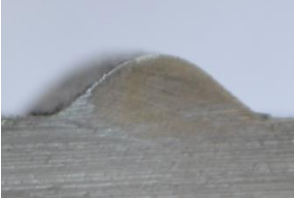

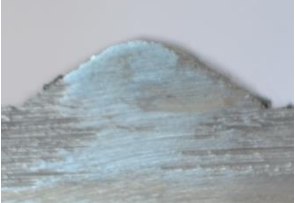

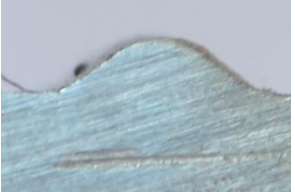

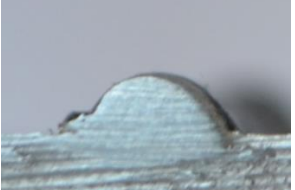
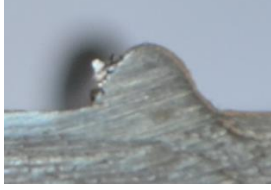
Seção das amostras – Grupo A			
	A1T6 Reforço: 1,5 mm Largura: 5,1 mm Θ : 38,4°		A2T6 Reforço: 2,3 mm Largura: 7,2 mm Θ : 42,5°
	A3T6 Reforço: 2,4 mm Largura: 8,4 mm Θ : 41,6°		A4T6 Reforço: 3,0 mm Largura: 9,1 mm Θ : 44,1°
	A5T6 Reforço: 3,1 mm Largura: 10,3 mm Θ : 42,3°		A6T6 Reforço: 3,1 mm Largura: 11,6 mm Θ : 37,7°

Tabela 35 Análise da seção transversal das amostras do grupo A.

	<p>A7T6</p> <p>Reforço: 3,7 mm Largura: 13,8 mm Θ: 31,9°</p>		<p>A8T6</p> <p>Reforço: 4,0 mm Largura: 14,0 mm Θ: 36,0°</p>
	<p>A3T12</p> <p>Reforço: 1,5 mm Largura: 6,1 mm Θ: 31,5°</p>		<p>A3T18</p> <p>Reforço: 1,7 mm Largura: 4,8 mm Θ: 37,8°</p>
	<p>A1T8+45</p> <p>Reforço: 1,7 mm Largura: 4,8 mm Θ: 59,9°</p>		<p>A1T8-45</p> <p>Reforço: 1,9 mm Largura: 3,6 mm Θ: 40,2°</p>

Continuação da Tabela 35 Análise da seção transversal das amostras do grupo A.

Para o grupo B, representada na Tabela 36, as amostras B3T6f_Uni e B3T6c_Uni já apresentaram ângulos de molhamento próximos a 90°. A amostra B3T6c_Uni apresentou as melhores características gerais, com uma razão R de 0,859 e ângulo de molhamento em 73, 8°. Também se percebe que a amostra B3T6c_Bidc, devido ao alto aporte térmico submetido pela deposição, fez com que o perfil da amostra apresentasse um maior ângulo de molhamento, devido ao maior espalhamento da poça de fusão.





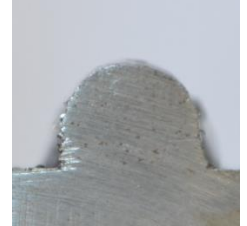
Seção das amostras – Grupo B			
	<p>B3T6f_Uni</p> <p>Altura: 9,4 mm Largura total: 8,7 mm Largura efetiva: 7,4 mm R = 0,851 Θ: 74,9°</p>		<p>B3T6c_Uni</p> <p>Altura: 9,8 mm Largura total: 8,5 mm Largura efetiva: 7,3 mm R = 0,859 Θ: 73,8°</p>
	<p>B3T6c_Bidi</p> <p>Altura: 10,0 mm Largura total: 8,3 mm Largura efetiva: 6,8 mm R = 0,819 Θ: 32,0°</p>		<p>B3T6c_Bidc</p> <p>Altura: 6,6 mm Largura total: 12,3 mm Largura efetiva: 9,4 mm R = 0,764 Θ: 133,0°</p>
	<p>B3T12f_Bidc</p> <p>Altura: 5,3 mm Largura total: 7,2 mm Largura efetiva: 7,0 mm R = 0,97 Θ: 75,0°</p>		

Tabela 36 Análise da seção transversal das amostras do grupo B.

Para o grupo C, apresentado na Tabela 37, a amostra C3T12f_Uni se desatacou, não somente quanto a maior altura, mas também para a razão R maior que 0,9, indicando que

menos material será retirado no pós-processamento. A amostra C3T6f_Bidc indica o maior aporte térmico submetido na peça, com o maior aquecimento ao longo da deposição ocasionando uma largura maior nas camadas superiores.


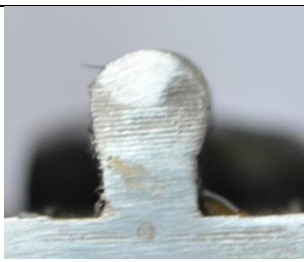



Seção das amostras – Grupo C			
	<p>C3T6f_Bidc</p> <p>Altura: 14,0 mm Largura total: 11,5 mm Largura efetiva: 7,6 mm R = 0,661 Θ: 105,4°</p>		<p>C3T12f_Bidc</p> <p>Altura: 10,3 mm Largura total: 7,4 mm Largura efetivo: 5,5 mm R = 0,743 Θ: 83,1°</p>
	<p>C3T12f_Bidc2</p> <p>Altura: 10,4 mm Largura total: 8,3 mm Largura efetivo: 6,8 mm R = 0,819 Θ: 94,2°</p>		<p>C3T12f_Uni</p> <p>Altura: 12,0 mm Largura total: 6,1 mm Largura efetivo: 5,5 mm R = 0,902 Θ: 87,2°</p>
	<p>C3T24f_Bidc</p> <p>Altura: 7,0 mm Largura total: 5,5 mm Largura efetivo: 4,6 mm R = 0,836 Θ: 67,7°</p>		

Tabela 37 Análise da seção transversal das amostras do grupo C.

Na análise do grupo D, apresentada na Tabela 38, a amostra D1T6f_Bidc apresentou as melhores características dentre as seções, com a maior razão R e maior altura dentre as 4 amostras avaliadas. A amostra D2T12f_Bidc indica um aporte térmico maior que a amostra D1T6f_Bidc, refletindo em uma razão das larguras R inferior. A alta velocidade de deposição para a amostra D1T12f_Bidc é indicado pela instabilidade do perfil, com variações e distorções das camadas depositadas.





Seção das amostras – Grupo D			
	<p>D2T6f_Bidc</p> <p>Altura: 12,9 mm Largura total: 10,2 mm Largura efetiva: 7,8 mm R = 0,765 Θ: 113,96°</p>		<p>D1T6f_Bidc</p> <p>Altura: 20,5 mm Largura total: 5,9 mm Largura efetivo: 4,7 mm R = 0,797 Θ: 98,7°</p>
	<p>D2T12f_Bidc</p> <p>Altura: 17,8 mm Largura total: 7,9 mm Largura efetivo: 5,3 mm R = 0,671 Θ: 71,4°</p>		<p>D1T12f_Bidc</p> <p>Altura: 6,7 mm Largura total: 3,7 mm Largura efetivo: 2,3 mm R = 0,622 Θ: 70,9°</p>

Tabela 38 Análise da seção transversal das amostras do grupo D.

Com a análise das seções, é possível determinar os procedimentos a serem realizados na etapa de pós-processamento, indicando o avanço a ser introduzido na peça para retirada do material sobressalente. É possível também avaliar a eficiência da configuração utilizada para a deposição através do ângulo de molhamento e do aumento da largura ao longo da deposição das camadas, indicando um maior aquecimento do material durante a deposição. Vale ressaltar que as amostras D1T8f_Bidc e D1T8/24f_Bidc não foram avaliadas neste trabalho, pois serão utilizadas em futuros estudos de usinagem e pós-acabamento para os processos MADA.

4.3 ANÁLISE DO ESTADO DE HIPÓTESE

Quanto ao estado de hipótese, verificou-se que a deposição bidirecional favorece a uniformidade da altura do cordão, assim como a deposição por arco interrompido, uma vez que o controle da temperatura de interpasse favorece o controle do processo de solidificação e, por consequência, a qualidade da geometria. Porém o procedimento por arco interrompido reduz drasticamente a produtividade, e por isso, alternativas sem interrompimento do processo são de grande importância para difusão da tecnologia.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo estudar o processo MADA e otimizar parâmetros do processo de forma a obter a melhor geometria na deposição dos cordões e paredes. Com isso, 4 grupos de amostras foram fabricados para estudo da geometria e a influência de parâmetros na geometria das camadas. Determinou-se na análise dessas amostras os seguintes pontos:

1. No que diz respeito às deposições de camadas simples:
 - Para o grupo de camadas constituídas por cordões simples, foi avaliado 12 configurações e selecionou-se duas que obtiveram melhor geometria, sendo a configuração de corrente de 112 A e velocidade de arame de 3,7 m/min, e a amostra submetida pela configuração de corrente de 131 A e velocidade de arame de 5,2 m/min. Tais amostras apresentaram uma geometria e acabamento superficial mais uniforme do cordão, com altura de $2,20 \pm 0,25$ mm e $2,46 \pm 0,37$ mm e largura de $7,32 \pm 0,57$ mm e $8,47 \pm 0,72$ mm, respectivamente.
2. Quanto aos ciclos de deposição:
 - A deposição bidirecional gera um perfil mais uniforme da altura ao longo do comprimento comparado com o método de deposição unidirecional, onde o maior gradiente térmico ocasiona um maior desnível da altura;
 - Verificou-se que a deposição contínua de paredes para o comprimento 70 mm gera um aporte térmico elevado na região de deposição, aumentando a concentração de energia e ocasionando um transbordamento poça de fusão. Na confecção dos grupos de paredes de 10 e 20 camadas, utilizou-se um comprimento maior, de 160 mm, obtendo maior eficácia no processo de resfriamento durante o ciclo térmico, amenizando a concentração de calor da amostra.
3. Para a análise do efeito de velocidade de deslocamento da tocha:
 - Velocidades acima de 12 mm/s levaram um efeito de pré-humping, prejudicando a geometria das amostras. A velocidade de 8 mm/s para uma faixa de corrente de 60 A levou aos resultados mais estáveis quanto a geometria;
 - A velocidade de 6 mm/s para valores de corrente acima de 110 A ocasionam uma grande concentração de calor, gerando colapso da poça de fusão durante a deposição contínua bidirecional de uma amostra, evidenciando a baixa eficiência do resfriamento por convecção natural para esse nível de aporte térmico;
 - Para o grupo constituído por paredes de 20 camadas, verificou-se que a configuração utilizando uma velocidade de deslocamento da tocha de 8 mm/s, velocidade de alimentação de arame em 2,2 m/min e passo de 1 mm por camada resultou na deposição das melhores características geométricas, com uma amostra obtida com altura média de $18,61 \pm 1,16$ mm e largura média de $5,93 \pm 0,61$ mm.
4. Quanto às considerações acerca da amostra de 100 camadas:
 - A parede de 100 camadas, obteve geometria estável, com uma altura média de $85,46 \pm 1,56$ mm e largura média de $7,26 \pm 0,94$ mm, utilizando um passo de deslocamento da altura da tocha de 1 mm por camada depositada;
 - O resfriamento passivo (por convecção natural) mostrou-se deficiente após aproximadamente a metade da deposição da parede de 100 camadas, devido ao aumento da temperatura da câmara de deposição e ao tempo de deposição contínua que ocorria. Com isso, é perceptível na geometria o aumento do escorrimento nas camadas superiores devido ao maior aquecimento.

5. Quanto à deposição de paredes anguladas:

- A configuração utilizada na deposição da amostra de 100 camadas (62 A de corrente, 2,6 m/min de velocidade de deposição do arame e 8 mm/s de velocidade de deslocamento da tocha) mostrou-se igualmente eficaz na deposição de paredes anguladas, permitindo depositar uma amostra cônica com uma boa qualidade superficial e geometria estável;
- A amostra cônica apresentou uma inclinação da parede em aproximadamente 63,43° e desnível de 0,8 mm entre a região reta e a angulada, para uma deposição de 10 camadas.

6. Quanto à presença de defeitos:

- Quanto a descontinuidades, não foi observado, através de análise visual, trincas superficiais ou anomalias de oxidação que afetaram a estrutura dos cordões e paredes. Para a porosidade, não houve qualquer presença de poros em escala macroscópica. Porém o efeito de pré-humping se tornou evidente em amostras submetidas a velocidades de deposição na faixa de 12 mm/s ou maiores e o efeito humping foi evidente na amostra submetida pela configuração de corrente de 57 A e velocidade de deslocamento da tocha de 12 mm/s.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, algumas melhorias nas funcionalidades do sistema utilizado podem ser realizadas para permitir aplicação de outros estudos. As observações listadas são:

- Aplicação de um comando implementado em código G para permitir acionamento e desativação da fonte de soldagem, a fim de aplicar métodos de deposição com arco interrompido de forma mais eficiente;
- Aplicar um acompanhamento do código G ao longo do processo, a fim de permitir aplicar pausas ao processo de deposição e permitir retomadas no mesmo ponto do código;
- Instalação de uma câmera térmica na câmara do sistema para possibilitar registros durante o processo de deposição;
- Aplicação de um sistema de resfriamento na câmara do sistema. Em processos muito extensos de deposição, o ambiente eleva consideravelmente a temperatura, prejudicando o resfriamento do material durante os ciclos térmicos e expondo o equipamento a temperaturas excessivas.

Quanto a produção de trabalhos, diversas análises podem ser ainda realizadas para otimização de trajetórias de deposição, estudo de geometrias complexas de deposição, análises estruturais de peças manufaturadas pelo processo MADA e ensaios de resistência em peças fabricadas por manufatura aditiva. O estudo do processo de acabamento superficial através de processos de usinagem também é de extrema importância para prosseguimento dos estudos para aplicações futuras dessa tecnologia.

REFERÊNCIAS

Durante desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas diferentes fontes, totalizando 56, divididas em:

- Revistas: 34 (60,7%)
- Livros: 2 (3,6%)
- Congressos: 2 (3,6%)
- Teses, Dissertações e TCCs: 2 (3,6%)
- Patentes: 3 (5,3%)
- Outros (Manuais, Catálogos e Sites): 13 (23,2%)

Ano	Até 1980	1981-1999	2000-2009	2010-2017	2018	2019	2020	2021
Fontes	1 (1,8%)	2 (3,6%)	2 (3,6%)	12 (21,4%)	5 (8,9%)	10 (17,9%)	18 (32,1%)	6 (10,7%)

Abe, T., Kaneko, J. and Sasahara, H. 2020. “Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing”. *Additive Manufacturing*, Vol. 35, p. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101357>.

AM MEDIA (Additive manufacturing MEDIA), 2020. Disponível em <<https://www.additivemanufacturing.media/articles/the-hidden-complexities-of-wire-arc-additive-manufacturing>>. Acesso em 3 de Maio de 2021.

AFRICAN FUSION, Março 2020. “WAAM and Fronius’ CMT solution”. Disponível em <https://www.crown.co.za/images/Latest_news_2020/African-Fusion/WAAM_and_Fronius_CMT_solution.pdf>. Acesso em 03 de Março de 2021.

Alberti, E.A., Silva, L. J., d’Oliveira, A. S. 2014. “Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade”. *Soldagem & Inspeção*, Vol. 19, N° 02, p. 190-198. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>.

Al-Nabulsi, Z., Mottram, J.T., Gillie, M., Kourra, N. and Williams, M.A. 2021. “Mechanical and X ray computed tomography characterization of WAAM 3D printed steel plate for structural engineering applications”. *Construction and Building Materials*, Vol. 274, 121700. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121700>.

ARS TECHNICA, 2019. “Relativity Space to launch from historic Florida site” por Eric Berger. Disponível em < <https://arstechnica.com/science/2019/01/relativity-space-to-launch-from-historic-florida-site/>>. Acesso em 03 de Maio de 2021.

BUGATTI AUTOMOTIVE, 2018. “Brake Caliper from 3-D printer”. Disponível em < <https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>>. Acesso em 03 de Maio de 2021.

BUGATTI AUTOMOTIVE, 2019. “Bugatti testing the world’s first 3D printed brake caliper”. Disponível em < https://www.youtube.com/watch?v=x_r5oXQ4B8U>. Acesso em 03 de Maio de 2021.

Cadiou, S., Courtouis, M., Carin, M., Berckmans, W. and Le masson, P. 2020. “3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam)”. *Additive Manufacturing*, Vol. 36, p. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101541>.

- Da Silva, L.J., Souza, D.M, de Araújo, D.B., Reis, R.P. and Scotti, A. 2020. “Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 107, 2513-2523. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>.
- Fernandes, M.O. 2016. “Projeto de instalação de um robô cartesiano de 3 graus de liberdade”. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT. TGno06, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.
- FRONIUS, 2020. Manual de operação TransPuls Synergic 5000 CMT Advanced. Código 42,0426,0001,EN 024-15122020. Disponível em <<https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42,0426,0001,PB.pdf>>. Acesso em Abril de 2021.
- Gong, M., Meng, Y., Zhang, S., Zhang, Y., Zeng, X. and Gao, M. 2020. “Laser-arc hybrid additive manufacturing of stainless steel with beam oscillation”. *Additive Manufacturing*, Vol. 33, p. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101180>.
- González, J, Rodríguez, I., Prado-Cerqueira, J-L., Diéguez, J.L., Pereira, A., 2017. “Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology”. *Manufacturing Engineering Society International Conference 2017- MESIC 2017*. Procedia Manufacturing 13, p. 840-847. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.189>.
- Greebmalai, J. and Warinsiriruk, E. 2020. “Multi-heat input technique for aluminum WAAM using DP-GMAW process” *AIP Conference Proceedings*, p.1-7. <https://doi.org/10.1063/5.0022954>
- Greebmalai, J., Warinsiriruk, E. and Wang, Y.T. 2020. “Robot-Assisted Double-Pulse Gas Metal Arc Welding for Wire and Arc Additive Manufacturing” *IFTOMM International Symposium on Robotics and Mechatronics*, p.360-370. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30036-4_32
- Hackenhaar, W., Mazzaferro, J.A.E., Montevecchi, F., Campatelli, G. 2020. “Na experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing”. *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 52, p. 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.051>.
- Hauser, T., Reisch, R.T., Breese, P.P., Nalam, Y., Joshi, K.S., Bela, K., Kamps, T., Volpp, J. and Kaplan, A.F.H. 2021. “Oxidation in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys”. *Additive Manufacturing*, Vol. 41, 101958. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101958>.
- Hu, Zeqi & Hua, Lin & Qin, Xunpeng & Mao, Ni & Ji, Feilong & Wu, Mengwu. 2021. “Molten pool behaviors and forming appearance of robotic GMAW on complex surface with various welding positions”. *Journal of Manufacturing Processes*. 64. 1359-1376. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.061>.
- ISO 5817-1. Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections. International Standard, 32p, 2003
- Jafari, D., Vaneker, T.H.J and Gibson, I. 2021. “Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts”. *Materials and Design*, Vol 202, 109471. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>
- Kruth, J. P., Leu, M. C., Nakagawa, T. 1998. “Progress in Additive Manufacturing and rapid prototyping”. *CIRP Annals*, Vol. 47, Issue 2, p. 525-540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5).

- Kunieda, M., Katoh, R., Mori, Y. 1998. "Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition using electrolyte Jet". *CIRP Annals*, Vol. 47, Issue 1, p. 161-164. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62808-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62808-X).
- Lehmann, T., Jain, A., Jain, Y., Stainer, H., Wolfe, T., Henein, H. and Qureshi, A.J. 2020. "Concurrent geometry- and material-based process identification and optimization for robotic CMT-based wire arc additive manufacturing". *Materials & Design*, Vol. 194, p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108841>.
- Li, J. L. Z., Alkahari, M. R., Rosli, N. A., Hasan, R., Sudin, M. N., Ramli, F. R. 2019. "Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing". *International Journal of Automation Technology*, 13. 346-353. DOI: [10.20965/ijat.2019.p0346](https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346).
- Li, S., Zhang, L. S., Ning, J., Wang, X., Zhang, G. F., Zhang, J. X. and Na, S. J. 2020. "Microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg aluminium alloy samples produced by wire + arc additive manufacturing" *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, Issue 6, pages 13770-13780. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.114>.
- Liu, W., Jia, C., Guo, M., Gao, J. and Wu, C. 2019. "Compulsively constricted WAAM with arc plasma and droplets ejected from a narrow space". *Additive Manufacturing*, Vol. 27, p. 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.003>.
- Lu, X., Zhou, Y.F., Xing, X.L., Shao, L.Y., Yang, Q.X. and Gao, S.Y. 2017. "Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties". *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, Vol. 93, p. 2145-2154. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0636-z>.
- Mendes, R. 2019. "Integração e Planejamento de Trajetória de um robô Cartesiano para Construção de Modelos de Soldagem 3D". Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG- n°17, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 81p.
- MX3D, MX3d bridge, 2020. Disponível em <<https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/>>. Acesso em 03 de Maio de 2021.
- Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S. and Williams, S. 2019. "Microstructure, hardness and mechanical properties of two different unalloyed tantalum wires deposited via wire + arc additive manufacture". *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 83, p. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2019.104974>.
- McAndrew, A., Rosales, M., Colegrove, P., Honnige, J., Ho, A., Fayolle, R., Eytayo, K., Stan, L., Sukrongpang, P., Crochemore, A. and Pinter, Z. 2018. "Interpass Rolling of Ti-6Al-4V Wire + Arc Additively Manufactured Features for Microstructural Refinement" *Additive Manufacturing*, Vol. 21, p. 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>.
- NASA, 2019. "MOXIE Lowered into Rover". Disponível em <<https://mars.nasa.gov/resources/25288/moxie-lowered-into-rover/>>. Acesso em 03 de maio de 2021.
- NASA, 2020. "NASA's Perseverance Rover bringing 3D-printed metal parts to Mars". Disponível em <<https://mars.nasa.gov/news/8778/nasas-perseverance-rover-bringing-3d-printed-metal-parts-to-mars/>>. Acesso em 03 de Maio de 2021.
- Pardal, G., Martina, F. and Williams, S. 2019. "Laser stabilization of GMAW additive manufacturing of Ti-6Al-4V components". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 272, p. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.036>.

- Planckaert, J., Djermoune, E., Brie, D., Briand, F. and Richard, F. 2010. “Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies”. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, Issue 4, p. 1004-1020. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.07.011>.
- Ralph, B. 1925. “Method of making decorative articles”. Patente US1533300A, in. Google Patents.
- Reis, R.P., Scotti, A., Da Silva, L.J. 2018. “Técnica de resfriamento ativo para manufatura aditiva” Patente BR 102018015314-5 A2. 04 fev. 2020.
- RELATIVITY SPACE, 2020. “Terran I - Payload user’s guide”. Version 2. Disponível em < https://static1.squarespace.com/static/59a8fb50d2b8575fad311abb/t/5f68d35cda98575604906432/1600705386517/Relativity+Terran+1+Payload+User%27s+Guide_Rev2.0.pdf >. Acesso em 03 de Maio de 2021.
- Seow, C. E., Zhang, J., Coules H. E., Wu, G., Jones, C., Ding, J. and Williams, S. 2020. “Effect of crack-like defects on the fracture behaviour of Wire + Arc Additively Manufactured nickel-base Alloy 718”. *Additive Manufacturing*, Vol. 36, 101578. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101578>.
- SCHNEIDER ELECTRIC. Lexium Linear Motion, Linear axes and multi-axis systems, Catalogue, abril de 2011. Disponível em: < https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Brochure&p_File_Name=DIA7ED1090605EN.pdf&p_Doc_Ref=DIA7ED1090605EN >. Acesso em 24 de Abril de 2021.
- Scotti, A. e Ponomarev, V. 2008. “Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho”. São Paulo.
- Shukla, P., Dash, B., Kiran, D.V. and Bukkapatnam, S. 2020. “Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process”. *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, p. 725-729. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.105>.
- Su, C. and Chen, X., 2019. "Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT)", *Industrial Robot*, Vol. 46 No. 2, p. 259-266. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2018-0233>.
- Traidia, A. and Roger, F. 2011. “Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current gta welding”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, p. 2163–2179. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.12.005>.
- TECHNO ALLOYS, 2016. Catálogo Metal Arc 76 – ER70S-6. Disponível em < [https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/aco-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20ARC%2076%20\(ER%2070S-6\).pdf](https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/aco-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20ARC%2076%20(ER%2070S-6).pdf) >. Acesso em 20 de Abril de 2021.
- Volpato, N. 2017. “Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D”. Blucher. ISBN 978-85-212-1150-1.
- Wang, D., Lu, J., Tang, S., Yu, L., Fan, H., Ji, L. and Liu, C. 2018. “Reducing porosity and refining grains for arc additive manufacturing aluminum alloy by adjusting arc pulse frequency and current”. *Materials* 11, n. 8: 1344. <https://doi.org/10.3390/ma11081344>.
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J. and Norrish, J. 2018a. “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement”. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35, p. 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.

- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H and Fei, Z. 2018b. “The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy”. *Journal of materials processing Tech.*, Vol. 258, p. 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024>.
- Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Fan, H., Shi, X., Fu, J. and Ma, S. 2017. “Effect of Molten Pool Size on Microstructure and Tensile Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Alloy”. *Materials*, Vol. 10, 749. <https://doi.org/10.3390/ma10070749>.
- Wu, Q., Mukherjee, T., De, A. and DebRoy, T. 2020. “Residual Stress in wire-arc additive manufacturing – Hierarchy of influential variables” *Additive manufacturing*, Vol. 35, 101355. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101355>.
- Yan, Z., Zhao, Y., Jiang, F., Chen, S., Li, F., Cheng, W. and Ma, X., 2021. “Metal transfer behaviour of CMT-based step-over deposition in fabricating slant features”. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 71, p. 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.027>.
- Zhang, X., Zhou, Q., Wang, K., Peng, Y., Ding, J., Kong, J. and Williams, S. 2019. “Study on microstructure and tensile properties of high nitrogen Cr-Mn steel processed by CMT wire and arc additive manufacturing”. *Materials & Design*, Vol. 166, p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.10761>.
- Ziberov, Maksym. 2013. “Avaliação da pulsação térmica para controle da poça de fusão em soldagem de raiz com MIG/MAG automatizado”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 114p.
- Ziberov, M., Kovalenko, O., Skhabovskiy, I. Reis, R.P. e Scotti, A. 2015. “Aparelho configurado para soldagem MIG/MAG automatizada de passes de raiz e método de soldagem MIG/MAG automatizada”. Patente, número do registro: BR1020150301197.



11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
24 a 26 de maio de 2021, Curitiba, PR, Brasil

MÉTODOS PARA MANUFATURA ADITIVA DE METAIS A ARCO ELÉTRICO: UMA REVISÃO

André Luiz Brito Novelino

Guilherme Caribe de Carvalho

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.
andre_novelino@hotmail.com
gccarval@unb.br

Ruham Pablo Reis

Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC, Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Santa Mônica, CEP 38400-902, Uberlândia-MG.
ruhamreis@ufu.br

Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.
mziberov@unb.br

Resumo. A manufatura aditiva de metais é um processo de fabricação muito estudado e introduzido por diversas instituições no mundo nos âmbitos acadêmico-científico e industrial. Este processo possui grande potencial de crescimento, sendo adotado por empresas pela possibilidade de confecção de peças complexas e com economia de material. Diversos métodos de manufatura aditiva de metais foram criados, onde o processo de deposição por arco elétrico o procedimento mais acessível dentre eles. Com isso, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão acerca das tecnologias disponíveis e os métodos de deposição de material por arco elétrico no campo da manufatura aditiva de metais. Através deste estudo, é possível concluir que há uma grande diversidade de processos e de uso de materiais variados. Além disso, observa-se também que o processo CMT-GMAW tem se destacado, devido a sua alta capacidade de controle na deposição.

Palavras chave: manufatura aditiva, WAAM, método de deposição, CMT-GMAW.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva de metais é um conceito relativamente recente comparado com outros processos tradicionais no mercado e de grande importância para economia no uso de materiais e para otimização dos produtos com a possibilidade de criação de modelos em larga escala com uma taxa de deposição alta e um menor custo de equipamento (Wu *et al.*, 2018). Nesta área, em crescente desenvolvimento tanto no campo acadêmico-científico quanto na indústria, diversos processos foram criados, entre eles a Manufatura Aditiva (MA) por Arco Elétrico, também tipicamente conhecida na nomenclatura em inglês como *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM). Abordagens acadêmicas começaram a ser desenvolvidas no final do século XX, como os trabalhos de Kruth, *et al.* (1998) e Kunieda, *et al.* (1998) e o tema começou a se expandir nos últimos 10 anos (Bai, *et al.*, 2013 e Colegrove, *et al.*, 2013).

De acordo com Vimal *et al.* (2020), a deposição de metal por WAAM é um processo bem estruturado e complexo, proveniente dos processos de soldagem a arco elétrico, em que se utiliza uma tocha com alimentação contínua de material na forma de arame, para a deposição de material, e uma fonte de alimentação de energia para geração do arco. Este pode ser gerado entre o arame eletrodo e o material de base, no caso do processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), ou entre um eletrodo não consumível e o material de base, no caso do processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), ou ainda entre um eletrodo não consumível e o bocal constritor, no caso do processo PAW (*Plasma Arc Welding*) com arco não transferido. O material é depositado camada por camada (Marinelli *et al.*, 2019) formando-se a geometria requerida ao final. Por ser um processo automatizado, todos esses componentes são administrados por um controlador e indicados em uma central, apresentando os valores de tensão e corrente, velocidade de deposição do material, assim como velocidade e trajetória da tocha. A análise destes parâmetros é importante para qualidade do cordão/camada e da deposição do material além do controle da quantidade de calor adicionado. Dentre os processos de soldagem a arco citados, o mais utilizado tem sido o GMAW, principalmente nos modos de transferência pulsada (P-GMAW) e *Cold Metal Transfer* (CMT-GMAW), por possuir um maior controle do aporte térmico, e com isso, da poça de fusão.

A composição da peça a ser manufaturada também influencia no processo escolhido, assim como os parâmetros utilizados nesse processo, uma vez que a condutividade elétrica, ponto de fusão e molhabilidade do material na poça de

Observação: primeira página do artigo.

IMPORTÂNCIA DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO NA MANUFATURA ADITIVA POR ARCO ELÉTRICO: UMA REVISÃO

André Luiz Brito Novelino
Guilherme Caribe de Carvalho
Maksym Ziberov

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília-DF.
andre_novelino@hotmail.com
gccarval@unb.br
mziberov@unb.br

Resumo. A manufatura aditiva de metais por arco elétrico atrai grande interesse de ambas as áreas acadêmica e industrial. Para auxiliar os estudos, modelos computacionais com diversos objetivos e metodologias vem sendo criados, estudados e validados, contribuindo com a evolução e compreensão do processo. O objetivo desse trabalho é apresentar uma revisão dos principais métodos de modelagem utilizados na área de manufatura aditiva de metais por arco elétrico e mostrar os modelos numéricos utilizados, comparando os resultados obtidos com os dados experimentais. Além disso, são citadas as contribuições desses modelos para otimização do processo e os desafios presentes em cada método. Constatou-se que os modelos obtiveram, em grande maioria, bons resultados em comparação com as validações realizadas, obtendo uma boa confiabilidade para as aplicações que são propostas. No entanto, modelos mais completos ainda são inviáveis para aplicações industriais, uma vez que a grande demanda de processamento requer um tempo de simulação muito alto, não possibilitando uma abordagem em larga escala do processo.

Palavras chave: Manufatura aditiva. Arco elétrico. WAAM. Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Novas tecnologias vêm sendo implementadas industrialmente, com o objetivo de aumentar a produção e reduzir os custos, sempre mantendo e/ou melhorando os padrões de qualidade e sustentabilidade. Uma dessas tecnologias é a manufatura aditiva (MA) de metais por arco elétrico, também conhecida pela nomenclatura em inglês como *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM), um processo que se destaca pela capacidade de criação peças complexas, que possui uma alta taxa de deposição de material e custo menor quando comparado a outros processos de MA (Wu, *et al.*, 2018).

O processo WAAM baseia-se no uso de tecnologias vindas de processos de soldagem, como o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), *Cold Metal Transfer* (CMT) variante do GMAW e *Plasma Arc Welding* (PAW), além de alguns processos híbridos utilizando *Laser Beam Welding* (LBW). A composição de um equipamento consiste em usar uma fonte, especificada para cada processo, e uma tocha ou bocal, juntamente com um sistema de alimentação, que é direcionada por um sistema automatizado, como um braço mecânico (Shukla, *et al.*, 2020). Cada processo possui características diferentes na abertura do arco elétrico, temperatura de trabalho e deposição do material, sendo recomendados assim para aplicações e materiais diferentes.

Porém, por se tratar de um processo com física complexa, ensaios experimentais para determinação e otimização de parâmetros se torna inviável, devido aos altos custos, assim, modelos numéricos computacionais passaram a ser criados para auxiliar na aquisição de dados e determinação de parâmetros, facilitando a obtenção dos parâmetros e reduzindo os custos e auxiliando na compreensão da física do processo.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão de modelos numéricos aplicados em manufatura aditiva, mostrando a importância do seu uso para a otimização dos processos, além disso, pretende-se apresentar as metodologias utilizadas para a modelagem, com abordagens bidimensionais e tridimensionais de modelos térmicos e multifísicos.

2. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Um dos métodos mais comuns para as simulações computacionais é a análise por elementos finitos (FE), podendo-se ainda em alguns modelos utilizar a análise por diferenças finitas (FD). A modelagem através do FE utiliza elementos e nós na constituição da malha do problema, discretizando todo o domínio de análise (Moaveni, 2008). A modelagem por FD utiliza também um processo de discretização, porém utilizando métodos mais simples de formulação, com geometrias simplificadas e formuladas localmente. (Özişik, *et al.*, 2017).

Observação: primeira página do artigo.



COB-2021-0626
DEFECTS IN WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURED
COMPONENTS: A REVIEW

André Luiz Brito Novelino

Maksym Ziberov

University of Brasilia, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Zip code 70910-900, Brasilia-DF, Brazil
 andre_novelino@hotmail.com
 mziberov@unb.br

***Abstract.** As a potential process for industry, the Wire and Arc Additive Manufacturing process has been probed for implementation in factory lines, once it has high deposition rates, material economy, feasible equipment and it can manufacture large and complex components. However, this process can present various defects if wrong parameters were used, causing high porosity, deformation, cracks and fractures, delamination, residual stress, and oxidation. Therefore, industrial companies and academic institutions has been studying these defects and its causes, to develop new methods to solve them and achieve higher quality in additive manufacturing parts. This article reviews the common defects found, for different materials deposited by different Wire Arc Additive Manufacturing processes, such as CMT-GMAW, GTAW, PAW and hybrid Laser processes. The main causes for each type of defect are presented followed by the methods that can be applied for solving them. Computer assisted simulations, its role in parameters optimization and its uses as forecasting defects method are also addressed. It was possible to notice that they can obtain good predictions for microstructure result, work temperature and which heat treatment can be done to solve problems with residual stress and cracks. Porosity and deformation can also be controlled with process technologies, as CMT-GMAW.*

Keywords: WAAM, Defects, Parameters optimization, Quality improvement, Inspection methods.

1. INTRODUCTION

Additive manufacturing (AM) process are becoming increasingly widespread in industrial segments due to the capability of doing parts with complex geometry with material and production economy. Many manufacturing methods can be applied in AM, such Laser Sintering, Directed Laser Deposition and Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). The WAAM process has great potential, once the process has feasible equipment, compared with others AM deposition methods, and can manufacture large components with high deposition rates.

The WAAM process can be implemented in different industrial applications, such as: in automotive, aerospace, and civil construction. According to Wu *et al.* (2018) there are three main steps during fabrication: planning, deposition, and post processing. Planning step involves CAD model, 3D slicing, equipment setup, and programming the torch path and welding parameters for deposition. After deposition, post process can be applied to improve surface quality, like machining, and improve mechanical properties, like heat treatments or forging.

Recently Novelino *et al.* (2021a) mention different deposition methods used in WAAM processes such Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Plasma Arc Welding (PAW). Furthermore, hybrid methods with laser deposition and variants from the conventional ones, as Cold Metal Transfer (CMT-GMAW) can also be implemented.

However, to be introduced into production lines WAAM methods needs to achieve high quality requirements, so it is important to study deposition process behavior and identify key factors that can generate defects and apply techniques to minimize them. Thus, this paper aims to make a review on the possible defects that can be present in WAAM parts and how they are generated during the process. As well, as which inspection and prediction methods can be applied to improve deposition and quality control on the manufactured components.

2. DEFECTS PRESENT IN WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING

2.1. Cracks

Wire and arc additive manufacturing processes are susceptible to crack defects during the deposition, as observed in Fig. 1, which can harm mechanical properties of the final product. As an important effect to be studied, Seow *et al.* (2020) focus their research on crack defects and fracture behavior of Inconel 718 parts deposited by Plasma Arc Welding (PAW).

Observação: primeira página do artigo.