

**Igor Oliveira Felice**

**Avaliação Geométrica, Térmica e de Porosidade de  
Pré-formas em Manufatura Aditiva por Deposição a  
Arco com Resfriamento Ativo por Quase-Imersão**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2020

**Igor Oliveira Felice**

**Avaliação Geométrica, Térmica e de Porosidade  
de Pré-formas em Manufatura Aditiva por  
Deposição a Arco com Resfriamento Ativo por  
Quase-Imersão**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

**UBERLÂNDIA - MG**

**2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

F314a Felice, Igor Oliveira, 1993-  
2020 Avaliação geométrica, térmica e de porosidade de pré-formas em manufatura aditiva por deposição a arco com resfriamento ativo por quase-imersão [recurso eletrônico] / Igor Oliveira Felice. - 2020.

Orientador: Ruham Pablo Reis.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3612>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Reis, Ruham Pablo, 1979-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br


**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 564, COPEM				
Data:	24/03/2020	Hora de início:	08:35	Hora de encerramento:	12:05
Matrícula do Discente:	11812EMC011				
Nome do Discente:	Igor Oliveira Felice				
Título do Trabalho:	Avaliação Geométrica, Térmica e de Porosidade de Pré-formas em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco com Resfriamento Ativo por Quase-Imersão				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	CNPq 315092/2018-1 DT 2018 - Desenvolvimento de Novas Tecnologias em Fabricação por Processos a Arco Elétrico				

Reuniu-se na Sala 206 do Bloco 1M, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosenda Valdés Arencibia (FEMEC/UFU); Sadek Crisostomo Absi Alfaro (UnB) e Ruham Pablo Reis (FEMEC/UFU), orientador do candidato. Ressalta-se que o Prof<sup>o</sup>. Sadek Crisostomo Absi Alfaro e a Prof<sup>a</sup>. Rosenda Valdés Arencibia participaram da defesa por meio de Skype desde a cidade de Cranfield/Inglaterra e Uberlândia/MG, respectivamente, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020 e o orientador e o aluno participaram *in loco*.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Ruham Pablo Reis, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reiser, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/03/2020, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/03/2020, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sadek Crisostomo Absi Alfaro, Usuário Externo**, em 24/03/2020, às 18:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1960039** e o código CRC **61208DEA**.

***Não existe nada de completamente errado no mundo,  
até mesmo um relógio parado consegue estar certo duas vezes por dia.***

***Paulo Coelho***

## AGRADECIMENTOS

Certo tempo atrás Raul Seixas compôs que “nunca se vence uma guerra lutando sozinho”. Talvez esta defesa seja o momento em que essa proposição mais fez sentido em minha vida.

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre direcionando minhas escolhas e protegendo minha vida com segurança, saúde e ânimo.

À minha família, especialmente ao meu pai Cláudio, por não medir esforços para ver meu sucesso. À minha mãe Rosângela, que sempre foi um exemplo de persistência, luta, resiliência e dedicação não só profissional, mas principalmente naquilo que são seus valores pessoais que direcionam o seu caráter ímpar. Eu te amo, mãe. Às minhas irmãs Jéssica, e Ágatha que me motivam diariamente com a mais sincera torcida e compartilham comigo momentos de alegria e tristeza.

Ao Prof. Ruham Pablo Reis que, acima da função de orientação, serviu como um grande motivador na rotina que por muitas vezes se tornou exaustiva. Exalto sua paciência, dedicação, disposição e competência que foram fundamentais para a execução dos trabalhos que foram realizados.

Ao Leandro João da Silva, pelo conhecimento passado, paciência, disposição e principalmente pelo auxílio prestado nas etapas de fabricação das pré-formas. Em soma, à Danielle Monteiro, que muito auxiliou na execução das atividades deste trabalho.

Aos amigos, obrigado pelo contínuo incentivo na minha formação e por apoiarem minhas escolhas e sonhos. Em especial, meus mais sinceros agradecimentos ao Fernando Nunes, Caroline Soler, Isabela Barbosa e Rafaela Messias que acompanham minha jornada há mais de 20 anos.

Aos colegas de UFU, tanto da graduação como da pós-graduação, agradeço pelo companheirismo e por, com muito ânimo, compartilharem comigo destes anos de trabalho. Aos demais professores, técnicos e alunos, principalmente aos ligados ao LAPROSOLDA, deixo minha enorme gratidão pela fundamental contribuição. Em especial ao Prof. Douglas Araújo, Prof. Pedro A. Q. de Assis, Profa. Regina Garcia, Enga. Amanda Figueira, Eng. Douglas Serrati, MSc. Elizângela, Eng. Fernando Scotti, Andressa Brito, Cassiano Costa, Natan Fernandes, Frederico Vilela, Gabriel Ferrari e Ana Gabriela Vilarinho.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento através do processo 88882.349850/2019-01.

FELICE, I. O. **Avaliação Geométrica, Térmica e de Porosidade de Pré-formas em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco com Resfriamento Ativo por Quase-Imersão.** 2020. 150 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

## RESUMO

*Na manufatura aditiva por fusão-deposição a arco (WAAM), a construção de pré-formas mais próximas da geometria final, ou seja, com uma menor razão “buy-to-sell”, reflete em menor pós-processamento e maior produtividade. Esse fator se torna ainda mais importante para materiais de alto custo, de difícil usinabilidade e em situações onde o acúmulo de calor se torna um limitante (típico de processos com energia direcionada). Dessa forma, a avaliação da influência de determinados parâmetros na qualidade final da estrutura é essencial. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo verificar como a velocidade de deposição, velocidade de alimentação e LEWD (distância entre a aresta da camada em deposição e a lâmina d’água) influenciam na geometria, nível de porosidade e ciclos térmicos do processo WAAM utilizando técnica CMT e aplicando gerenciamento térmico por RAQI (Resfriamento Ativo por Quase-Imersão). Softwares desenvolvidos para verificação da geometria com base em análise de imagens foram utilizados, sendo um via análise de seção transversal e outro não invasivo com reconstrução virtual da superfície, junto com medições com paquímetro. A técnica de gravimetria foi aplicada para estimar o volume de vazios. A temperatura foi monitorada em uma distância de 30 mm à frente do arco elétrico. Foi observado que menores velocidades de alimentação, maiores velocidades de deposição e menores LEWDs (com um limite de aproximadamente 8 mm) reduzem o calor imposto. Estas condições promoveram uma redução da ondulação superficial, maior altura e menor largura das pré-formas. No nível de porosidade, maior volume de vazios foram observados quando a lâmina de água de resfriamento estava mais próxima da poça fundida. Dessa forma, foi possível concluir a importância de uma escolha cuidadosa dos parâmetros de deposição na busca de mitigar o calor imposto no processo e conseqüentemente seus efeitos negativos sobre a geometria e porosidade.*

**Palavras-Chave:** WAAM, CMT, gerenciamento térmico, resfriamento ativo, análise por imagem, geometria, nível de porosidade, avaliação térmica.



FELICE, I. O. **Geometric, Thermal and Porosity Evaluation of Preforms in WAAM with Near-Immersion Active Cooling**. 2020. 150 f. MSc. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

*In wire + arc additive manufacturing (WAAM), the construction of preforms closer to the final geometry, that is, with a lower “buy-to-sell” ratio, reflects in less post-processing and greater productivity. This factor becomes even more important for materials of high cost, tough machinability and in situations where the heat accumulation becomes a limiting factor (typical of processes with directed energy deposition). Thus, the evaluation of the influence of certain parameters on the final quality of the structure is essential. Therefore, the present work aims at verifying how the deposition speed, wire feed speed and LEWD (layer edge to water distance) influence the geometric quality, porosity level and thermal cycles of the WAAM process by using the CMT technique and applying the NIAC (Near-Immersion Active Cooling) thermal management. Software developed to check geometry based on image analysis were used, one via cross-section analysis and another made use of a non-invasive method with a virtual reconstruction of the surface, along with measurements with a caliper. The Archimedes technique was applied to estimate the volume of voids. The temperature was monitored at a distance of 30 mm ahead of the electric arc. It was observed that lower wire feed speeds, higher deposition speeds and lower LEWDs (with a limit of approximately 8 mm) reduce the heat imposed by the process. These conditions promoted a reduction on the surface waviness, greater height and lower width of the preforms. On the porosity level, a greater volume of voids was observed when the cooling water lamina was closer to the molten pool. Thus, it was possible to conclude the importance of a careful choice of deposition parameters seeking to mitigate the heat imposed by the process and consequently its negative effects on the geometry and porosity.*

**Keywords:** WAAM, CMT, thermal management, active cooling, image analysis, geometric quality, porosity level, thermal evaluation.

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

AE	Arco Elétrico
Al	Alumínio
$A_{aprov}$	Área de material aproveitável
$A_{dep}$	Área de material depositado
$A_p$	Aproveitamento mínimo de material
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BIMP	<i>Bureau</i> Internacional de Pesos e Medidas
$C$	Calor específico do material
CA	Corrente Alternada
CAD	Computer Aided Design
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CMT – ADV	<i>Cold Metal Transfer - Advanced</i>
CMT – P	<i>Cold Metal Transfer - Pulse Advanced</i>
CMT – PADV	<i>Cold Metal Transfer - Pulse</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
DED	Deposição por Energia Direcionada
$d_i$	Distância do ponto ao plano (ou reta)
$E$	Erro sistemático
EBM	<i>Electron-Beam Melting</i>
EMR	Espessura mínima de material a ser removido
$E_{max}$	Erro máximo associado à medição
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FE	Feixe de Elétrons
FL	Feixe de <i>Laser</i>
GMA	<i>Gas Metal Arc</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTA	<i>Gas Tungstein Arc</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
$h_n$	Altura da superfície
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

$k$	Fator de abrangência
LAPROSOLDA	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
LEWD	<i>Layer Edge to Water Distance</i>
$m_{ar}$	Massa da amostra medida em ar
$m_{liquido}$	Massa da amostra medida imersa em líquido
$m_j$	Massa da camada “j” depositada
MA	Manufatura Aditiva
MA-EBM	Manufatura Aditiva - <i>Electron-Beam Melting</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i>
$n$	Número de elementos da amostra
$n^a$	Número da camada em deposição
$N$	Número de pontos da superfície virtual
Nd-YAG	Neodímio-Ítrio-Alumínio-Granada
NIAC	<i>Near-Immersion Active Cooling</i>
PA	<i>Plasma Arc</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PBF	<i>Power Bed Fusion</i>
$Q_{cond}$	Calor por condução
$Q_{rad}$	Calor por radiação
$Q_{conv-ar}$	Calor por convecção via ar
$Q_{conv-liq}$	Calor por convecção via líquido refrigerante
$r$	Raio do arame
$R^2$	Coefficiente de determinação
RAQI	Resfriamento Ativo por Quase-Imersão
RMD	<i>Regulated Metal Deposition</i>
$s$	Desvio padrão associado à medição
SI	Sistema Internacional
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
Ti	Titânio
$t_j$	Tempo de deposição da camada “j”
$T_j$	Temperatura de interpasse
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
$U$	Incerteza expandida
$u(a)$	Incerteza padrão associada à medição
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

$v$	Velocidade de alimentação do arame
V	Vanádio
$V_A$	Velocidade de Alimentação de Arame
$V_D$	Velocidade de Deposição
VMR	Volume mínimo de Material a ser Removido
$V_{vazios}$	Volume de vazios
$W$	Parâmetro de ondulação
WAAM	<i>Wire + Arc Additive Manufacturing</i>
$\emptyset$	Diâmetro
$\Delta h_n$	Diferença de alturas entre superfícies
$\rho$	Densidade
$\rho_{aluminio}$	Densidade referência do arame de alumínio
$\rho_{amostra}$	Densidade da amostra
$\rho_{liquido}$	Densidade do líquido

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bibliometria para a quantidade de artigos relacionados a “ <i>Additive Manufacturing</i> ” e “ <i>Metal Additive Manufacturing</i> ” na base de dados “ <i>Scopus</i> ”.	23
Figura 2 – Estrutura externa de trem de pouso fabricada por MA em titânio	27
Figura 3 – Esquema do processo fusão em leito de pó utilizando feixe de <i>laser</i>	28
Figura 4 – Deposição por energia direcionada utilizando feixe de elétrons.	29
Figura 5 – Classificação dos processos de manufatura aditiva de metais.	30
Figura 6 – Fluxo de trabalho para manufatura aditiva de metais.	31
Figura 7 – Processos de MA de metais e suas características	32
Figura 8 – Custos de MA utilizando titânio, em dólares por $\text{cm}^3$	34
Figura 9 – Processo DED com utilização de arame metálico	36
Figura 10 – Sistema robótico de soldagem utilizado em WAAM.	37
Figura 11 – Processo de WAAM utilizando técnica de soldagem GTAW.	38
Figura 12 – Processo CMT e os sinais de velocidade de alimentação, corrente e tensão.	39
Figura 13 – Equipamentos para o processo CMT.	41
Figura 14 – Parede em colapso após fabricação por WAAM com alto acúmulo de calor	42
Figura 15 – Temperatura de interpasse e acúmulo de calor com aumento do número de camadas	43
Figura 16 - Comparativo entre paredes depositadas por WAAM com gerenciamento térmico e com resfriamento natural até a temperatura de interpasse equivalente.	44
Figura 17 – Representação esquemática do RAQI	46
Figura 18 – Fluxo de calor para as três condições testadas por da Silva (2019).	47
Figura 19 - Secções transversais centrais de pré-formas construídas com diferentes técnicas de gerenciamento térmico: (a) RAQI; (b) resfriamento passivo (c) resfriamento natural	47
Figura 20 – Efeito “ <i>stair-step</i> ” de ondulação superficial em MA por WAAM	49
Figura 21 – Maior altura e menor ondulação para pré-formas fabricadas com RAQI	50
Figura 22 – Porosidade longitudinal quase nula de paredes fabricadas por WAAM CMT-PADV. (a) $V_A = 7,5 \text{ m/min}$ , $V_D = 0,5 \text{ m/min}$ (b) $V_A = 6 \text{ m/min}$ , $V_D = 0,4 \text{ m/min}$	52
Figura 23 – Efeito de técnicas de gerenciamento térmico na densidade relativa de pré-formas	53
Figura 24 – Fluxograma das principais atividades executadas no trabalho.	54
Figura 25 – Deposição multicamadas bidirecionais.	56
Figura 26 – Representação esquemática dos equipamentos de deposição	56
Figura 27 – Cuba de trabalho com destaque para o flutuador magnético.	57

Figura 28 – Visão geral dos equipamentos de deposição com RAQI: (1) tanque de trabalho, (2) flutuador magnético, (3) tocha CMT, (4) sistema de movimentação, (5) tanque de água pressurizada, (6) sistema hidráulico e pneumático, (7) controlador CNC e (8) cortina de proteção.....	59
Figura 29 – Fluxograma das etapas para reconstrução virtual da superfície.....	63
Figura 30 – Esquema ilustrativo do escaneamento das pré-formas.....	64
Figura 31 – Pré-forma antes (acima) e após (abaixo) pintura com tinta <i>spray</i> preto fosco. ...	64
Figura 32 – Equipamentos utilizados no escaneamento: (1) <i>laser</i> ; (2) pré-forma; (3) câmera; (4) plataforma de apoio da mesa CNC; (5) gabarito para calibração.....	65
Figura 33 – Etapa de calibração do sistema de medição (a) vertical (b) horizontal pela imagem do gabarito.....	65
Figura 34 – Seleção da região de análise do escaneamento. ....	66
Figura 35 – <i>Frame</i> de número 89 em análise. ....	66
Figura 36 – <i>Frame</i> de número 89 após tratamento com indicação da linha de reconstrução (em amarelo). ....	67
Figura 37 – Acima a imagem original da pré-forma antes da pintura. Abaixo sua reconstrução virtual por meio do escaneamento. ....	67
Figura 38 – Pontos da superfície da pré-formas (em azul) e superfície de ajuste em cinza. ....	68
Figura 39 – Pontos da superfície corrigida em torno do plano horizontal. ....	68
Figura 40 – Diagrama esquemático para determinar ondulação de pré-formas de WAAM. .	69
Figura 41 - Diagrama esquemático para determinar o volume mínimo de material a ser removido das pré-formas. ....	69
Figura 42 - Diagrama esquemático para determinar EMR. ....	70
Figura 43 – Ilustração da pré-forma com indicação das regiões de corte (dimensões em mm). ....	72
Figura 44 – Seção transversal (a) original e (b) tratada para análise do <i>software</i> de perfilografia.....	72
Figura 45 – (a) Imagem tratada da seção transversal (b) reconstrução virtual do perfil; (c) gráfico da altura x largura da pré-forma. ....	73
Figura 46 – Esquema representativo da área de material aproveitável e removido. ....	74
Figura 47 – Localização dos pontos de medição A, B e C por método convencional. ....	75
Figura 48 - Exemplo de fatia central utilizada na gravimetria das pré-formas: (a) seção transversal (b) vista lateral. ....	76
Figura 49 – Plataforma para medição de porosidade por gravimetria: (a) projeto em CAD; (b) montada após impressão 3D. ....	77

Figura 50 – Medição da massa (a) à seco e (b) imersa para cálculo de densidade do arame depositado (referência).....	78
Figura 51 – Representação dos equipamentos de aquisição de dados do pirômetro: (a) antes da poça de fusão (b) após a poça de fusão. ....	80
Figura 52 – (a) Histograma apresentando uma distribuição bimodal para a temperatura; (b) gráfico Box & Whisker localizando o primeiro (25 %) e terceiro (75 %) quartil. ....	81
Figura 53 – Gabarito utilizado na validação sob (a) vista superior e (b) vista lateral. ....	82
Figura 54 – Identificação das alturas e diferenças entre alturas na seção transversal do gabarito.....	83
Figura 55 – Localização dos 5 pontos de medição das alturas das superfícies do gabarito. ....	83
Figura 56 – Verificação de alinhamento do gabarito com uso de relógio comparador.....	84
Figura 57 – Distribuição de equipamentos no escaneamento: (1) Câmera de filmagem; (2) Laser; (3) Fonte eletrônica; (4) Suporte da mesa CNC; (5) Gabarito. ....	85
Figura 58 – Gabarito (a) sem pintura e (b) com pintura.....	86
Figura 59 – Laser incidido na superfície (a) sem pintura e (b) com pintura. ....	86
Figura 60 – Indicação do ângulo de inclinação do laser durante escaneamento.....	89
Figura 61 –Escaneamento para os ângulos (a) 30°, (b) 40°, (c) 50° e (d) 60°. ....	90
Figura 62 - Intensidade do brilho do laser na superfície para as duas condições diferentes de potência.....	92
Figura 63 – Escaneamento do gabarito: (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) em perspectiva. ....	94
Figura 64 - Valores médios para a altura das pré-formas medida manualmente no ponto A. ....	96
Figura 65 - Valores médios para a altura das pré-formas medida manualmente no ponto B. ....	96
Figura 66 - Valores médios para a altura das pré-formas medida manualmente no ponto C. ....	97
Figura 67 - Valores médios para largura das pré-formas medida manualmente no ponto A. ....	97
Figura 68 - Valores médios para largura das pré-formas medida manualmente no ponto B. ....	97
Figura 69 - Valores médios para largura das pré-formas medida manualmente no ponto C. ....	98
Figura 70 – Comparativo geral de altura da região central para as principais diferentes condições de deposição com e sem aplicação de resfriamento.....	98
Figura 71 – Comparativo de largura da região central para as diferentes condições de deposição com e sem aplicação de resfriamento.....	99
Figura 72 - Pré-formas para a condição de deposição mais fria: (a) com resfriamento natural e paradas (b) com RAQI e (c) sem resfriamento.....	100

Figura 73 - Pré-formas para a condição de deposição intermediária: (a) com resfriamento natural e paradas (b) com RAQI e (c) sem resfriamento. ....	101
Figura 74 – Pré-formas para a condição de deposição mais quente: (a) com resfriamento natural e paradas (b) com RAQI e (c) sem resfriamento. ....	102
Figura 75 - Gráfico de Pareto para o ajuste da variável altura da região central das pré-formas. ....	103
Figura 76 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros $V_D$ e $V_A$ sobre a altura da região central da pré-forma. ....	104
Figura 77 – Gráfico de Pareto para o ajuste da variável largura da região central das pré-formas. ....	105
Figura 78 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros $V_D$ e $V_A$ sobre a largura da região central da pré-forma. ....	105
Figura 79 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros LEWD e $V_A$ sobre a largura da região central da pré-forma. ....	106
Figura 80 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros LEWD e $V_D$ sobre a largura da região central da pré-forma. ....	107
Figura 81 – Seções transversais da extremidade da (a) pré-forma 17 e (b) pré-forma (21) representando um baixo e alto parâmetro de ondulação, respectivamente. ....	108
Figura 82 - Comparação do parâmetro de ondulação (mm) entre as regiões de extremidade e central das pré-formas. ....	109
Figura 83 – Comparação do parâmetro de aproveitamento (%) entre as regiões de extremidade e central das pré-formas. ....	109
Figura 84 – Comparação do aproveitamento (%) nas extremidades para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico. ....	110
Figura 85 - Comparação do aproveitamento (%) na região central para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico. ....	110
Figura 86 - Comparação do parâmetro de ondulação (mm) nas extremidades para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico. ....	111
Figura 87 - Comparação do parâmetro de ondulação (mm) na região central para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico. ....	111
Figura 88 – Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o aproveitamento nas extremidades das pré-formas (%). ....	112
Figura 89 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do aproveitamento nas extremidades em função dos parâmetros LEWD e $V_A$ . ....	113
Figura 90 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do aproveitamento nas extremidades em função dos parâmetros LEWD e $V_D$ . ....	114



Figura 91 - Perfis de resposta do aproveitamento na região central em função dos parâmetros (a) $V_A$ e $V_D$ (b) LEWD e $V_A$ (c) LEWD e $V_D$ .....	115
Figura 92 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o parâmetro de ondulação da região de extremidade das pré-formas. ....	116
Figura 93 – Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o parâmetro de ondulação da região central das pré-formas. ....	117
Figura 94 - Perfis e superfícies de resposta do parâmetro de ondulação na região de extremidade em função dos parâmetros (a) $V_A$ e $V_D$ (b) LEWD e $V_D$ (c) LEWD e $V_A$ .....	118
Figura 95 - Perfis e superfícies de resposta do parâmetro de ondulação na região central em função dos parâmetros (a) $V_A$ e $V_D$ (b) LEWD e $V_D$ (c) LEWD e $V_A$ .....	119
Figura 96 – Gráfico comparativo entre pré-formas para o parâmetro de ondulação e incertezas pelo escaneamento. ....	121
Figura 97 – Gráfico comparativo entre pré-formas para o VMR e incertezas pelo escaneamento. ....	121
Figura 98 - Gráfico comparativo entre pré-formas para a EMR e incertezas pelo escaneamento. ....	122
Figura 99 – Comparação entre os métodos via escaneamento e análise de seção transversal na avaliação geométrica. ....	123
Figura 100 - Comparação entre diferentes condições de deposição com e sem resfriamento sobre o parâmetro de ondulação (W).....	124
Figura 101 - Comparação entre diferentes condições de deposição com e sem resfriamento sobre a espessura de material a ser removido (EMR). ....	124
Figura 102 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob a ondulação (W) obtida via escaneamento. ....	125
Figura 103 – Superfície e perfil de resposta do parâmetro de ondulação (W) em função dos parâmetros $V_D$ e $V_A$ .....	126
Figura 104 - Superfície e perfil de resposta do parâmetro de ondulação (W) em função dos parâmetros $V_D$ e LEWD. ....	126
Figura 105 - Superfície e perfil de resposta do parâmetro de ondulação (W) em função dos parâmetros LEWD e $V_A$ .....	127
Figura 106 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob a espessura mínima de material a ser removido (EMR) obtida via escaneamento. ....	127
Figura 107 – Gráfico comparativo entre pré-formas para o volume de vazios e incertezas. ....	130
Figura 108 – Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o volume de vazios (%). ....	131

Figura 109 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do volume de vazios em função dos parâmetros LEWD e $V_A$ .....	132
Figura 110 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do volume de vazios em função dos parâmetros LEWD e $V_D$ .....	132
Figura 111 – Ciclos térmicos na deposição da pré-forma 16.....	133
Figura 112 – Ciclo térmico da deposição de duas camadas sequenciais.....	134
Figura 113 – Gráfico da menor temperatura à frente da poça de fusão antes da deposição de cada camada para as pré formas fabricadas com gerenciamento térmico RAQI: (a) pré-formas de 1 à 6 (b) pré-formas de 7 à 11 (c) pré-formas de 12 à 16.....	135
Figura 114 – Temperatura à frente da poça de fusão observada para a condição mais fria. ....	136
Figura 115 – Temperatura à frente da poça de fusão observada para a condição intermediária. ....	136
Figura 116 - Temperatura à frente da poça de fusão observada para a condição mais quente. ....	136
Figura 117 – Histograma para os valores de temperatura medidos em toda a deposição (acima) e gráfico Box & Whisker identificando os quartis (abaixo) para o caso da pré-forma 11. ....	137
Figura 118 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sobre o valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para cada pré-forma. ....	139
Figura 119 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para a variação de LEWD e $V_A$ ..	140
Figura 120 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para a variação de $V_A$ e $V_D$ .....	141
Figura 121 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para a variação de LEWD e $V_D$ ..	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de deposição para fabricação das pré-formas .....	55
Tabela 2 – Composição química arame AWS ER5356.....	57
Tabela 3 – Fatores e níveis utilizados no planejamento de experimentos.....	61
Tabela 4 – Sumário das corridas obtidas pelo planejamento de experimentos.....	61
Tabela 5 – Sumário das corridas para as pré-formas comparativas.....	62
Tabela 6 – Configurações da câmera utilizada na gravação dos vídeos de escaneamento.	63
Tabela 7 – Dados para cálculo da densidade do arame. ....	78
Tabela 8 – Especificações do pirômetro (LUMASENSE, 2019). ....	80
Tabela 9 – Valores de altura e diferença entre alturas das superfícies do gabarito.....	83
Tabela 10 – Parâmetros de escaneamento para avaliação da pintura.....	86
Tabela 11 – Tabela com os erros de medição para análise com e sem pintura do gabarito.	87
Tabela 12 - Parâmetros para avaliação da velocidade de escaneamento.....	88
Tabela 13 – Erros absolutos para cada diferença entre alturas de superfícies.....	88
Tabela 14 – Erros percentuais para cada diferença entre alturas de superfícies. ....	89
Tabela 15 - Parâmetros para avaliação da velocidade de escaneamento.....	90
Tabela 16 - Erros absolutos para a variação de ângulos do <i>laser</i> . ....	91
Tabela 17 - Erros percentuais para a variação de ângulos do <i>laser</i> . ....	91
Tabela 18 - Parâmetros para avaliação da potência do <i>laser</i> . ....	92
Tabela 19 - Erros absolutos médios para a variação de potência do <i>laser</i> . ....	93
Tabela 20 - Erros percentuais médios para a variação de potência do <i>laser</i> . ....	93
Tabela 21 – Tabela com os resultados médios de W, EMR e VMR e suas incertezas. ....	120
Tabela 22 - Tabela com os resultados médios de W, EMR e VMR e suas incertezas estimadas via escaneamento para as pré-formas comparativas. ....	121
Tabela 23 - Valores médios da medição de massa das amostras e respectivas incertezas. ....	128
Tabela 24 - Resultados do cálculo de densidade e volume de vazios das amostras.....	129
Tabela 25 – Valor do primeiro quartil referente ao histograma dos dados de temperatura na deposição das pré-formas.....	138

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	22
1.1	Contextualização .....	22
1.2	Objetivos .....	25
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	26
2.1	Manufatura aditiva – Um breve histórico .....	26
2.2	Manufatura aditiva de metais .....	29
2.3	Processos de deposição por energia direcionada ( <i>DED</i> ) .....	33
2.3.1	Manufatura Aditiva com Arco e Arame ( <i>WAAM – Wire and Arc Addictive Manufacturing</i> ) .....	36
2.3.2	<i>Cold Metal Transfer</i> ( <i>CMT</i> ) em <i>WAAM</i> .....	39
2.4	Gerenciamento térmico em <i>MA</i> de metais .....	41
2.5	Controle geométrico em <i>MA</i> de metais .....	48
2.6	Porosidade em <i>WAAM</i> de alumínio .....	51
3.	METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS .....	54
3.1	Fabricação das pré-formas .....	54
3.1.1	Parâmetros do processo em estudo .....	54
3.1.2	Planejamento estatístico de experimentos .....	60
3.2	Avaliação geométrica .....	62
3.2.1	Análise pela reconstrução da superfície via escaneamento .....	63
3.2.2	Análise geométrica pela seção transversal .....	71
3.2.2	Análise geométrica pela medição convencional de altura e largura .....	74
3.3	Avaliação de porosidade .....	75
3.3.1	Gravimetria .....	76
3.3.2	Parâmetro de análise (Volume de vazios) .....	78
3.4	Avaliação térmica .....	79
4.	VALIDAÇÃO DO SOFTWARE DE ESCANEAMENTO .....	82
4.1	Avaliação da pintura superficial .....	85
4.2	Avaliação da velocidade de escaneamento .....	87
4.3	Avaliação do ângulo de inclinação do <i>laser</i> .....	89
4.4	Avaliação da potência do <i>laser</i> .....	92
4.5	Conclusões parciais .....	93
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	95
4.1	Análise da geometria .....	95
4.1.1	Avaliação de altura e largura das pré-formas .....	95

4.1.2 Avaliação geométrica via seção transversal.....	107
4.1.3 Avaliação geométrica via escaneamento .....	120
4.2 Análise da porosidade.....	128
4.3 Análise térmica .....	132
6. CONCLUSÕES.....	143
7. TRABALHOS FUTUROS .....	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

A indústria é movida pela necessidade de produzir peças e componentes cada vez mais versáteis, complexos e eficientes. O desenvolvimento dos materiais vem como aliado neste processo, contribuindo para a descoberta e evolução das propriedades físicas, mecânicas, químicas e/ou térmicas necessárias à construção de cada elemento, o que muitas vezes pode levar à substituição dos metais por materiais compósitos, por exemplo. Entretanto, na indústria moderna, inclusive na aeronáutica, apesar de se observar um aumento considerável no uso de materiais compósitos, a parcela de componentes metálicos ainda é extremamente significativa.

Como forma de melhor explorar o potencial dos metais e suas ligas, um outro aspecto que requer atenção é a identificação de qual processo de fabricação é o mais indicado para que a produção de determinado componente seja cada vez mais eficiente no que diz respeito às variações geométricas da peças, custos e tempo de manufatura, acabamento final, dentre outros parâmetros. Dependendo do grau de capacidade de transformação, cada material pode ser submetido à processos específicos, como a extrusão, forjamento, laminação, fundição, usinagem, soldagem, entre outros.

Dentre os possíveis processos de fabricação, a Manufatura Aditiva (MA) tem como objetivo aproximar ao máximo a proporção entre quantidade de matéria prima comprada e vendida na forma de produto final, conhecida como razão “*buy-to-sell*”, para valores próximos de 1:1. Apesar de ser bastante comum o uso da impressão 3D para materiais poliméricos, somente nos últimos anos é que estudos têm sido desenvolvidos com mais afinco com o propósito de levar este método de fabricação a materiais metálicos. A Figura 1 apresenta uma bibliometria ao longo do tempo, até o ano de 2019, para a quantidade de artigos encontrados na base “*Scopus*” para os termos “*Additive Manufacturing*” e “*Metal Additive Manufacturing*”.

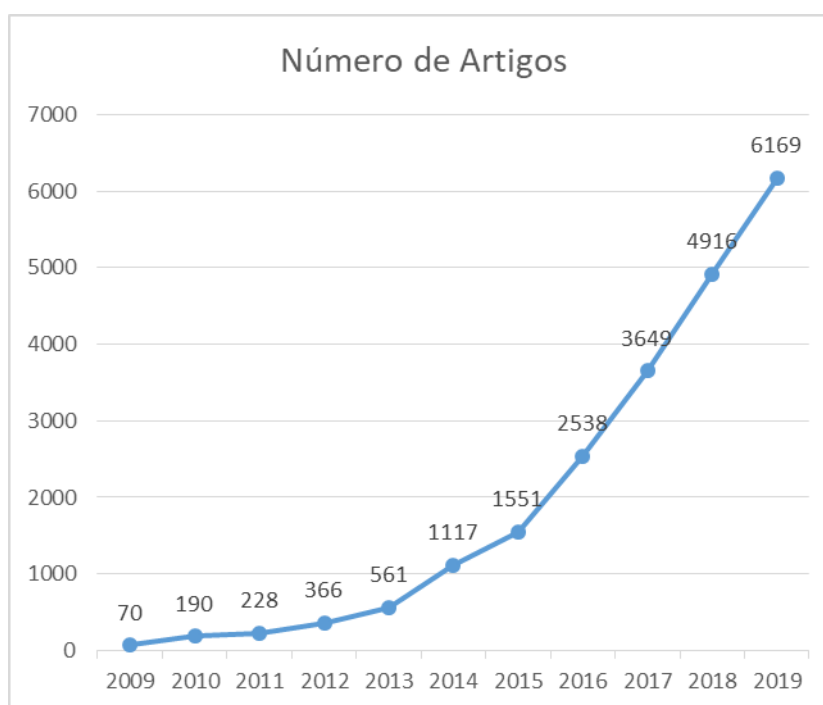


Figura 1 – Bibliometria para a quantidade de artigos relacionados a “*Additive Manufacturing*” e “*Metal Additive Manufacturing*” na base de dados “*Scopus*”.

Nos processos de MA de componentes metálicos, a deposição de material pode ser realizada pela sinterização/fusão de metais em forma de pó (tendo como fonte de energia um feixe de *laser* ou de elétrons) ou pela deposição de arame metálico fundido sobre um substrato, utilizando como fonte de energia o feixe de *laser* ou de elétrons ou até mesmo um arco elétrico (o mesmo utilizado em processos de soldagem). Os processos que utilizam arco elétrico são bastante utilizados já há algum tempo para fins de soldagem pelas suas vantagens, que englobam a alta taxa de deposição, custo relativamente baixo e considerável alta produtividade (da SILVA et al., 2018).

Dentre os processos de soldagem a arco tipicamente aplicáveis à MA, o TIG (*Tungsten Inert Gas*) e o MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) são os mais comuns. Em ambos, o calor proveniente do arco elétrico funde o material metálico (em formato de arame) que é continuamente alimentado (WAAM – Manufatura aditiva por fusão-deposição à arco, do inglês *Wire + Arc Additive Manufacturing*). Valores de tensão de arco e corrente da fonte, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem/deposição, diâmetro do arame e o aporte térmico influenciam bastante na qualidade da camada depositada (da SILVA, 2019).

Um dos maiores obstáculos dos processos de soldagem e, da mesma forma em MA por fusão-deposição a arco, é o altíssimo aporte térmico durante a deposição de material. O elevado aquecimento das camadas pode reduzir a produtividade, originar desvios

geométricos da forma superficial e volumétrica e alterar negativamente as propriedades mecânicas e físicas, inclusive intensificando os efeitos de tensões residuais (SOUZA, 2017).

Pelo lado do processo de deposição utilizado em si, uma medida para minimizar o aporte térmico e suas consequências negativas na deposição é o uso da técnica *Cold Metal Transfer* (CMT). Trata-se de uma variação do processo MIG/MAG onde o controle do movimento do arame-eletrodo permite domínio sobre o curto circuito, eliminando a necessidade de altos valores de corrente e reduzindo respingos e a quantidade de calor que é transferida para a peça. Por outro lado, o uso de métodos de gerenciamento térmico, que não pelo processo de deposição, se apresenta como outra alternativa para a redução do aporte térmico no processo de MA. O método de gerenciamento térmico denominado Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI, ou NIAC - *Near-Immersion Active Cooling* do inglês) se mostra bastante promissor (da SILVA, 2019). Neste processo, o componente é fabricado dentro de uma cuba e o nível de água dentro desse recipiente se eleva na medida em que as camadas são depositadas, aumentando e uniformizando a extração de calor, o que pode trazer benefícios para a geometria do produto da MA.

Para a verificação da geometria de peças, a aplicação da técnica de análise por imagens tem se desenvolvido nos últimos anos em virtude do baixo custo e pela flexibilidade de ser aplicada em peças das mais variadas características. Sendo assim, o desenvolvimento de novas técnicas de análise por imagens para avaliação de pré-formas fabricadas por WAAM se torna relevante, já que um dos pontos positivos da MA em geral é depender pouco de usinagem posterior para finalização do produto. E a geometria está intrinsecamente ligada à quantidade de material a ser removida por usinagem.

Deste modo, o presente trabalho avaliou a influência de parâmetros do processo de WAAM com CMT com aplicação da técnica RAQI na geometria de pré-formas com o uso de técnicas de análise de imagens. O nível de porosidade, descontinuidade inerente ao processo utilizado, obtido nas peças foi analisado por meio de técnica de gravimetria. A quantidade de calor imposto no processo também foi verificada como forma de entender melhor a relação das variáveis do processo de deposição com o acúmulo de calor e suas consequências na geometria das peças e qual a eficácia do RAQI.

Na sequência desta introdução e dos objetivos gerais e específicos, a dissertação foi dividida em apresentação da revisão bibliográfica indicando o estado da arte do tema em estudo, descrição da metodologia e dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, análise da dos erros em uma etapa de validação do *software* de escaneamento usado na avaliação geométrica, discussão dos resultados geométricos, térmicos e de porosidade obtidos, conclusões e sugestão para trabalhos futuros.



A principal contribuição obtida pelo trabalho foi em complementar o desenvolvimento do protótipo da técnica RAQI ao estimar os melhores valores para os parâmetros  $V_D$ ,  $V_A$  e LEWD para se obter peças com menos impactos negativos na geometria em função do acúmulo de calor, mesmo que reduzido por conta do gerenciamento térmico. Em soma, foi fundamental a confirmação do baixo risco de formação de poros pelo processo.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi avaliar a influência dos parâmetros velocidade de deposição ( $V_D$ ), velocidade de alimentação do arame ( $V_A$ ) e distância entre o topo da camada em deposição e a lâmina d'água do RAQI (LEWD - *Layer Edge to Water Distance* do inglês) na geometria, nível de porosidade e acúmulo de calor em pré-formas fabricadas por manufatura aditiva com arco elétrico (WAAM - CMT) e arame aplicando a técnica de gerenciamento térmico ativo RAQI.

Os objetivos específicos foram:

- Definir a faixa ideal de operação de cada parâmetro  $V_A$ ,  $V_D$  e LEWD para menor acúmulo de calor, menor porosidade e melhor qualidade superficial em MA de metais por deposição utilizando arco elétrico e arame;
- Desenvolver e validar um *software* de análise por imagem para a avaliação da geometria superficial de pré-formas fabricadas por MA;
- Definir a condição ideal de escaneamento via *laser* para utilização no *software* de análise por imagem;
- Comparar métodos de avaliação geométrica: reconstrução virtual da superfície, e análise de seção transversal;
- Definir um parâmetro de qualidade considerando a ondulação da superfície da pré-forma;
- Definir um parâmetro de aproveitamento de material considerando a quantidade de material aproveitável;
- Avaliar a influência do processo de deposição na formação de poros na peça;
- Avaliar os efeitos do acúmulo de calor sobre a geometria das pré-formas.

# CAPÍTULO II

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manufatura aditiva – Um breve histórico

A norma F2792-10 da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) define MA como um processo de união de materiais para fabricação de componentes a partir de dados de um modelo 3D, com deposição camada por camada, diferente das metodologias da manufatura convencional subtrativa (tipicamente usinagem) (ASTM, 2012). Esta abordagem pode ser aplicada para materiais poliméricos, compósitos, cerâmicos e metálicos. Apesar de ser conhecida por muitas décadas, somente nos últimos anos a MA tem emergido como um importante processo de fabricação, ainda carecendo de muitos estudos (FRAZIER, 2014).

Para exemplificar potenciais benefícios da utilização da MA, Frazier (2010) chegou à conclusão de que o uso de MA na fabricação de aeronaves da marinha americana reduziria o tempo e custo de produção do equipamento final, assim como o consumo de energia. Além disso, a MA apresentaria uma grande flexibilização na manufatura de componentes de geometria complexa e que não são bem atendidos pelos processos convencionais. A fabricante Stratasys Incorporation (2012) estimou que, a depender do processo de prototipagem adotado, pode-se obter uma redução entre 43 % e 75 % no tempo de manufatura.

Williams, et. al. (2016) discutem que, especialmente na indústria aeroespacial, existe uma forte necessidade de desenvolver um processo que poderia substituir o método atual de fabricação de grandes estruturas (painéis reforçados, nervuras de asa, etc.) que são usinadas a partir de tarugos ou então forjados resultando em taxas *buy-to-sell* (também chamadas de *buy-to-fly*) insustentáveis. Este índice indica a relação entre a massa total de material utilizado no processo e a massa de material da peça final (pós-processada). No setor aeroespacial, valores de 10 ou até 20 desta taxa são comuns. A Figura 2 apresenta um componente externo de montagem do trem de pouso de uma aeronave, fabricada por manufatura aditiva com deposição de arame de liga de titânio e utilizando plasma como fonte de energia.

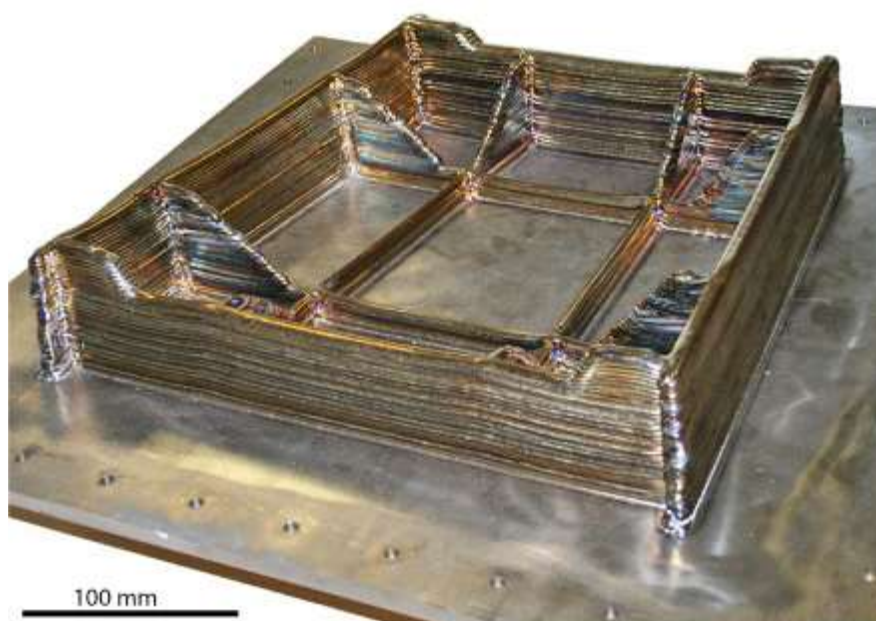


Figura 2 – Estrutura externa de trem de pouso fabricada por MA em titânio (WILLIAMS et al., 2016).

A fabricação de peças com cavidades e com estruturas em rede, que reduzem o peso do componente final sem comprometer as características de resistência mecânica também é uma potencial aplicação da MA. A redução na quantidade de resíduos (restos de material e/ou cavacos) também é um grande diferencial sob os pontos de vista de sustentabilidade, uma vez que reduz os dejetos do processo, e de economia, por obter melhor aproveitamento de materiais de alto custo (ligas de titânio, por exemplo). O processo possibilita também a produção de peças em materiais híbridos e formadas por ligas produzidas pela combinação de arames ou pós de diferentes composições, até mesmo *in-situ*, no local de fabricação (FRAZIER, 2010).

De forma geral, a MA abrange uma série de técnicas para a manufatura de componentes. Estas técnicas podem se dividir pela natureza da fonte de energia, pelo estado inicial em que se encontra o material de trabalho (KANNAN E RAJENDRAN, 2017), pela forma de distribuição do material e pelo princípio de manufatura aditiva utilizado (ASTM, 2013).

A norma ASTM F2792-12 (ASTM, 2013) define as sete principais famílias de processos em manufatura aditiva e aquelas que se destacam pelo uso de metais como material de trabalho são:

- Fusão em leito de pó (*Power Bed Fusion - PBF*): materiais em estado de pó são seletivamente consolidados pela fusão individual das partículas através de aplicação de calor por uma fonte que normalmente envolve feixe de elétrons ou *laser*. A maioria dos processos envolve um mecanismo de espalhamento e alisamento de finas camadas do pó de forma uniforme. A Figura 3 ilustra os equipamentos

utilizados para uma situação onde um feixe de *laser* é utilizado como fonte de energia. Materiais aplicáveis são pós metálicos, plásticos e cerâmicos. As principais vantagens são: melhor precisão em peças complexas comparada à outras técnicas e grande variedade de materiais aplicáveis;

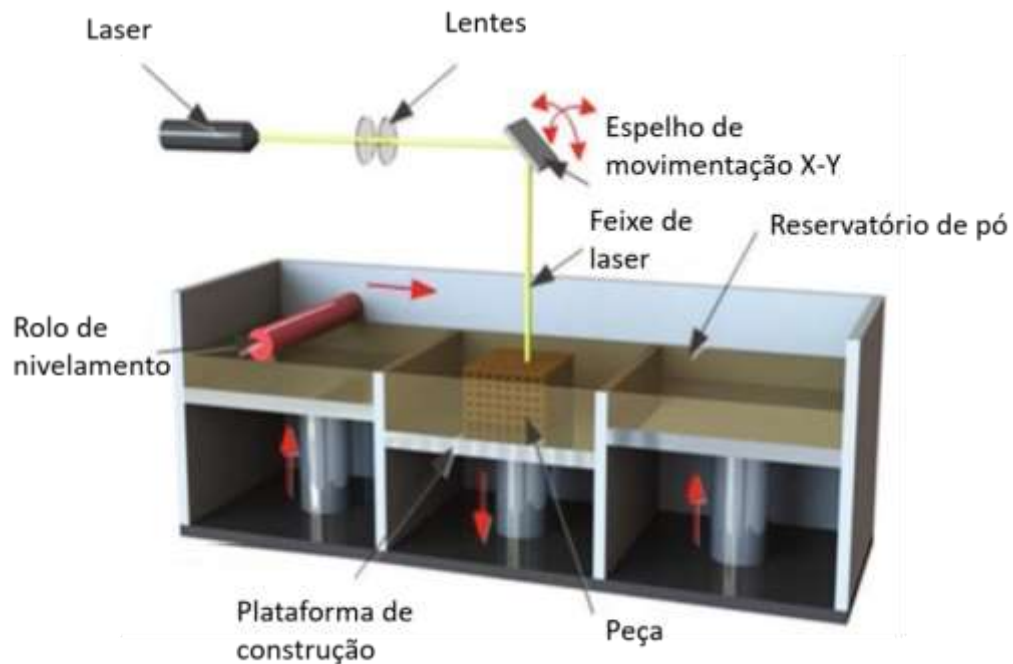


Figura 3 – Esquema do processo fusão em leito de pó utilizando feixe de *laser* (VYAS et al., 2017)

- Jateamento de ligante (*Binder Jetting*): um líquido ligante é aplicado em finas camadas de material em pó, espalhadas por um mecanismo semelhante ao da fusão em leito de pó, para construir peças camada sobre camada. Após a construção da peça em seu estado “verde”, o componente é aquecido para vaporizar o líquido ligante e posteriormente sinterizado para chegar ao seu estado final. Apresenta possibilidade de utilização com grande variedade de materiais (plásticos, metálicos, cerâmicos, vidros em forma de pó) e alta produtividade;
- Deposição por energia direcionada (*Directed Energy Deposition - DED*): o material em pó ou arame é alimentado em uma poça de fusão que é gerada na superfície da peça (ou substrato), aderindo a ela ou na camada previamente depositada. Tradicionalmente, as fontes de calor mais utilizadas neste processo são o feixe de elétrons ou *laser*, mas nos últimos anos a aplicação de energia por meio de arco elétrico tem se mostrado vantajosa e já com aplicação na fabricação de determinados componentes. A técnica se destaca pela alta taxa de deposição

comparada às outras, possibilidade de vários materiais em uma única peça (metais e cerâmicos) e efetividade para reparos. A Figura 4 ilustra esta técnica fazendo o uso de arame metálico como material e um feixe de elétrons como fonte de energia.

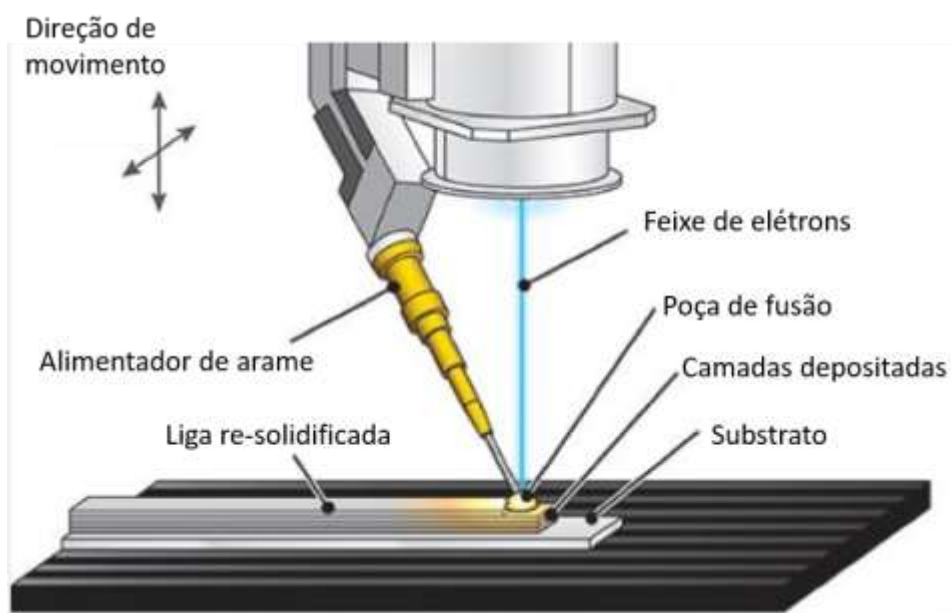


Figura 4 – Deposição por energia direcionada utilizando feixe de elétrons (3DSCIENCEVALLEY, 2019).

## 2.2 Manufatura aditiva de metais

A definição da norma F2792-10 (ASTM, 2012) para Manufatura Aditiva é amplamente aplicada para todas as classes de materiais, o que inclui cerâmicos, polímeros, compósitos, biológicos e metálicos. De acordo com Frazier (2014), os processos devem ser classificados e categorizados em termos da forma de distribuição do material, volume de construção e fonte de energia. Para este mesmo autor, as principais, porém não únicas, categorias dos sistemas de fabricação de metais por manufatura aditiva são: sistemas com leito de pó, sistemas com alimentação de pó e sistemas de alimentação de arame. Um esquema ilustrativo desta classificação é apresentado na Fig. 5. Os processos que envolvem técnicas mais recentes, como o *Binder Jetting* e *Joule Printing*® são importantes, porém menos explorados na indústria em comparação aos anteriormente citados.

Nos sistemas com leito de pó, o material metálico em pó é distribuído de maneira uniforme sobre uma superfície (leito) de trabalho. O processo de fusão por leito de pó (do inglês *PBF*) é aplicado, onde a energia proveniente de um feixe de elétrons ou laser funde o material provocando sua coalescência de acordo com o projeto. Novas camadas passam pelo mesmo processo até que uma estrutura tridimensional é formada. Após resfriamento e solidificação, é consolidada a

peça final. As principais vantagens incluem a capacidade de produzir componentes com maior resolução, passagens internas e com bom controle dimensional comparando-a com outros processos (FRAZIER, 2014).

Nos sistemas com alimentação de pó, o material em questão (pó metálico) é transportado por um bocal alimentador para a região de construção da peça, onde um *laser* (ou arco/plasma) faz a função de fonte de energia e cria uma poça de fusão na superfície onde o material é depositado. A construção camada a camada é contínua até que a forma do sólido tridimensional desejado seja atingida. Neste caso, a técnica do processo envolve a deposição por energia direcionada (DED). As vantagens desse tipo de sistema incluem a construção de maiores volumes e sua capacidade de ser usado para recuperar danos em componentes.

Por fim, os sistemas de alimentação por arame também envolvem a técnica de deposição por energia direcionada. O material (agora em formato de arame) é alimentado diretamente na poça de fusão, como no processo anterior, e a fonte de energia para este método pode ser o feixe de elétrons, o feixe de *laser* e o arco elétrico. Inicialmente, uma única camada de material é depositada e, após passes subsequentes, é construída uma estrutura tridimensional. Em geral, sistemas de alimentação de arame são adequados para altas taxas de deposição e produtividade e possuem também a capacidade para fabricação de grandes dimensões.

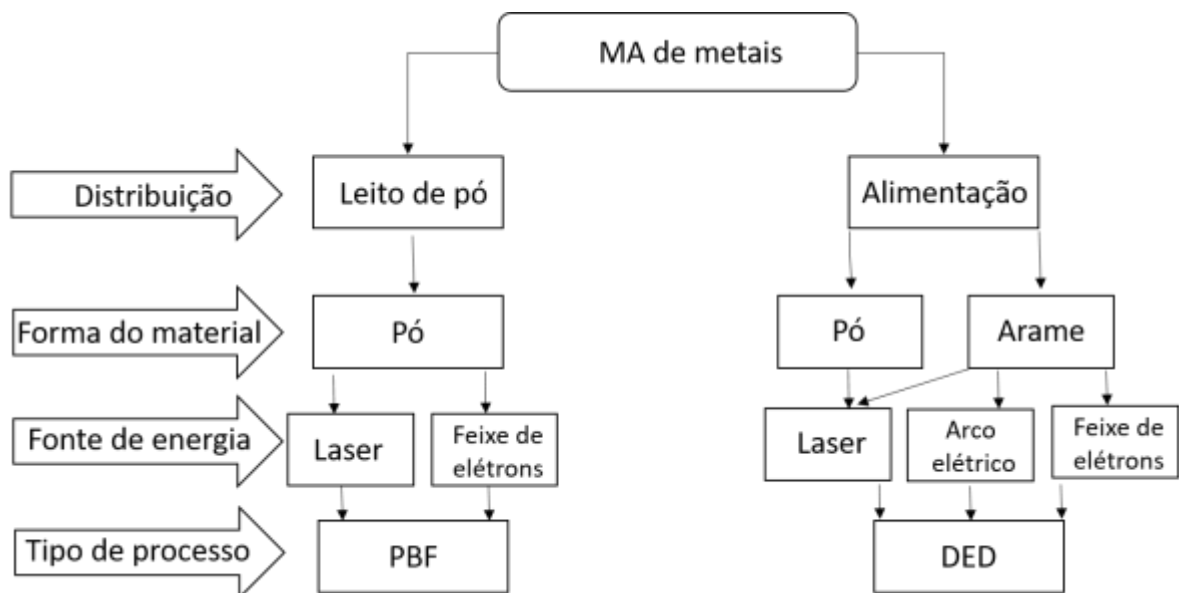


Figura 5 – Classificação dos processos de manufatura aditiva de metais (baseado em FRAZIER, 2014).

O processo de MA de metais envolve uma série de etapas complementares à impressão do metal no substrato. A implementação de uma técnica de deposição pode ser considerada bem-sucedida quando todo o fluxo de trabalho é considerado na avaliação, seleção, testes e

implementação de uma impressão 3D de metal. As etapas do processo variam e dependem muito do nível de tecnologia envolvido, requisitos do componente sob fabricação, setor de aplicação, entre outros. De forma geral, os principais estágios são ilustrados pelo fluxo de trabalho da Fig. 6 e descritos na sequência (DIGITAL ALLOYS, 2018).

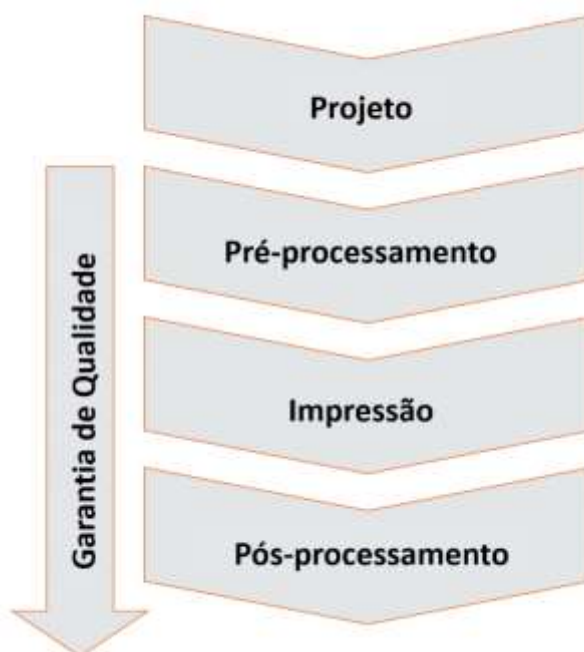


Figura 6 – Fluxo de trabalho para manufatura aditiva de metais (adaptado de DIGITAL ALLOYS, 2018).

O projeto, ou *design*, é a primeira etapa do fluxo de trabalho e está diretamente relacionado com a pré-existência ou não da peça escolhida para fabricação. Para uma peça já existente, a ideia é selecionar uma técnica entre as 7 famílias da MA que impacte em mínimas modificações de aspectos geométricos, mecânicos e físicos. Isto reduz tempo e custos com novo projeto e requalificação. Já para fabricação de um novo componente, é necessário associar a função do produto com a capacidade de fabricação de cada um dos possíveis processos de MA de metais. Cada tecnologia tem suas próprias limitações de projeto que afetam a geometria da peça e determinam as condições de impressão (DIGITAL ALLOYS, 2018).

Sendo assim, a escolha do processo de MA se torna fundamental. As tecnologias baseadas em fusão de pó em um substrato (*PBF*) que geralmente utilizam feixe de *laser* ou de elétrons como fonte de energia resultam em objetos finais com melhores precisões geométricas e baixa rugosidade superficial quando comparadas às outras técnicas de deposição, como o arco elétrico. Entretanto, em função dos limitados compartimentos de fabricação, apresentam uma considerável

restrição para a fabricação de peças grandes, acima de 10 cm (RASHID, 2017). Em soma, os custos para este tipo de processo são elevados. Já as tecnologias de deposição com DED, baseada em projeção de pó ou fusão de arame são mais vantajosas para manufatura de grandes componentes devido à maior taxa de deposição e menores custos de fabricação (DING, 2015), mesmo produzindo peças de complexidade final, acabamento superficial e resolução inferiores quando comparadas às técnicas *PBF*. Nestes casos, as fontes de energia mais aplicadas são o feixe de *laser*, elétrons ou arco elétrico (GENG, 2017). A Figura 7 relaciona os principais processos de MA de metais com algumas características fundamentais para a etapa de projeto (ou *design*) do fluxo de trabalho.

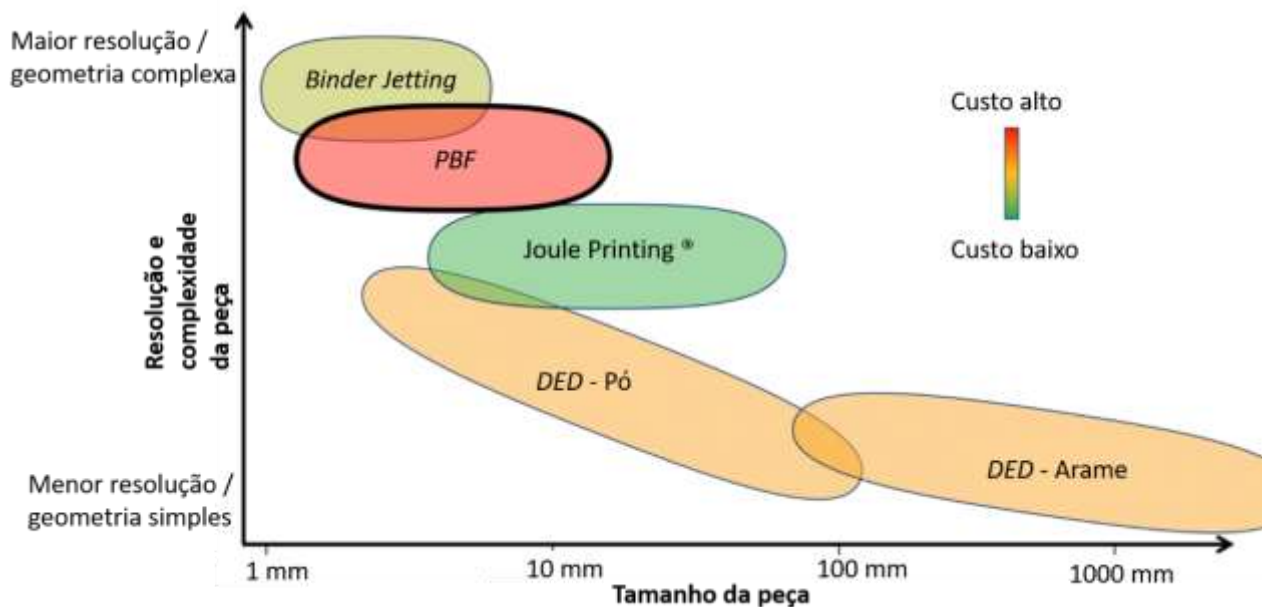


Figura 7 – Processos de MA de metais e suas características (adaptado de DIGITAL ALLOYS, 2018).

Durante o pré-processamento é necessário converter o arquivo da peça feito em *software* de CAD 3D (Desenho assistido por computador ou *Computer Aided Design* do inglês) para instruções utilizadas para a deposição de cada camada. Essas instruções são criadas por um "fatiador", que divide o arquivo em camadas de *voxels* (*pixels* 3D) e gera um caminho para o processo de impressão. Este caminho incorpora dados como a posição e parâmetros do processo (por exemplo, tensão, corrente, posições de parada) para cada *voxel*. A definição dos parâmetros pode se tornar uma etapa iterativa, já que a qualidade do metal e a precisão da impressão são altamente sensíveis. Na sequência, é necessária a configuração física, que inclui: posicionamento e alinhamento do substrato de construção, preparação da atmosfera para deposição e



carregamento do metal no equipamento. A complexidade dessas etapas dependerá de cada material em questão (DIGITAL ALLOYS, 2018).

A etapa de impressão pode levar de minutos a muitos dias, dependendo da tecnologia de impressão e das dimensões da construção. Alguns processos requerem pré-aquecimento e/ou tratamentos térmicos, tempo e custo investido que deve ser levado em consideração no ciclo de fabricação. Quando um processo de impressão é previsível o suficiente para não precisar de monitoramento, o operador pode gastar tempo de impressão em outras tarefas, melhorando a produtividade geral (DIGITAL ALLOYS, 2018).

O pós-processamento geralmente é mais caro e demorado do que o próprio processo de impressão. Barnes (2018) afirmou que o pós-processamento é tipicamente onde a batalha da MA é vencida ou perdida. As etapas devem ser projetadas de acordo com cada processo, equipamentos e aplicações para atender a todos os requisitos das peças (precisão, rugosidade da superfície, resistência, entre outros). Os principais estágios do pós-processamento envolvem a remoção do excesso de material, separação da peça do substrato, remoção de agentes ligantes (caso aplicável), sinterização, usinagem, acabamento superficial e tratamento térmico (DIGITAL ALLOYS, 2018).

O controle de qualidade na MA de metais não é uma etapa isolada, mas um conjunto de inspeções, medições, análises e documentação executadas em todo o fluxo de trabalho, como ilustrado na Fig. 6. Certos processos são bastante sensíveis ao uso de novos materiais ou variações nos parâmetros de processo de difícil controle. Por esta razão é fundamental uma estratégia robusta na qualidade, que aborde *software*, *hardware* e materiais (DIGITAL ALLOYS, 2018).

Neste sentido, a MA tem se apresentado como um processo de fabricação bastante próspero na manufatura de componentes metálicos (XIONG et al., 2018), com destaque para os processos com deposição por energia direcionada quando se buscam peças de dimensões médias e grandes, com custos e tempo de fabricação relativamente baixos e menores desperdícios de material quando comparado com técnicas subtrativas (DING et al., 2016).

### **2.3 Processos de deposição por energia direcionada (DED)**

De acordo com a ISO/ASTM 52900 (2015), os processos de MA com deposição por energia direcionada (DED) são aqueles em que uma fonte de energia térmica focalizada é usada para fundir materiais pelo seu derretimento (ou fusão) na medida em que são depositados. É uma alternativa de fabricação que apresenta considerável desenvolvimento nos recentes estudos e na indústria devido às suas características de rápida prototipagem, capacidade de produzir peças grandes e de baixa/média complexidade, além de ser um importante recurso para reparos.

Outra importante característica dos processos DED são os baixos custos de fabricação. Após a conclusão do projeto, ou *design* de fabricação de uma peça, podem se considerar três principais fatores que impactam no custo final da MA de metais: a impressão em si, o consumo de material e o pós-processamento envolvido. Os custos de impressão são uma função dos custos operacionais (equipamento, manutenção, garantia e operadores) e da produtividade do equipamento (considera principalmente a velocidade de deposição volumétrica, tempo de manutenção, reparos, posicionamento e retirada de peças). Os custos de material podem ser subdivididos em material impresso, material residual e consumíveis. O pós-processamento pode envolver várias etapas: separação de peças e remoção de suporte, tratamentos térmicos, acabamento de superfície (usinagem, por exemplo) e controle de qualidade. O número de etapas e seus custos são extremamente dependentes dos detalhes e requisitos do projeto. O pós-processamento pode facilmente se tornar o maior componente de custo para determinadas aplicações. A Figura 8 compara os diferentes processos em aspectos de custo e mostra que processos DED são largamente mais viáveis que os *PBF* em aspectos econômicos (DIGITAL ALLOYS, 2019).



Figura 8 – Custos de MA utilizando titânio, em dólares por cm<sup>3</sup> (DIGITAL ALLOYS, 2019).

De forma geral, os processos que se enquadram como DED fazem uso das técnicas de soldagem para depositar camadas sobre camadas, com altas taxas de deposição, porém com baixa resolução quando comparado aos outros processos. Além destas características citadas, também se destaca a possibilidade de construção de peças com volumes acima de 1000 mm<sup>3</sup>, articulação de diferentes fontes de energia, uso de fontes de calor com elevada eficiência, deposição do material diretamente na peça de fusão e em componentes já existentes (como em

caso de reparos). As principais fontes de energia são o arco elétrico (AE), plasma, feixe de elétrons (FE) e feixe de *laser* (FL) e o ambiente de deposição pode requerer um gás de proteção inerte para AE, plasma e FL enquanto o vácuo é necessário quando utilizado o FE. Os materiais se encontram geralmente na forma de pó metálico ou arame (ASTM, 2015).

Ainda de acordo com a ASTM F2792-12 (2015), os principais subcomponentes de um sistema que opera por DED são descritos a seguir e ilustrados pela Fig. 9.

- Fonte de calor: as mais utilizadas são o feixe de *laser* (CO<sub>2</sub>, Nd: YAG, fibra, disco ou diodo direto), feixe de elétrons e arco (predominância de TIG, MIG/MAG e plasma). FE e FL possuem uma maior densidade de energia, enquanto arco é mais barato. Junto está o cabeçote de deposição que é o componente que fornece a energia e pode estar acoplado ao mecanismo de alimentação;
- Dispositivo de movimentação: a movimentação pode ocorrer pelo movimento da fonte de calor, da mesa onde está o substrato que receberá a deposição ou por uma combinação de ambos dispositivos. É ideal que a movimentação ocorra em no mínimo três eixos ortogonais;
- Mecanismo de alimentação: envolve o alimentador de arame ou pó. É necessário para entregar o material diretamente na região de fusão de forma consistente e constante. Incluem os reservatórios, dutos, bocais, roletes, gás de arraste e controle computacional;
- Ambiente controlado: uma câmara, envelope, ou espaço de construção junto com um ambiente apropriado é necessário para controlar as condições onde será realizado o trabalho de deposição. Cada tipo de fonte de calor requer um ambiente específico (dotado de gás inerte ou vácuo) para minimizar possíveis contaminações gasosas no metal;
- Sistema de controle computacional: O *hardware* e o *software* do sistema de controle devem fornecer minimamente: apontamento de posição precisa dos pontos, controle rígido do caminho e velocidade percorridos entre os pontos. O sistema deve controlar tais parâmetros. Sensores podem ser utilizados para monitoramento de processos em tempo real, registro de dados para controle estatístico de processos e relatórios de arquivo e como *feedback* para um possível controle em malha fechada.

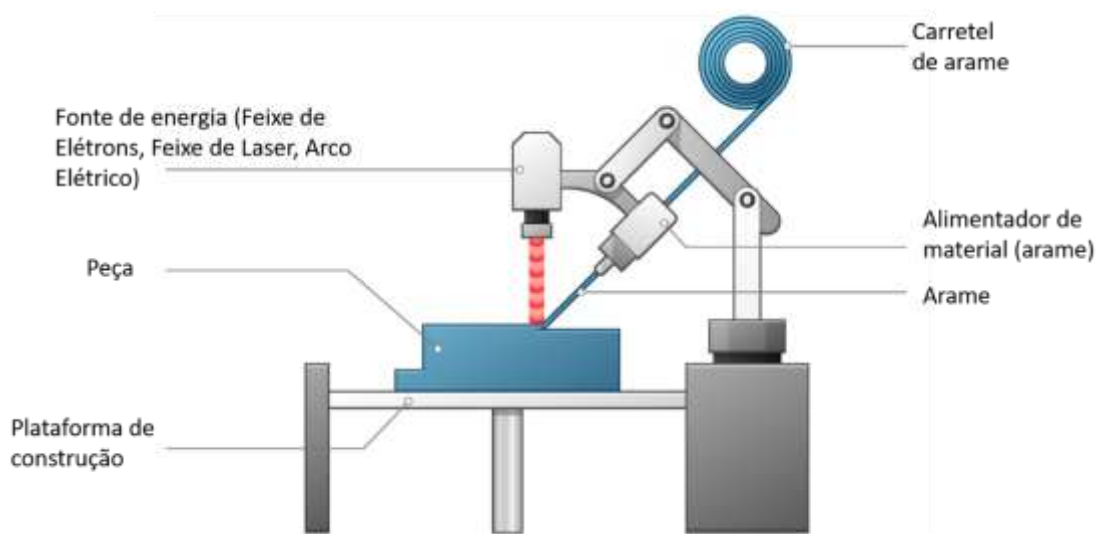


Figura 9 – Processo DED com utilização de arame metálico (adaptado de 3D EXPERIENCE MARKETPLACE, 2018).

Dentre os processos DED citados, a manufatura aditiva com arco elétrico e arame (WAAM – *Wire + Arc Addictive Manufacturing*) atualmente é desenvolvida como uma expectativa comercial de depositar e fabricar partes metálicas utilizando arame metálico como material e arco elétrico pelos processos MIG/MAG (GMA – *Gas Metal Arc*), Plasma (PA – *Plasma Arc*) e TIG (GTA – *Gas Tungsten Arc*) como fonte de energia, semelhante ao que acontece nos processos de soldagem (LU et al., 2017).

### 2.3.1 Manufatura Aditiva com Arco e Arame (WAAM – *Wire and Arc Addictive Manufacturing*)

A combinação de um arco elétrico como fonte de calor e um arame como matéria-prima é classificada de acordo com ASTM F2792-12a (ASTM, 2012) como WAAM (do inglês *Wire + Arc Addictive Manufacturing*) e é investigada para fins de MA desde os anos 90 (US Patente Nº 4 952 769 1990, 1990), embora a primeira patente relacionada tenha sido registrada em 1925 (US Patente Nº 1 533 300 1925, 1925). O *hardware* de WAAM geralmente faz uso dos equipamentos de soldagem padrões: fonte de energia para soldagem, tochas e sistemas de alimentação de arame. O movimento pode ser fornecido por sistemas robóticos, como ilustrado na Fig. 10, ou por pórticos controlados numericamente por computador.

Rodrigues et al. (2019), Cunningham et al. (2018) e Williams et al. (2016) destacaram detalhes dos processos WAAM diante diferentes condições e todos estes estudos corroboram em que as principais vantagens do processo são as maiores taxas de deposição, flexibilidade de

implementação dos equipamentos e seus reduzidos custos de operação em comparação com os processos com implementação de feixe de *laser* e elétrons.



Figura 10 – Sistema robótico de soldagem utilizado em WAAM (WILLIAMS et al., 2016).

A altura da camada em WAAM normalmente está na faixa de 1 a 2 mm, podendo resultar em uma ondulação superficial de aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  para depósitos de camadas individuais (MARTINA et al., 2012). Sendo assim, a geometria final das peças não apresenta características exatamente fiéis ao projeto, sendo necessárias etapas de usinagem para finalizar o componente. Disso resulta que o WAAM é mais adequado para geometrias de complexidade média e estruturas de média e grande escala (WILLIAMS et al., 2016).

Dos processos de soldagem a arco existentes, o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), também conhecido como MIG/MAG, é o processo mais utilizado na WAAM. É um processo de soldagem a arco baseado em fusão, em que o arco é estabelecido entre a ponta de um eletrodo consumível e a peça de trabalho sob a proteção de um gás de proteção inerte ou ativo que também protege a poça de fusão e o material adjacente. Os outros dois processos de soldagem a arco também utilizados em WAAM são o GTAW (*Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*) e o PAW (*Plasma Arc Welding*). Eles têm algumas semelhanças, pois ambos usam um eletrodo de tungstênio não consumível para estabelecer um arco elétrico com a peça de trabalho sob um gás de proteção inerte sem material metálico, que é adicionado de forma separada, conforme a Fig. 11.

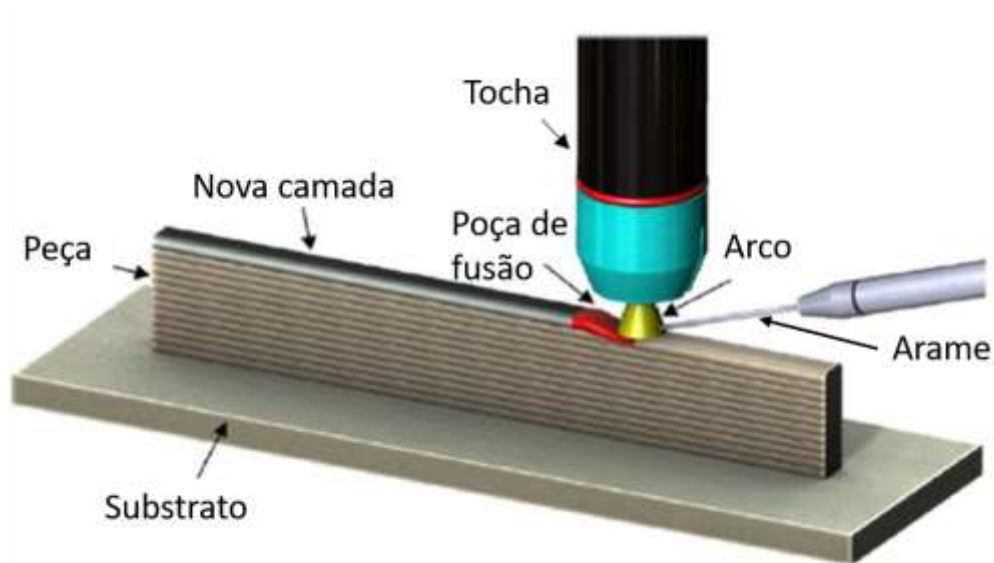


Figura 11 – Processo de WAAM utilizando técnica de soldagem GTAW (RODRIGUES et al, 2019).

É importante destacar que, de acordo com a norma ASTM F3187-16 (ASTM, 2016), os processos de WAAM são baseados nas técnicas de soldagem a arco com gás de proteção. Como soldagem é definida como o processo que visa a coalescência localizada de duas ou mais partes (AWS, 1925), o termo “*welding*” deve ser eliminado para os processos WAAM junto com o acrônimo “W” correspondente. Sendo assim, os termos restantes são suficientes para caracterizar a variante do processo na MA em cada caso: PA, GTA, GMA (da SILVA, 2019).

A soldagem a arco elétrico, em geral, pode ser complexa, pois vários parâmetros do processo devem ser controlados para obter uma boa qualidade das peças finais. Os parâmetros do processo incluem: intensidade da corrente, tensão, tipo e vazão de gás de proteção, distância do bico de contato à peça (DBCP), velocidade de alimentação do arame, velocidade de deposição e ângulo da tocha. Assim, para cada equipamento e material envolvido, esses parâmetros precisam ser otimizados. A correta seleção destes valores afeta o modo de transferência, que é muito importante para determinar a largura, a penetração e o tamanho da camada, a taxa de deposição e a rugosidade da superfície (RODRIGUES et al., 2019). Todas estas dificuldades se transferem para a WAAM.

Dentre os processos GMA, da Silva (2019), Rodrigues et al. (2019) e Williams et al. (2016) sugerem que a versão CMT (*Cold Metal Transfer*) desenvolvida pelo fabricante FRONIUS apresenta melhores resultados para WAAM. Sendo assim, esta técnica é apresentada na próxima seção.



### 2.3.2 Cold Metal Transfer (CMT) em WAAM

A técnica de transferência de metal à frio (do inglês *Cold Metal Transfer* - CMT®) é uma variante da técnica de soldagem MIG/MAG, assim como as técnicas *Surface Tension Transfer* - STT® e *Regulated Metal Deposition* - RMD®, onde a transferência da gota da ponta do arame eletrodo para a poça de fusão é mais estável e controlada, o que produz cordões ou camadas com melhor qualidade, menor aporte térmico e com menos respingos (FRONIUS, 2015).

É um processo avançado de transferência de material, no qual um sistema de controle incorporado detecta quando a ponta do arame-eletrodo entra em contato com a poça fundida (gerando um curto-circuito) e extingue o arco elétrico. Neste instante ocorre a ativação de um servo-motor, que retrai o arame em um processo eletromecânico de empurrar e puxar, controlando a transferência das gotas. Com o afastamento do arame, o curto-circuito deixa de existir e o arco é reaberto, reiniciando o processo. A Figura 12 apresenta a progressão do processo de deposição CMT com os respectivos sinais de velocidade de alimentação do arame, tensão e corrente. Dessa forma, como o comprimento do arco é mantido curto, a pressão do mesmo sobre a poça de fusão é pequena. Em soma, o calor é transferido para o material de forma regular e em baixa quantidade.

Essas duas características implicam que a poça de material fundido é muito controlável, como exigido para construção camada sobre camada, especialmente em paredes relativamente finas (da SILVA, 2019).

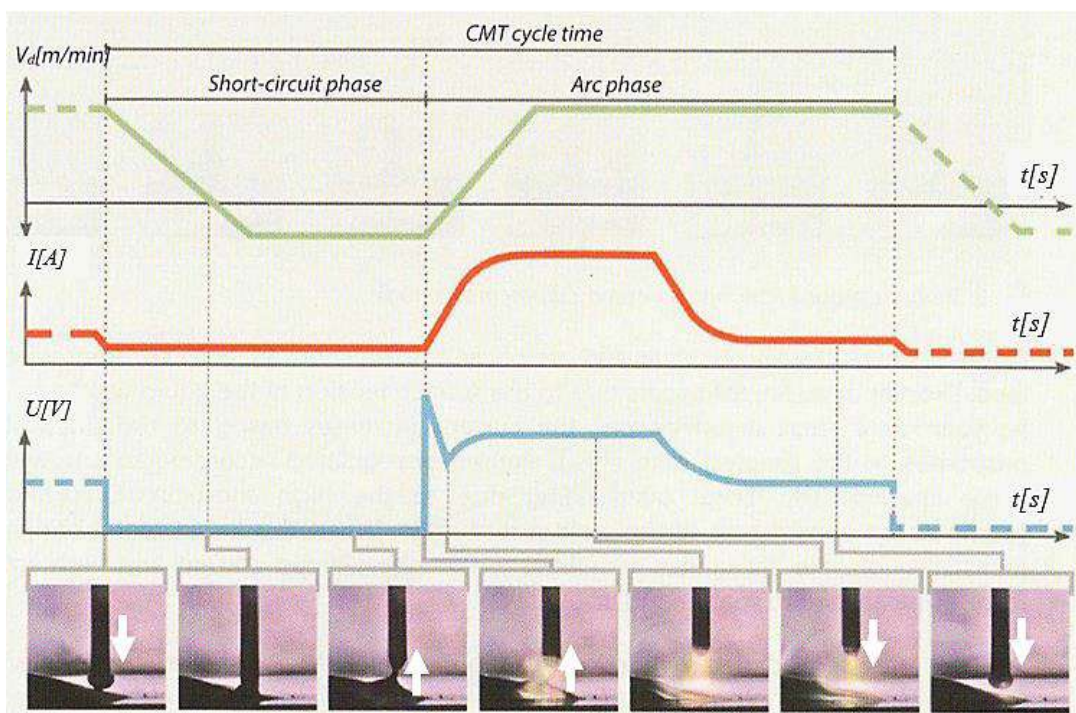


Figura 12 – Processo CMT e os sinais de velocidade de alimentação, corrente e tensão (FRONIUS, 2014).

A Figura 13 ilustra os equipamentos utilizados para o processo CMT de acordo com a fabricante. Souza (2017) faz uma breve descrição dos componentes e sua respectiva função:

1. Fonte de soldagem CMT: fonte de soldagem inversora digitalizada, com a corrente na faixa de 320/400/500 A;
2. Controle remoto: unidade de controle remoto com *display*, monitoramento de dados de soldagem com função, interface de usuário, estrutura de menu sistemático, gerenciamento de acesso;
3. Aparelho de refrigeração: propicia a refrigeração da tocha de soldagem/deposição com água;
4. Interface para robô: pode ser por comando digital, analógico ou através de barramento de campo;
5. Alimentador de arame: alimentador de arame regulável para todas as bobinas usuais;
6. Tocha CMT: tocha de soldagem robotizada, compacta, com servo motor CA com regulagem digital e isenta de engrenagem para alimentação de arame com pressão constante de roletes;
7. *Buffer* ou pulmão do arame: instalado entre os dois tracionadores de arame (alimentador e tocha), desacopla um tracionador do outro, criando assim uma folga para o arame não dobrar devido às diferenças momentâneas entre sentido de movimentos (avanços vindos do alimentador e da tocha e recuos oriundos da tocha);
8. Suporte para armazenamento do arame e cilindro de gás de proteção.



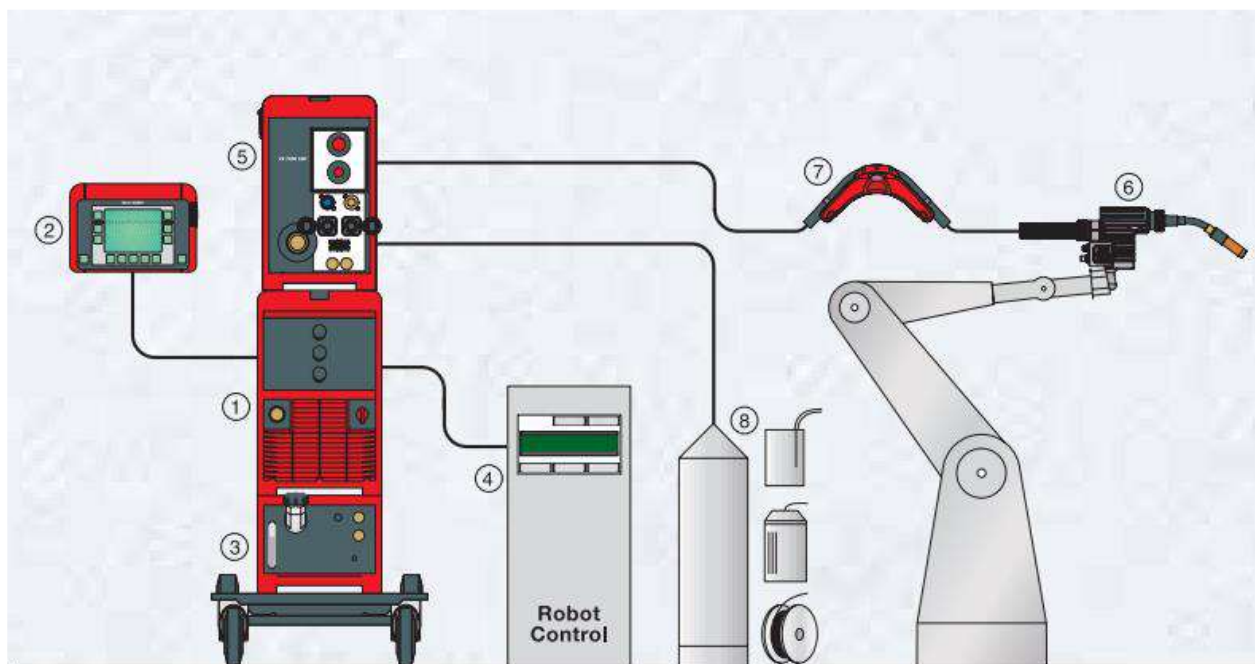


Figura 13 – Equipamentos para o processo CMT (FRONIUS, 2007).

No entanto, para o uso do processo CMT em WAAM existem algumas questões específicas que ainda carecem de maiores estudos, como a determinação do percurso ideal da tocha para obter peças densas e com tensões residuais minimizadas (ZHAO et al., 2012), controle da evolução microestrutural durante a deposição de múltiplas camadas (DINDA et al., 2009), efeito da temperatura entre as camadas (ZHAO et al., 2011) e o recorrente problema do indesejável acúmulo de calor (da SILVA, 2019). Da Silva et al. (2019) destacam algumas técnicas alternativas e complementares ao processo para mitigar alguns dos problemas mencionados acima, como aplicação de deformações mecânicas e gerenciamentos térmicos ativos de aquecimento e resfriamento.

## 2.4 Gerenciamento térmico em MA de metais

Presente na maioria dos processos de MA, porém mais acentuado naqueles que possuem altas taxas de deposição como o WAAM (JAMSHIDINIA E KOVACEVIC, 2015), o acúmulo de calor ocorre devido a um balanço energético positivo, onde há mais entrada de calor na peça do que saída (dissipação de calor insuficiente). Na prática, é caracterizada pelo aumento consecutivo da temperatura do componente em fabricação ao longo do tempo de deposição.

O considerável acúmulo de calor e as consequentes baixas taxas de resfriamento normalmente resultam em grãos colunares grosseiros e anisotropia, que são condições indesejáveis. Em soma, apesar de aumentar a molhabilidade do metal fundido, este acúmulo torna a deposição instável e pode até levar ao colapso da estrutura em construção, como ilustrado pela

Fig. 14 (GENG et al., 2017). Wu et al. (2017) observaram maior oxidação para paredes fabricadas por MA utilizando processo TIG quando estas possuíam maior altura, ou seja, com mais camadas depositadas e conseqüentemente com maior acúmulo de calor. O aumento da energia pela fonte de calor também afeta negativamente a largura da estrutura construída e aumenta o trabalho requerido por etapas seguintes de usinagem (HENCKELL et al., 2017).



Figura 14 – Parede em colapso após fabricação por WAAM com alto acúmulo de calor (da SILVA, 2019).

Em WAAM, a temperatura de interpasse é a temperatura da camada anterior exatamente antes de uma nova deposição, e é de grande importância nas propriedades finais da peça (MONTEVECCHI et al., 2018). Esta temperatura indica o status da dissipação de calor durante a deposição, estando diretamente relacionada com a taxa de resfriamento, que afeta a microestrutura e propriedades mecânicas do componente final. Zhao et al. (2011) reforçam que repetidos ciclos térmicos ao longo da deposição de múltiplas camadas geram uma complexa distribuição de gradientes de temperatura pela peça, impactando também nas distribuições de tensões, deformações, microestrutura e desempenho. Em soma, a carga térmica periódica produz valores de dureza não homogêneos com o aumento da altura das paredes depositadas (SURYAKUMAR et al., 2013).

Devido à dificuldade em reduzir o acúmulo de calor do processo, é quase improvável a redução da temperatura de interpasse sem uma técnica de gerenciamento térmico, o que a torna necessária. Uma das alternativas seria aguardar o resfriamento da camada depositada para se iniciar um novo ciclo de deposição, entretanto este tipo de controle (natural) se torna inviável na medida em que os tempos de parada se tornariam extremamente longos, afetando negativamente o tempo total de produção.

Wu et al. (2017) observaram o crescimento do calor acumulado e da temperatura de interpasse em pré-formas na medida em que novas camadas eram depositadas na estrutura, de

acordo com o gráfico da Fig. 15. Neste trabalho, o acúmulo de calor de cada camada foi calculado quantitativamente por meio da Eq. (1) da capacidade calorífica específica:

$$Q_j = C \cdot \sum_{j=1}^n m_j \cdot \Delta T = C \cdot \sum_{j=1}^n m_j \cdot (T_j - T_1) \quad (1)$$

$$m_j = \rho \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \vartheta \cdot t_j \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2),  $C$  é o calor específico do material,  $m_j$  é a massa da camada “j” depositada,  $T_j$  é a temperatura de interpasse,  $\rho$  é a densidade do material,  $r$  é o raio do arame do material,  $\vartheta$  é a velocidade de alimentação do arame,  $t_j$  é o tempo de alimentação de arame na camada “j” e  $\varepsilon$  é a eficiência energética do processo, sendo considerada entre 0,95 e 0,98 para o GTAW. A diferença das temperaturas de interpasse subsequentes determina o acúmulo de calor na peça, sendo que este aumenta quase que linearmente com o número de passes de deposição (WU et al., 2017).

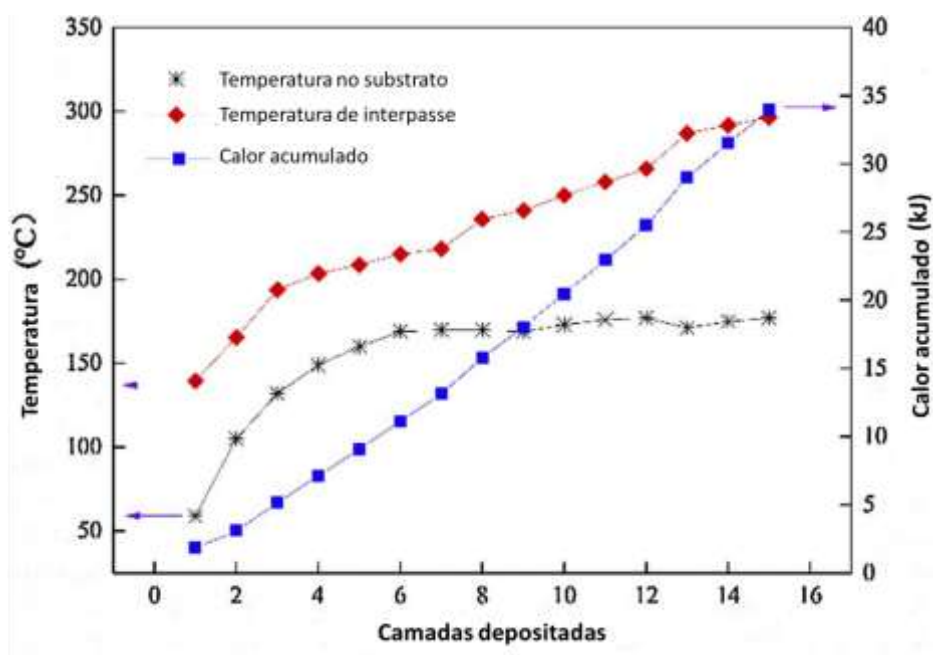


Figura 15 – Temperatura de interpasse e acúmulo de calor com aumento do número de camadas (WU et al., 2017).

Da Silva (2019) fez uma comparação entre paredes depositadas com uma técnica de gerenciamento térmico e com resfriamento natural até a temperatura de interpasse equivalente. O resultado é observado na Fig. 16 e, apesar de geometricamente semelhantes, a estrutura

fabricada sob gerenciamento térmico apresentou uma redução de 86 % no tempo total de produção em relação à técnica natural.

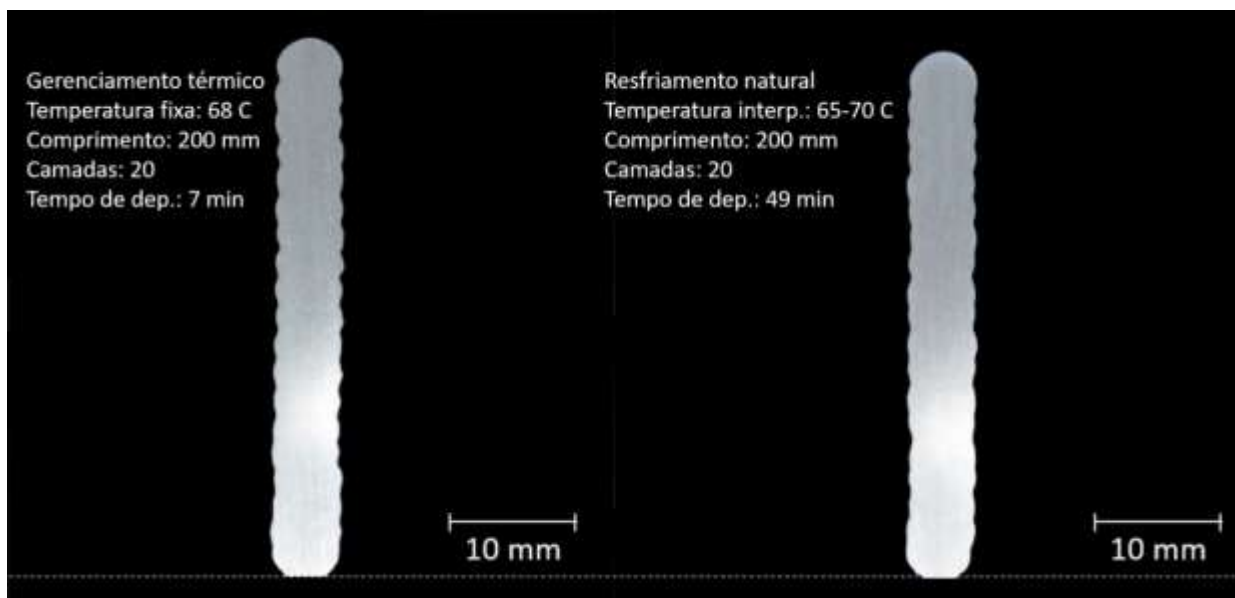


Figura 16 - Comparativo entre paredes depositadas por WAAM com gerenciamento térmico e com resfriamento natural até a temperatura de interpasse equivalente (da SILVA, 2019).

Da Silva (2019) propõe também uma classificação para as técnicas de gerenciamento térmico para paredes (também chamadas de pré-formas) fabricadas através de WAAM:

- Abordagem natural: considerada como o método convencional de gerenciamento térmico, as pré-formas são resfriadas pelo ar até um nível de temperatura desejado (temperatura de interpasse) antes da deposição da próxima camada. Além do tempo de parada (tempo de interpasse) necessário, a temperatura de interpasse também é uma consequência do calor já acumulado e da capacidade de dissipação de calor da pré-forma, que acaba sendo dependente do seu material e geometria;
- Abordagem intrínseca: o gerenciamento térmico é realizado por meios das formas inerentes que o processo de deposição oferece, como aporte térmico e taxa de deposição de material, ou seja, basicamente modificando ajustes de parâmetros ou mesmo alternando, modificando ou combinando diferentes processos;
- Abordagem passiva: o agente de refrigeração e/ou de aquecimento atua apenas sobre a plataforma de construção e/ou substrato antes, durante e/ou após o período de fabricação, isto é, a administração da temperatura da pré-forma é realizada de

maneira indireta através de um elemento intermediário (plataforma de construção e/ou substrato), que limita o alcance dos efeitos produzidos;

- Abordagem ativa: consiste na atuação por meio de contato direto total ou parcial entre a pré-forma e o agente de refrigeração e/ou aquecimento, sendo este um fluido na maioria dos casos, durante e/ou após o período de construção.

Da Silva (2019) verificou que a abordagem com resfriamento natural é a mais utilizada nos estudos recentes, provavelmente por conta de sua simplicidade de equipamentos e de manuseio. Entretanto, a técnica compromete a produtividade pelo grande tempo de parada entre cada camada, o que aumenta significativamente o tempo de produção.

O uso de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) comprimido para impor um resfriamento forçado foi estudado por Wu et al. (2018). Esse desenvolvimento ativo para WAAM do Ti-6Al-4V apresentou alguns benefícios, incluindo: melhor acabamento superficial com menor oxidação, microestrutura refinada, propriedades mecânicas aprimoradas e maior eficiência de fabricação. Entretanto, destaca-se que a convecção forçada de gás altera a estabilidade do arco, prejudicando o processo. Li et al. (2018) utilizaram também uma metodologia ativa com dissipadores de calor por condução nas superfícies laterais das pré-formas, permitindo condições uniformes de dissipação de calor durante toda a deposição. Além disso, essa técnica permitiu o controle da geometria da camada, diminuindo em 60 % a ondulação superficial e o tempo de fabricação, uma vez que é alcançada uma condição de dissipação de calor contínua sem o ajuste dos parâmetros ao longo do processo.

Em oposição ao resfriamento, um indutor foi utilizado por Li et al. (2018) para executar o pré-aquecimento e o pós-aquecimento nas laterais da pré-forma em construção. Em geral, essa técnica reduz as tensões residuais e a distorção das peças construídas. Além disso, este sistema tem o potencial de superar o problema de temperatura de interpasse, abrindo a possibilidade de manter a mesma constante durante toda a deposição, porém com restrições em relação a geometria da peça fabricada. Alberti et al. (2016) compararam deposições com gerenciamento passivo, com e sem pré-aquecimento do substrato a uma temperatura de 300 °C em um processo de deposição a plasma, e observaram que o pré-aquecimento aumentou a molhabilidade de cada camada e melhorou a regularidade da espessura da parede, diminuindo a ondulação da superfície. Lu et al. (2017) também utilizaram a técnica passiva de construir a pré-forma sob o substrato resfriado, entretanto estes dois métodos se mostraram eficiente apenas nas primeiras camadas ou em estruturas pequenas.

Apesar de existirem abordagens para mitigar o acúmulo de calor, cada uma com sua vantagem e limitação, o desafio é fazê-lo sem reduzir a produtividade e independentemente da geometria/altura da pré-forma. Sendo assim, da Silva et al. (2018) desenvolveram uma nova

abordagem de gerenciamento térmico denominada de Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI). Nessa abordagem, a pré-forma é depositada dentro de uma cuba, onde o nível de água é incrementado na medida em que as camadas são depositadas, como ilustrado pela Fig. 17.



Figura 17 – Representação esquemática do RAQI (da SILVA et al., 2018).

Durante a validação desta técnica, três condições de gerenciamento térmico foram avaliadas: resfriamento natural, resfriamento passivo (apenas do substrato), resfriamento ativo por RAQI. A Figura 18 apresenta esquematicamente como se comporta o fluxo de calor para estas diferentes situações. Verificou-se que a técnica RAQI foi capaz de aumentar substancialmente a taxa de resfriamento, reduzir a temperatura de interpasse e, portanto, mitigar o acúmulo de calor em pré-formas, melhorando a regularidade geométrica (como observado pelas Figs. 19a, 19b e 19c), reduzindo a quantidade de usinagem requerida, não induzindo a formação de porosidades nas ligas de alumínio e apresentando uma maior tendência de isotropia das propriedades mecânicas. O método proporcionou também um aumento da produtividade da fabricação por permitir a redução ou até mesmo a eliminação do tempo de parada de interpasse (da SILVA et al., 2018).

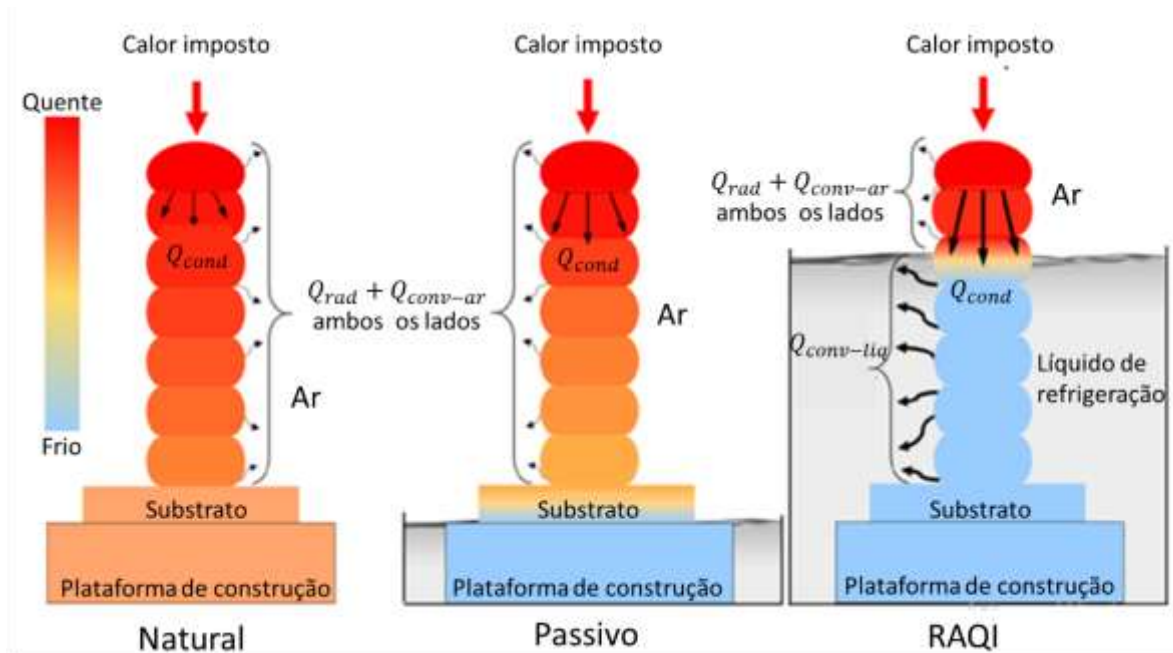


Figura 18 – Fluxo de calor para as três condições testadas por da Silva (2019) (adaptado).

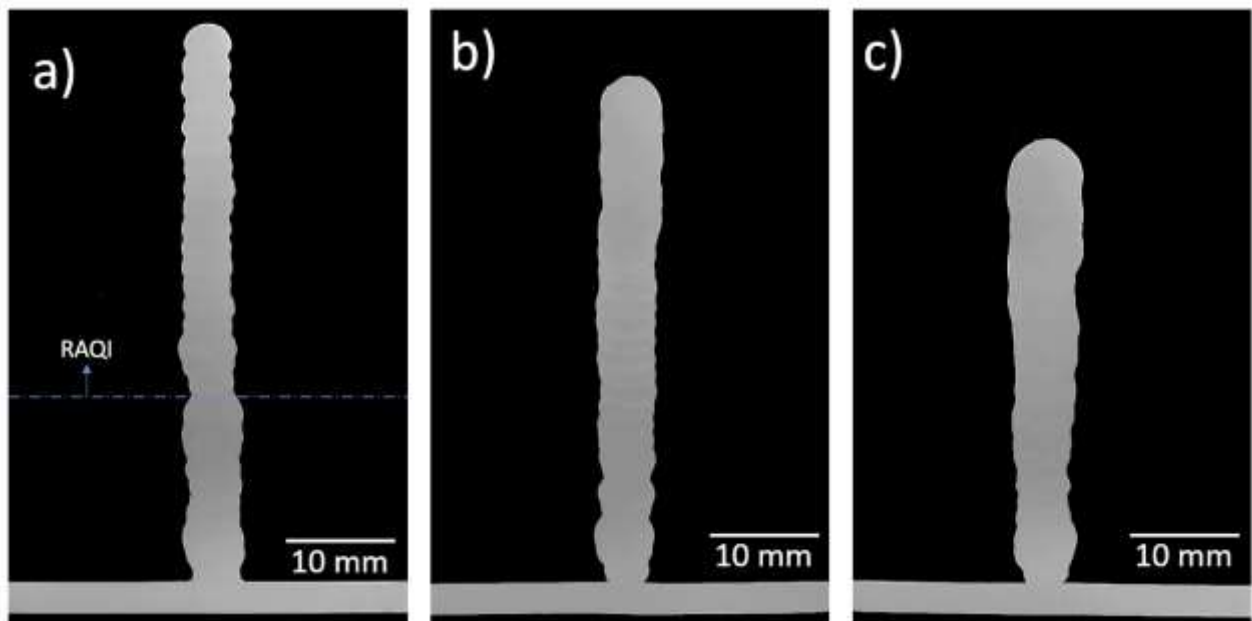


Figura 19 - Seções transversais centrais de pré-formas construídas com diferentes técnicas de gerenciamento térmico: (a) RAQI; (b) resfriamento passivo (c) resfriamento natural (da SILVA et al. 2018).

Segundo Coleman e Montgomery (1993), um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta. O processo pode ser

entendido como uma combinação de máquinas, métodos e/ou pessoas, que transforma um material de entrada em um produto.

Os planejamentos de experimentos podem ser usados tanto no desenvolvimento do processo quanto na solução de problemas do processo, seja para melhorar o seu desempenho ou obter um processo robusto ou não-sensível a fontes externas de variabilidade (MONTGOMERY, 1997). No caso deste trabalho, o planejamento foi utilizado para reduzir os custos e tempo de execução dos experimentos e maximizar o entendimento sobre os fenômenos em estudo, inclusive associando a influência das variáveis (isoladas e interagidas entre si) sobre parâmetros de resposta.

## 2.5 Controle geométrico em MA de metais

O controle do desvio de forma superficial de altas e baixas frequências é fundamental para a caracterização geométrica do componente após a fabricação. Thomsen et al. (2009), por exemplo, estudaram o efeito de rugosidade superficial em um contato osso-metal de um implante produzido por MA-EBM®. Verificaram que a maior rugosidade resulta em maior contato absoluto entre o osso e o implante, e que esta interação melhorou o comportamento biomecânico do implante. Entretanto, este comportamento pode ser indesejável em muitas aplicações. É relatado por Cansizoglu et al. (2008) e por Ramirez et al. (2011) que a alta rugosidade resultante do não derretimento de pós metálicos é a possível justificativa para a iniciação de trincas em estruturas de redes produzidas por MA-EBM®.

Os processos de WAAM utilizam deposição multicamadas e, sendo assim, o efeito “*stair-step*”, que são as ondulações nas faces laterais ilustradas na Fig. 20, se torna inevitável nas peças fabricadas, impactando na qualidade superficial (XIONG et al., 2018). Devido à maior altura das camadas dos processos WAAM, que varia aproximadamente entre 0,8 e 2 mm (MAHESH et al., 2004), a qualidade da superfície das peças depositadas em GMA-WAAM é pior do que a de peças fabricadas em PBF à *laser*. Em soma, o resultado final pós-deposição é inadequado para satisfazer os propósitos industriais gerais, o que afeta a quantidade de materiais removidos em etapa de pós-processamento (tipicamente usinagem) (MAHESH et al., 2004).



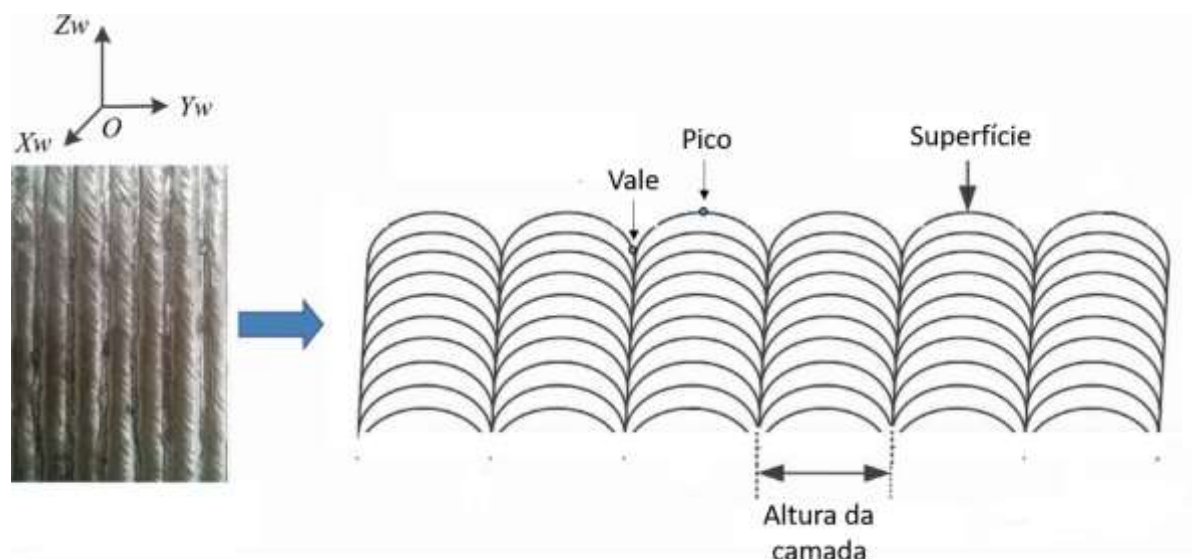


Figura 20 – Efeito “*stair-step*” de ondulação superficial em MA por WAAM (adaptado de XIONG et al., 2018).

O acúmulo de calor também apresenta impactos sobre a geometria superficial e da distribuição volumétrica das peças fabricadas por WAAM. Wu et al. (2018) verificaram um considerável aumento da largura das camadas ao longo do crescimento da pré-forma quando analisado um corte transversal, além de oxidação excessiva em função do grande aporte térmico na WAAM de Ti6Al4V com processo TIG. Xu et al. (2018) também verificaram oxidação excessiva, porém em WAAM com processo MIG/MAG, que levou a alterações negativas na molhabilidade e, conseqüentemente, na regularidade geométrica das camadas (ondulação lateral). Denlinger et al. (2018) observaram que os níveis de distorção em *LASER-DED* de Inconel 625® devido ao acúmulo de calor aumentaram significativamente. Xiong et al. (2015), dentre outros, reportaram colapso da poça e desvio geométrico das pré-formas decorrentes do acúmulo de calor em MA de aço com MIG/MAG.

Da Silva (2019) observou que pré-formas fabricadas com aplicação de gerenciamento térmico ativo RAQI apresentaram maiores alturas e uma ondulação superficial (devido ao efeito de “*stair-step*”) mais regular e mais baixa, conforme Figs. 19a, 19b, 19c e 21. Este fato levou a uma menor variabilidade da altura da parede ao longo de seu comprimento, mesmo perto das extremidades. Níveis baixos de oxidação também foram notados, uma vez que o material permaneceu em menores temperaturas durante todo o tempo de deposição.

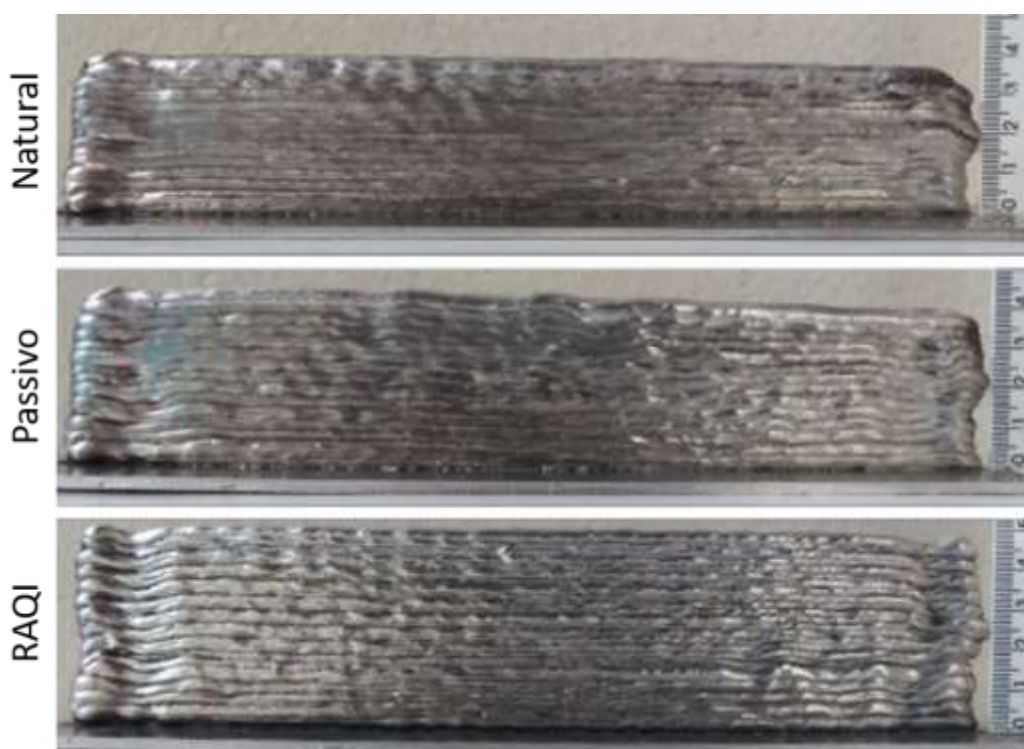


Figura 21 – Maior altura e menor ondulação para pré-formas fabricadas com RAQI (adaptado de da SILVA, 2019).

Dentre os possíveis métodos de verificação da geometria, o uso de técnicas de análise de imagem expandiu-se nos últimos anos devido ao baixo custo de desenvolvimento e à flexibilidade de ser aplicada em componentes das mais variadas características, evitando análises por métodos tradicionais destrutivos e promovendo uma maior representatividade do componente. Alfaro e Franco (2010) verificaram que o monitoramento de um sinal infravermelho na poça de fusão (ou corrente contínua) fornece informações a respeito da profundidade de penetração durante processo de soldagem MIG/MAG, enquanto a corrente alternada pode ser correlacionada com irregularidades da superfície e desalinhamento ou contaminação de peças. Já em outro trabalho, Pinto-Lopera, Motta e Alfaro (2012) propuseram e validaram uma abordagem para realizar medições em tempo real da altura e largura de cordões de solda nos processos GMAW usando um sistema de visão passiva e processamento de imagem digital. A técnica reduz o tempo de processamento, possibilitando aumento de produtividade em aplicação industrial e na alimentação de controles de *feedback*.

Ortega et al. (2018) utilizaram um scanner comercial *Breuckmann 3D* para analisar parâmetros de processo que afetam a geometria de camadas depositadas pelo WAAM CMT. Usando o *software* de análise *Geomatic*, calcularam o volume total do depósito, enquanto uma rotina *Python* extraía os valores de altura, largura e ângulo de contato das camadas. Xiong et al. (2018) desenvolveram seu próprio *software*, com base na digitalização a *laser* e no processamento

subsequente dos dados de superfície para avaliar parâmetros geométricos de pré-formas também fabricados por WAAM. Apesar de não avaliar a qualidade superficial das paredes, Wang, Wang e Yuebo (2019) também fizeram uso de um método online de medição da altura de camadas depositadas por WAAM baseado em deposição GTA.

O *software* desenvolvido por Xiong et al. (2018) utilizou o escaneamento por um *laser* para obter os dados da superfície de pré-formas fabricadas por WAAM-GMA. Para a caracterização da superfície, um parâmetro de rugosidade média superficial foi definido através da criação de um plano 3D considerando todos os pontos da superfície e observou-se que a qualidade superficial pode ser melhorada com a redução da temperatura de interpasse das camadas e com o aumento da velocidade de deposição, enquanto que a rugosidade aumenta com o crescimento da velocidade de alimentação.

De acordo com Townsend et al. (2016), os parâmetros de área são adotados em 20 % dos casos das literaturas em que se faz a avaliação de superfícies. Diferentemente dos parâmetros de perfil, eles requerem um conjunto de dados que descreva a superfície em um espaço cartesiano tridimensional. Estas informações são geralmente geradas utilizando instrumentos de medição de topografia de área superficial. Podem ser criados usando um sistema de varredura lateral de perfil que inclui uma unidade de eixo X, uma unidade de eixo Y e uma sonda de medição Z (ISO 5178-600, 2015). Os conjuntos de dados também podem ser gerados a partir de medições volumétricas, como as isosuperfícies XCT (TOWNSEND, BLUNT E BILLS, 2016).

## **2.6 Porosidade em WAAM de alumínio**

O uso de WAAM em ligas de alumínio merece bastante atenção pois os níveis de porosidade podem se tornar uma limitação para a aplicação dos componentes fabricados. Neste caso, como ocorre na soldagem, durante a deposição de material, é preferível fazer uso uma corrente alternada (CA) (WANG et al., 2004) para remover o filme de óxido (alumina) da superfície que possui um ponto de fusão mais alto. Caso contrário, os restos derretidos ficam presos dentro da poça de fusão podendo resultar em poros e defeitos internos, diminuindo drasticamente as propriedades mecânicas da estrutura (RODRIGUES et al., 2019).

Derekar et al. (2018), ao analisar peças de alumínio construídas com WAAM, relataram a presença de poros maiores ao longo da linha de fusão quando em temperaturas de interpasse mais baixas. Devido a um tempo de resfriamento mais longo ocorreu uma maior difusão de hidrogênio e aparecimento de poros grosseiros. Wang et al. (2013) também relataram problemas, porém em ligas de titânio Ti-6Al-4V, nas quais rachaduras por fadiga se iniciaram nos poros perto da superfície. Esta porosidade foi atribuída à absorção de nitrogênio, oxigênio e hidrogênio pela poça de fusão durante a deposição, nucleando na interface sólido-líquido durante a solidificação.

Em oposição, Jhavar et al. (2014) e Skiba et al. (2009) não observaram poros ou trincas quando utilizaram aço na WAAM.



Figura 22 – Porosidade longitudinal quase nula de paredes fabricadas por WAAM CMT-PADV. (a)  $V_A = 7,5$  m/min,  $V_D = 0,5$  m/min (b)  $V_A = 6$  m/min,  $V_D = 0,4$  m/min (adaptado de CONG, DING E WILLIAMS, 2014).

A técnica *Cold Metal Transfer* (CMT), dentre os possíveis métodos de deposição, é a mais aceita para processar ligas de alumínio. Em soma, entre os quatro modos CMT: *conventional CMT*, *CMT pulse* (CMT-P), *CMT advanced* (CMT-ADV) e *CMT pulse advanced* (CMT-PADV) testados por Cong, Ding e Williams (2014), o CMT-PADV foi observado como o processo mais adequado para a deposição WAAM de liga de alumínio. Com o controle adequado do aporte térmico, esse processo pode produzir paredes sem porosidade, conforme Fig. 22, por conta da formação de grãos finos e da limpeza eficaz do óxido (CONG, DING e WILLIAMS, 2014).

Ao se aplicar uma técnica de gerenciamento térmico ativo, que faz uso de água como líquido refrigerante, como o RAQI (ou NIAC), imagina-se que o nível de poros poderia se tornar um grande problema na medida em que o vapor de água poderia afetar os filmes de óxido de alumínio e/ou contaminar a poça de fusão e o arco elétrico. Entretanto, da Silva (2019) verificou que para três métodos de gerenciamento térmico distintos, natural, passivo e ativo (RAQI), a porosidade medida por meio de gravimetria (princípio de Arquimedes) em pré-formas de alumínio utilizando processo CMT-WAAM se mostrou baixa, conforme Fig. 23, e dentro de valores apresentados pela literatura. O autor relata que uma possível explicação para este fato está na pressão positiva gerada pelo

gás de proteção sobre a poça, não permitindo contaminação da mesma, apesar da presença de vapor d'água. Mas estes resultados parecem carecer de uma avaliação com um maior espectro de parâmetros de deposição.

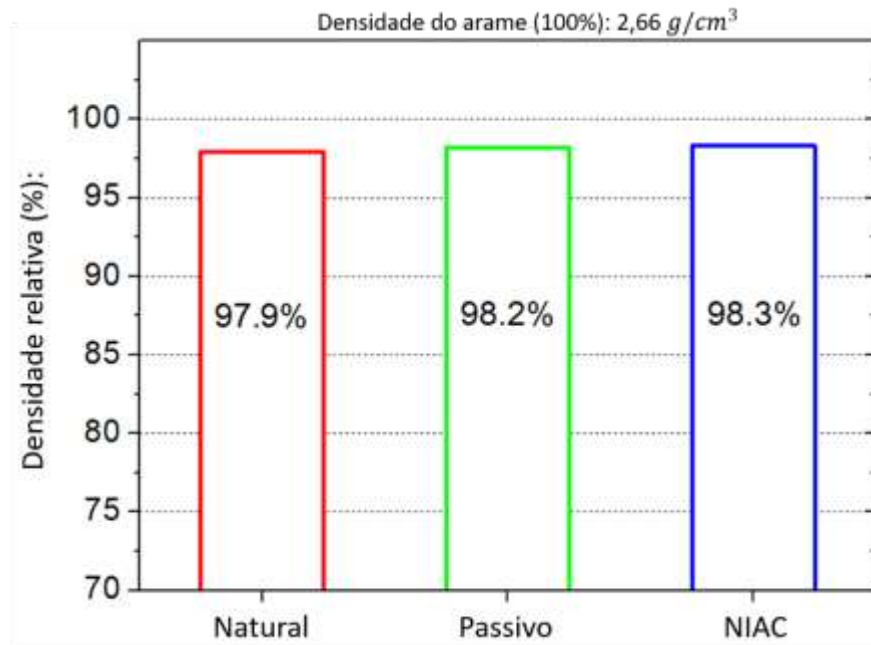


Figura 23 – Efeito de técnicas de gerenciamento térmico na densidade relativa de pré-formas (adaptado de da SILVA, 2019).

# CAPÍTULO III

## 3. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

Um fluxograma ilustrado pela Fig. 24 apresenta as principais etapas na execução das atividades deste trabalho.

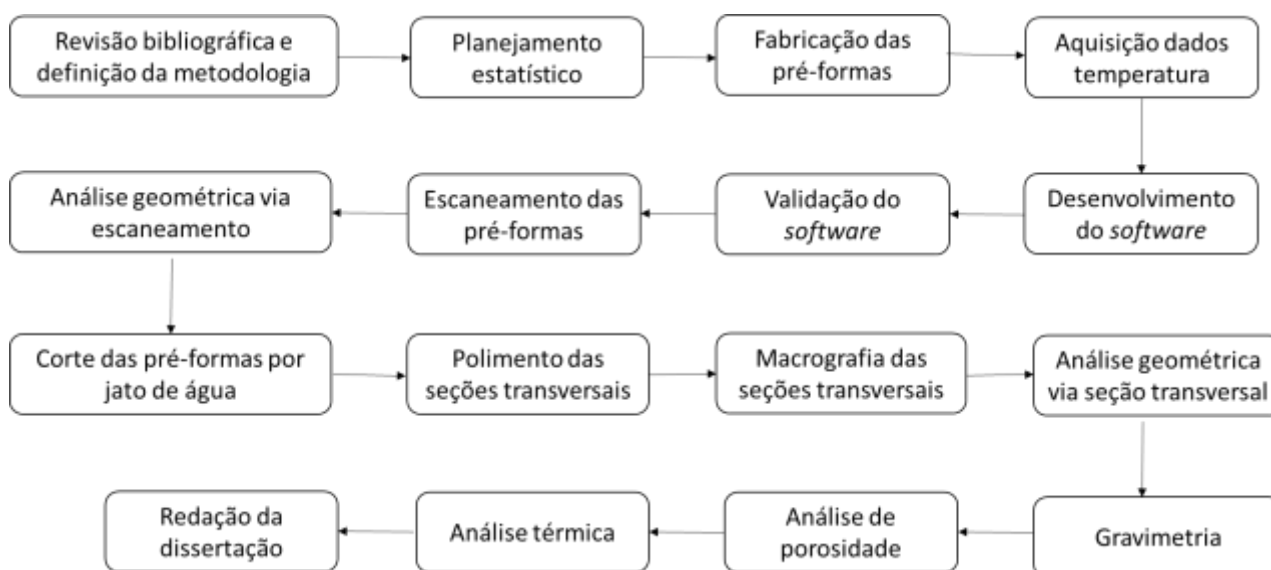


Figura 24 – Fluxograma das principais atividades executadas no trabalho.

### 3.1 Fabricação das pré-formas

#### 3.1.1 Parâmetros do processo em estudo

Foram construídas pré-formas em alumínio por meio do processo CMT convencional com uso da técnica RAQI para resfriamento das camadas na medida em que foram depositadas. O intuito foi avaliar o efeito da variação dos parâmetros velocidade de alimentação do arame ( $V_A$ ), velocidade de deposição ( $V_D$ ) e distância entre a aresta da camada em deposição e a lâmina d'água (LEWD, do inglês *Layer Edge to Water Distance*) sobre o acúmulo térmico, geometria superficial e nível de porosidade. Uma mesa de deposição de 2 eixos (X e Z) construída previamente no Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA-UFU) com a incorporação do RAQI (da SILVA, 2019) foi utilizada.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de deposição utilizados para a construção das pré-formas, sendo que foram todos mantidos constantes.

Tabela 1 – Parâmetros de deposição para fabricação das pré-formas

Processo de deposição	WAAM - MIG/MAG - CMT
Arame de deposição	AWS ER 5356 - Ø 1,0 mm
Substrato	Liga Al5052 (250 x 40 x 3 mm <sup>3</sup> )
DBCP*	12 mm
Gás de proteção	Argônio comercial – 12 a 15 L/min
Líquido de refrigeração do RAQI	Água em temperatura ambiente (25 °C)
Comprimento da pré-forma	250 mm
Altura da pré-forma	40 – 50 mm (quantidade de camadas variável)
Estratégia de deposição	Multicamadas bidirecionais de passe único
Tempo de parada	2 segundos em cada extremidade

A estratégia de deposição multicamadas bidirecionais foi utilizada para redução no tempo de fabricação (aumento de produtividade), buscando obter uma melhor distribuição de propriedades físicas, mecânicas e geométricas na pré-forma. Esta estratégia é ilustrada na Fig. 25.

Durante testes preparatórios, foi observado que a variação dos parâmetros  $V_A$ ,  $V_D$ , e LEWD influenciavam diretamente na altura da camada depositada. Desse modo, avaliou-se quantitativamente o valor incremental (altura) da camada através de deposições preliminares para cada condição de fabricação. Com o incremento definido para cada condição de parâmetros, foi possível determinar a quantidade de passes (camadas) necessários para obter uma estrutura com altura entre 40 e 50 mm.

O tempo de deposição de cada camada variou de acordo com o parâmetro  $V_D$ , uma vez que o comprimento permaneceu constante. A relação entre os dois parâmetros apresentou uma relação inversamente proporcional.

A Figura 26 ilustra esquematicamente o tanque pressurizado que alimenta o tanque de trabalho com água para a operação de deposição e, posteriormente, a gravidade faz o despejo do líquido. O controle foi realizado por um nível com flutuador magnético para garantir uma LEWD constante, ilustrado na Fig. 27. Foi verificado por da Silva (2019) que o tempo de resposta para aumento do nível de água é de 2,1 segundos.



Figura 25 – Deposição multicamadas bidirecionais (SOUZA, 2017).

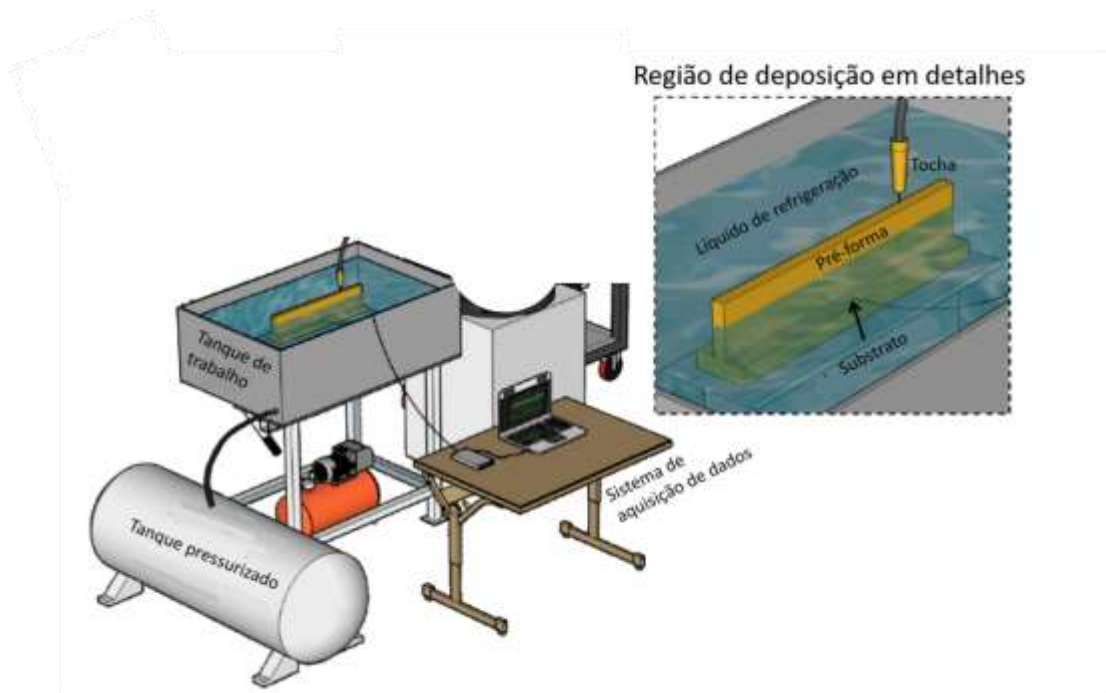


Figura 26 – Representação esquemática dos equipamentos de deposição (adaptado de da SILVA, 2019).

Um pirômetro foi posicionado junto ao sistema de movimentação da tocha de deposição para obtenção das informações de temperatura (detalhes são apresentados na seção de avaliação térmica deste capítulo). A DBCP (distância bico de contato-peça), gás de proteção e sua vazão e o líquido de refrigeração foram escolhidos seguindo o envelope desenvolvido por da Silva (2019). Uma liga de alumínio (composição apresentada na Tab. 2) foi utilizada como material de deposição (arame AWS ER5356) tendo em vista a sua aplicação em estruturas leves e para permitir comparação com os resultados anteriores de da Silva (2019). Em soma, buscou-se dar continuidade aos trabalhos já desenvolvidos pelo grupo LAPROSOLDA-UFU.



Tabela 2 – Composição química arame AWS ER5356.

Elemento	Composição química (%)
Alumínio	> 94,00
Silício	0,25
Manganês	0,05 a 5,50
Cobre	0,10
Zinco	0,10
Ferro	0,40
Magnésio	4,5 a 5,50
Cromo	0,05 a 2,00
Titânio	0,06 a 0,20

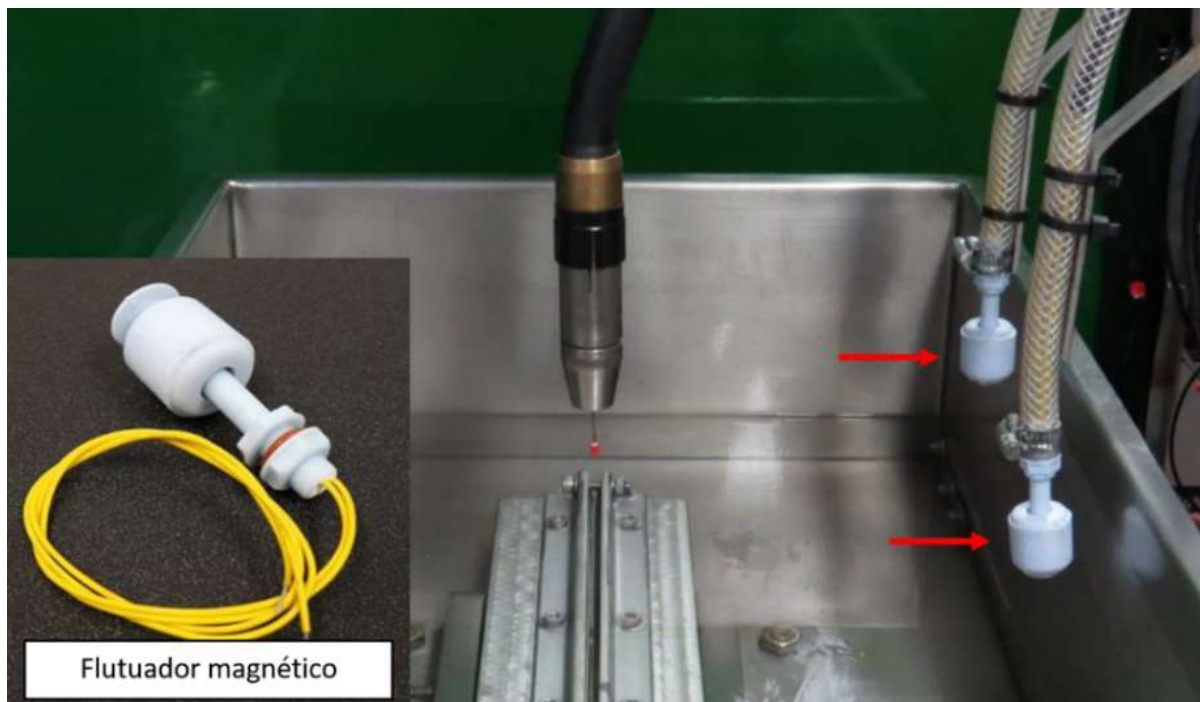


Figura 27 – Cuba de trabalho com destaque para o flutuador magnético (da SILVA, 2019).

A Figura 28 ilustra uma visão geral dos equipamentos utilizados na deposição, já posicionados e localizados no LAPROSOLDA-UFU. A estrutura funcional para deposição RAQI possui dimensões 70 x 130 x 200 cm<sup>3</sup> (largura x comprimento x altura) fabricadas com tubo em seção quadrada de aço de baixo carbono. Além disso, uma placa de aço de baixo carbono com 10 mm de espessura serve como suporte de equipamentos. O sistema de movimento é colocado

em um pórtico, enquanto o tanque de trabalho está mantido na placa de suporte. O sistema de movimento contém rolamentos deslizantes sob guias lineares (diâmetro 20 mm), fusos de esferas (diâmetro 16 mm com passo de 5 mm) e motores de passo (NEMA 23). O tanque de trabalho é uma cuba de aço inoxidável de 48 x 36 x 30 cm<sup>3</sup> sob estrutura de borracha para isolá-lo eletricamente da placa superior. O cabo terra está conectado nas duas extremidades do tanque de trabalho para minimizar efeitos do sopro magnético do arco.

O nível da água é controlado por um flutuador magnético, que aciona uma válvula solenoide para elevar o nível da água conforme as camadas de metal são depositadas (incremento no eixo z). A água sobe para encher o tanque de trabalho pela diferença de pressão do tanque pressurizado e retorna a ele por gravidade após o fim de toda a deposição (acionado manualmente) para que possa ser reutilizado. Em uma placa inferior, está o tanque de água pressurizada de 100 L, um sistema hidráulico e pneumático (válvula solenoide, válvulas esféricas, mangueiras etc.) e o controlador CNC (comutação para fonte de alimentação, acionamento para motores de passo, placa de interface CNC e computador). Cortinas de proteção são usadas para mitigar a radiação do arco elétrico no ambiente durante a deposição, o que não elimina a necessidade de equipamento de proteção pessoal. Além disso, um sistema de escape de ar é usado para reduzir os vapores gerados nos arredores (da SILVA, 2019).

Da Silva (2019) verificou problemas geométricos nas extremidades de pré-formas que utilizaram estratégia de deposição multicamadas bidirecionais de passe único sem paradas devido ao acúmulo de calor local. Dessa forma, um tempo de parada relativamente curto para fechamento e reabertura do arco elétrico, visando resfriamento local, foi adotado sem comprometimento em termos de produtividade.

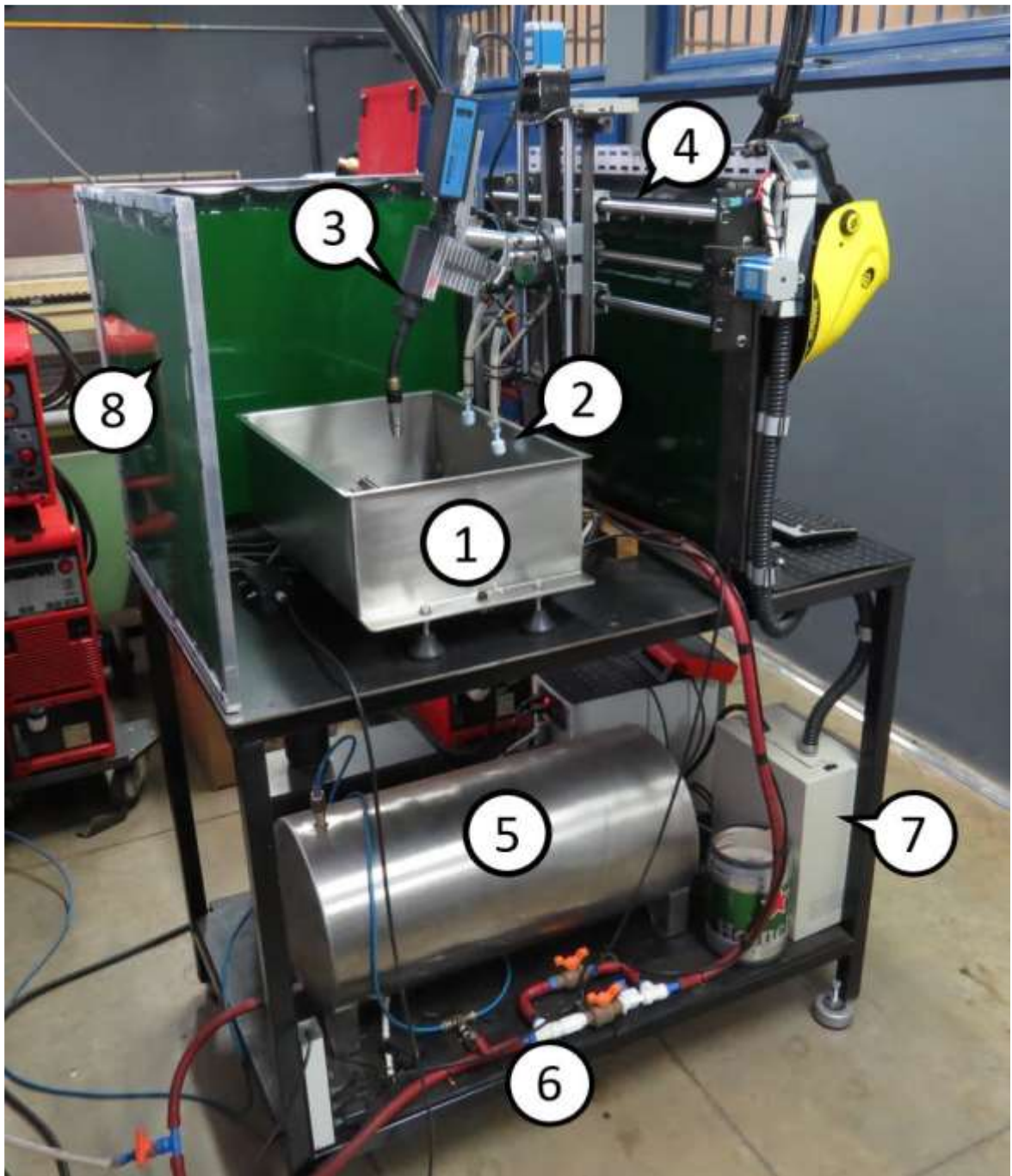


Figura 28 – Visão geral dos equipamentos de deposição com RAQI: (1) tanque de trabalho, (2) flutuador magnético, (3) tocha CMT, (4) sistema de movimentação, (5) tanque de água pressurizada, (6) sistema hidráulico e pneumático, (7) controlador CNC e (8) cortina de proteção (da SILVA, 2019).

### 3.1.2 Planejamento estatístico de experimentos

As etapas do procedimento geral de aplicação do planejamento de experimentos foram seguidas (MONTGOMERY, 1997) e são descritas na sequência:

- Reconhecimento e relato do problema: como mencionado no capítulo de revisão bibliográfica, o fenômeno do acúmulo de calor é altamente prejudicial nos processos WAAM. Desse modo, a aplicação de gerenciamento térmico se faz necessária e o estudo de sua influência e das variáveis de deposição é fundamental para a definição das condições ideais de operação;
- Objetivo do experimento: fabricar pré-formas sob diferentes condições e posteriormente avaliar a influência dos parâmetros de fabricação na geometria, acúmulo de calor e nível de porosidade;
- Variável de resposta: para a avaliação geométrica, foi analisado um parâmetro de ondulação superficial e de aproveitamento, em conjunto com medições de altura e largura das pré-formas. Para análise de porosidade, o volume de vazios foi determinado. E, para avaliação térmica, foi medida a temperatura em uma distância de 30 mm à frente do arco e antes do início da deposição da camada;
- Variável de controle (fatores): para a análise em questão, três parâmetros do processo foram estudados: velocidade de alimentação do arame ( $V_A$ ), velocidade de deposição ( $V_D$ ) e distância entre a aresta da camada em deposição e a lâmina d'água (LEWD);
- Níveis dos fatores: com base em da Silva (2019), foram escolhidos os níveis inferiores, intermediários e superiores expressos na Tab. 3, para os três fatores em estudo. Para esta etapa, exige-se uma combinação de experiência prática e conhecimento teórico (MONTGOMERY, 1997);
- Planejamento experimental: foi realizado um planejamento fatorial completo 3x3, com evolução para composto central com 2 repetições do ponto central. Foi utilizado um *software* comercial para a definição das corridas;
- Listagem das interações: foram definidas 16 corridas interativas necessárias para a análise, apresentadas pela Tab. 4, e outras 6 corridas para pré-formas comparativas sem aplicação do gerenciamento térmico ativo RAQI, conforme Tab. 5.

Tabela 3 – Fatores e níveis utilizados no planejamento de experimentos.

<b>Fatores</b>	<b>Inferior</b>	<b>Central</b>	<b>Superior</b>
<b>V<sub>A</sub> (mm/min)</b>	6000	7500	9000
<b>V<sub>D</sub> (mm/min)</b>	500	800	1100
<b>LEWD (mm)</b>	30	20	10

Tabela 4 – Sumário das corridas obtidas pelo planejamento de experimentos.

<b>Corrida</b>	<b>V<sub>A</sub> (mm/min)</b>	<b>V<sub>D</sub> (mm/min)</b>	<b>LEWD (mm)</b>
<b>16 (ponto central)</b>	7500	800	20
<b>7</b>	9000	1100	30
<b>3</b>	6000	1100	30
<b>2</b>	6000	500	10
<b>13</b>	7500	800	32,9
<b>14</b>	7500	800	7,1
<b>6</b>	9000	500	10
<b>9</b>	5569,2	800	20
<b>12</b>	7500	1186,2	20
<b>10</b>	9430,8	800	20
<b>5</b>	9000	500	30
<b>1</b>	6000	500	30
<b>8</b>	9000	1100	10
<b>11</b>	7500	413,8	20
<b>4</b>	6000	1100	10
<b>15 (ponto central)</b>	7500	800	20

O tempo de resfriamento executado em metade das pré-formas comparativas é tempo de espera para depositar uma nova camada até que seja atingida a temperatura de interpasse, definida por meio da medição com pirômetro da condição equivalente quando aplicado o gerenciamento RAQI.

Tabela 5 – Sumário das corridas para as pré-formas comparativas.

Corrida	V <sub>A</sub> (mm/min)	V <sub>D</sub> (mm/min)	Gerenciamento térmico
17 (equivalente ponto central)	7500	800	Temperatura de interpasse da condição NIAC equivalente
18 (equivalente 15)	9000	500	Temperatura de interpasse da condição NIAC equivalente
19 (equivalente 4)	6000	1100	Temperatura de interpasse da condição NIAC equivalente
20 (equivalente ponto central)	7500	800	Sem tempo de resfriamento
21 (equivalente 15)	9000	500	Sem tempo de resfriamento
22 (equivalente 4)	6000	1100	Sem tempo de resfriamento

### 3.2 Avaliação geométrica

Para a avaliação geométrica da superfície das pré-formas, foram utilizados métodos de análise por imagem da seção transversal e por reconstrução da superfície via escaneamento. Nas duas metodologias foram utilizados *softwares* desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do LAPROSOLDA e não se encontram disponibilizados nesta dissertação por serem alvo de registro de *software*.

Para ambas análises, foi utilizado um parâmetro de qualidade que avaliou o nível de ondulação superficial das estruturas. Em soma um fator de aproveitamento foi calculado para estimar qual condição de deposição apresenta melhor proporção “*buy-to-sell*”, que é aquela onde o volume da peça produzida mais se aproxima do volume da peça na condição prevista como finalizada (mínimo de remoção após a usinagem).

### 3.2.1 Análise pela reconstrução da superfície via escaneamento

O desenvolvimento de técnicas de análise por imagens para avaliação geométrica se torna relevante pelo reduzido custo (em comparação com outros métodos de escaneamento), possibilidade de análise superficial macro geométrica e eliminação de métodos de avaliação por contato que podem danificar a estrutura (FELICE et al., 2019).

Para a reconstrução virtual da superfície, foi desenvolvido o algoritmo de um *software* próprio. O fluxograma da Fig. 29 indica as etapas gerais para a reconstrução das superfícies.

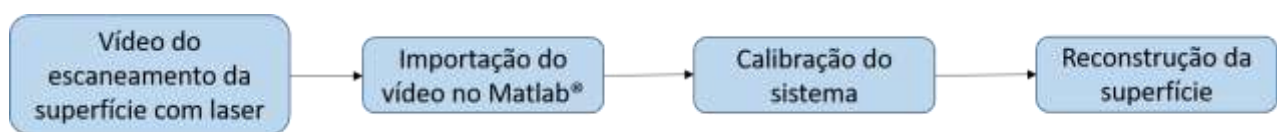


Figura 29 – Fluxograma das etapas para reconstrução virtual da superfície.

Para o escaneamento, foram utilizados os equipamentos representados esquematicamente na Fig. 30. Uma câmera modelo Canon PowerShot SX50 HS (configurações na Tab. 6) foi utilizada para gravação dos vídeos do escaneamento, um módulo de *laser* de foco ajustável e apontado fixamente para as pré-formas teve seu ângulo de inclinação em relação à câmera foi medido com o uso de um transferidor Protractor modelo AK-2587 e resolução de 1° em uma sequência de três medições. As pré-formas foram posicionadas uma a uma em uma mesa CNC auxiliar, e alinhadas utilizando um relógio comparador marca Mitutoyo e modelo 2046S (resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 0 a 10 mm), que realizou o movimento na sua direção longitudinal. O deslocamento do feixe de *laser* sobre a superfície da pré-forma foi filmado em formato .MOV.

Para o escaneamento, a superfície de alumínio da pré-forma foi pintada com tinta *spray* cor preto fosco, conforme Fig. 31 que ilustra a peça antes e após pintura, para reduzir os erros causados pelo alto brilho do *laser* na peça. Detalhes do motivo pelo qual a pintura foi adotada são explicados no capítulo de Validação do *Software*. A Figura 32 ilustra os equipamentos durante o escaneamento. O *laser* foi alimentado por uma fonte eletrônica Instrutherm modelo FA-3005, com ajuste de tensão (resolução 0,01 V) e corrente (resolução 0,01 A) para obter um brilho considerado bem definido.

Tabela 6 – Configurações da câmera utilizada na gravação dos vídeos de escaneamento.

<i>Shutter</i>	-3
ISO	800
Resolução	1920 x 1080 <i>pixels</i>
Taxa de aquisição	30 <i>frames</i> por segundo

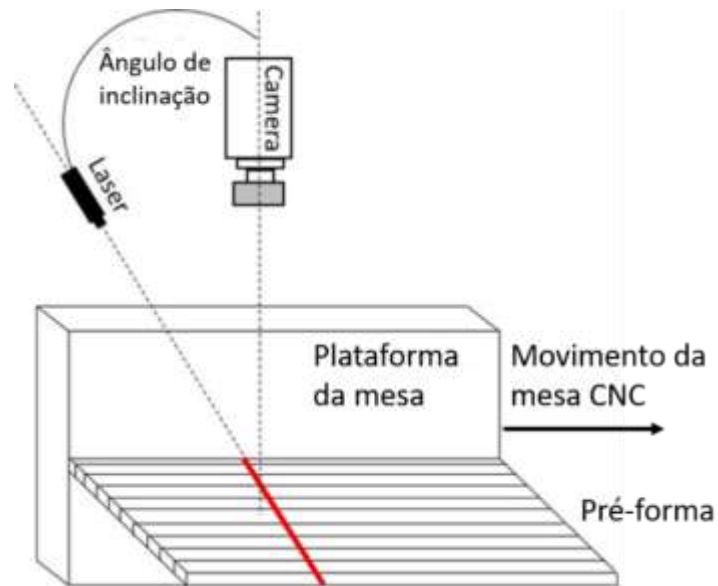


Figura 30 – Esquema ilustrativo do escaneamento das pré-formas.



Figura 31 – Pré-forma antes (acima) e após (abaixo) pintura com tinta *spray* preto fosco.

Após a importação do vídeo, foi realizada um ajuste do sistema de medição em duas direções: horizontal e vertical para regular as medições, como ilustrado pelas Figs. 33a e 34b. Um gabarito de dimensões e geometria conhecida (também utilizado no capítulo Validação do *Software*) foi posicionado no início da filmagem para servir como referência. Na sequência, a região de análise foi determinada por meio da seleção de uma área em uma posição intermediária, como apresentado na Fig. 34, representando a região onde a reconstrução da superfície foi executada.



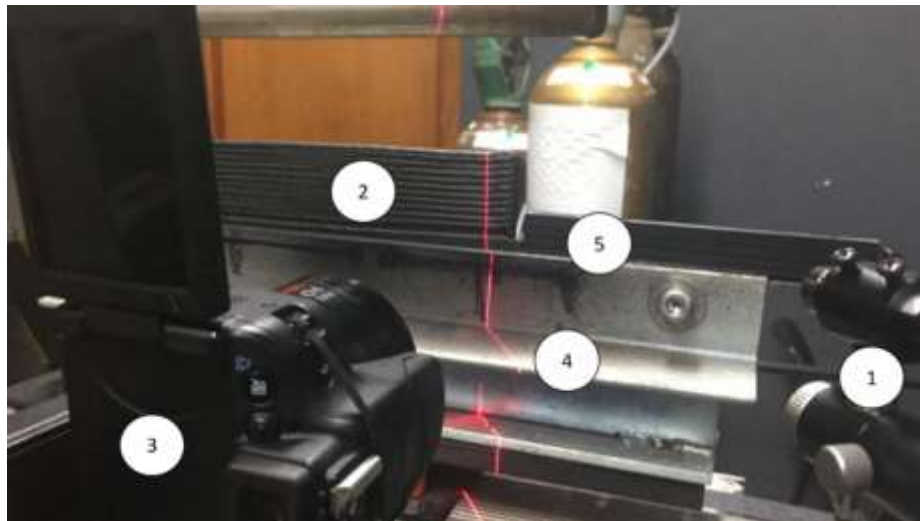


Figura 32 – Equipamentos utilizados no escaneamento: (1) *laser*; (2) pré-forma; (3) câmera; (4) plataforma de apoio da mesa CNC; (5) gabarito para calibração.

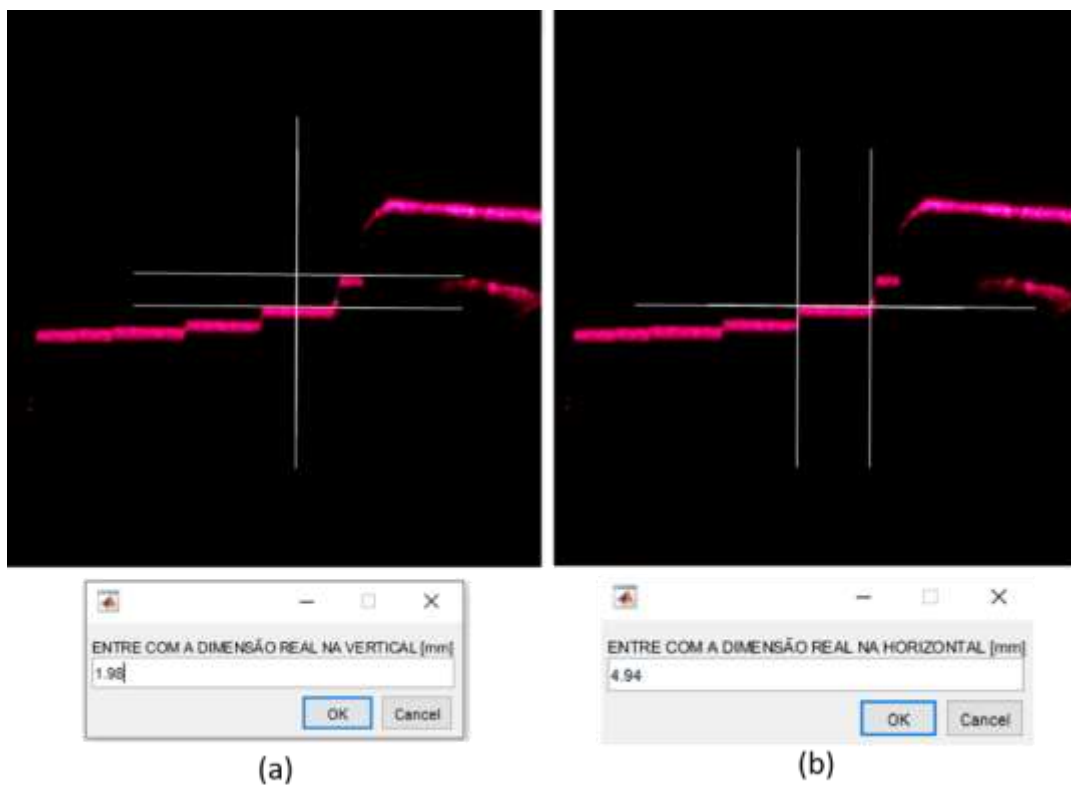


Figura 33 – Etapa de calibração do sistema de medição (a) vertical (b) horizontal pela imagem do gabarito.

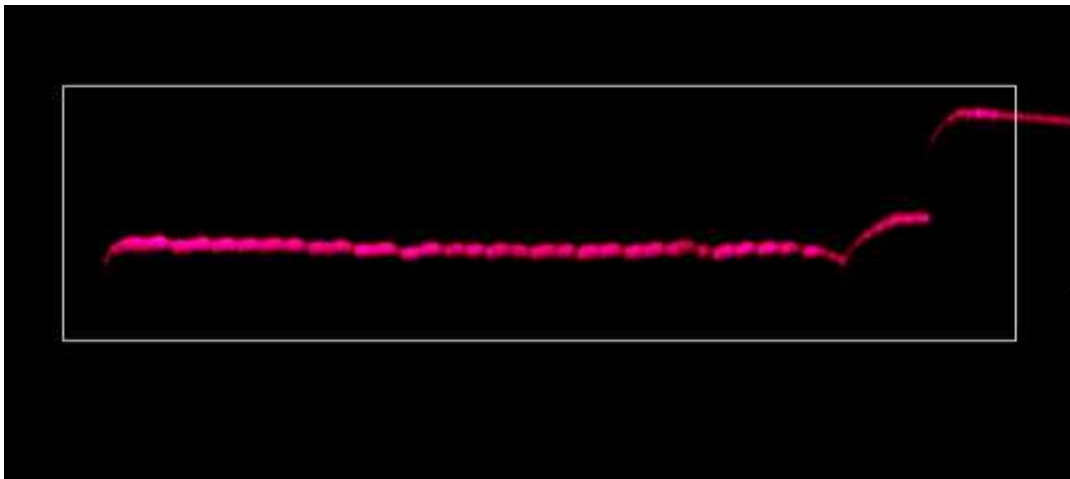


Figura 34 – Seleção da região de análise do escaneamento.

Durante o escaneamento, o vídeo é dividido em uma sequência de *frames*. A quantidade destas imagens fixas depende do tempo de vídeo, uma vez que a taxa de aquisição da câmera é constante em 30 *frames* por segundo. Um exemplo de *frame* é ilustrado pela Fig. 35 e cada um é analisado seguindo uma rotina que aplica uma série de filtros para remoção de ruídos e erros, através da conversão da imagem real para uma imagem binária, dilatações e eliminação de pontos de baixos *pixels*. Após a imagem estar tratada, o *software* constrói uma linha (de cor amarela) sobre o contorno superior do feixe de *laser* (para evitar os pontos de saturação de brilho no centro da linha do *laser*), apresentada na Fig. 36. Esta linha representa o perfil que, um *frame* após o outro, origina virtualmente a topografia da peça que está sob análise. A Figura 37 apresenta acima a imagem original da pré-forma (antes da pintura) e abaixo a imagem da pré-forma virtualmente reconstruída.

Para a análise da peça virtual, regiões indesejadas (substrato, extremidades, base e topo da pré-forma) foram excluídas para permitir a verificação da geometria apenas da área onde o processo WAAM é representativo.

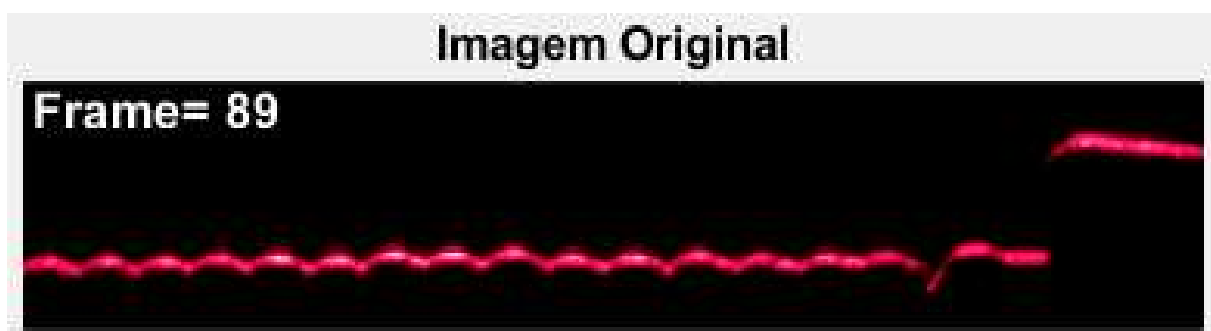


Figura 35 – *Frame* de número 89 em análise.

## Linha de reconstrução

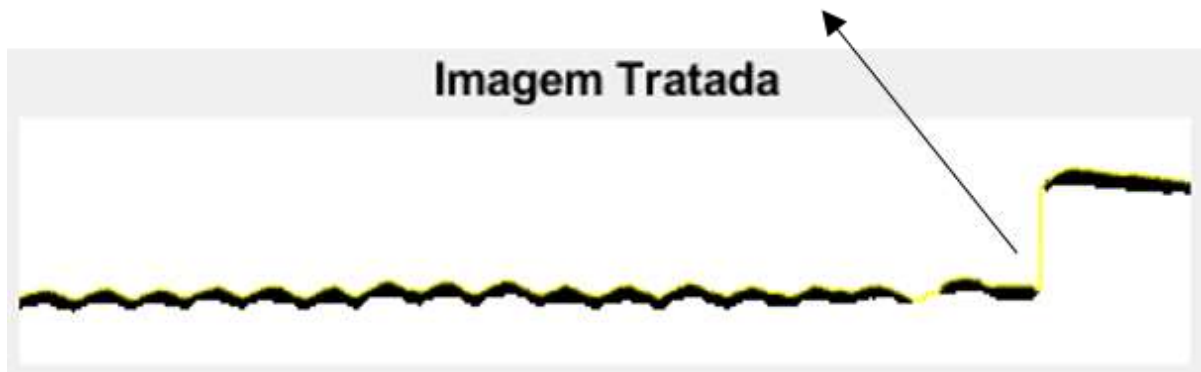


Figura 36 – *Frame* de número 89 após tratamento com indicação da linha de reconstrução (em amarelo).

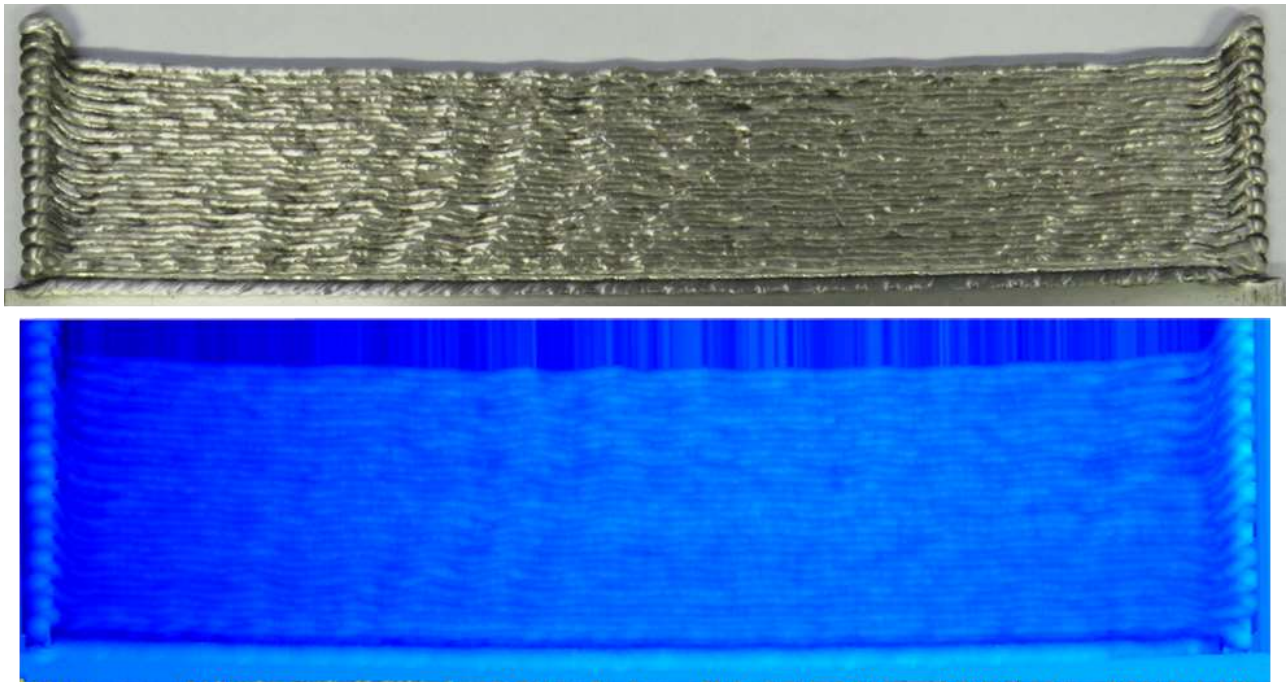


Figura 37 – Acima a imagem original da pré-forma antes da pintura. Abaixo sua reconstrução virtual por meio do escaneamento.

### 3.2.1.1 Parâmetros de análise geométrica via escaneamento

Para corrigir possíveis distorções de empenamento resultantes dos ciclos térmicos durante a deposição sobre a peça, foi implementado no programa um ajuste polinomial superficial de

segunda ordem por meio do método dos mínimos quadrados. A Figura 38 apresenta em azul os pontos da superfície da pré-forma e em cinza está a curva do polinômio de ajuste, por onde é percebido um desvio geométrico de segunda ordem que se assemelha a um empenamento. A nova superfície, desta vez corrigida, foi obtida pela subtração entre a superfície original e a do polinômio de ajuste, sendo ilustrada pela Fig. 39. Na sequência, um novo ajuste linear também foi aplicado e corrigiu possíveis inclinações causadas por mau posicionamento da peça.

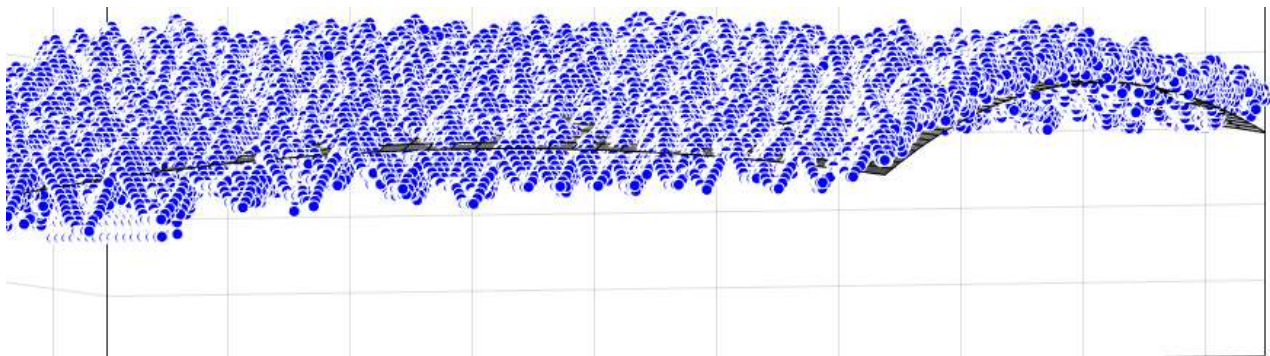


Figura 38 – Pontos da superfície da pré-formas (em azul) e superfície de ajuste em cinza.

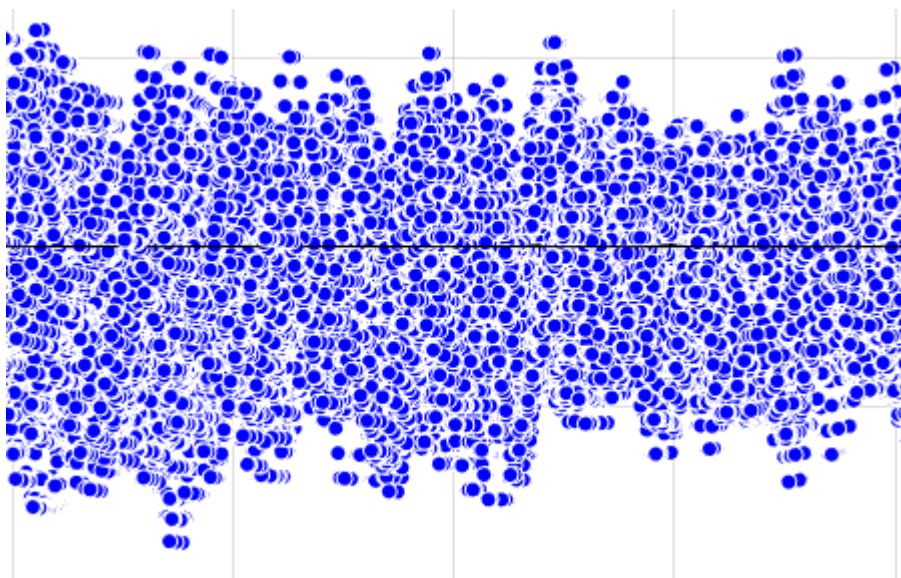


Figura 39 – Pontos da superfície corrigida em torno do plano horizontal.

Utilizando o plano horizontal como referência, foi estimado o parâmetro de ondulação superficial médio. Por meio da Eq. (3), obteve-se a distância de cada ponto (de coordenadas  $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$ ) em relação ao plano de coeficientes A, B, C e D. Foi verificado que a soma dos valores positivos (acima do plano) foi numericamente igual à soma dos valores negativos (abaixo do plano). Dessa forma, verificou-se que o plano representava uma linha média da superfície.

$$d_i = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (3)$$

Na sequência, o parâmetro de ondulação ( $W$ ) foi calculado pela Eq. (4) (XIONG et al., 2018) e considerado como a média dos valores absolutos das distâncias entre os pontos e plano na linha média, calculadas pela Equação (3) (XIONG et al., 2018). Um esquema ilustrativo da superfície, pontos e plano é apresentado na Fig. 40. Foram realizados três escaneamentos de cada condição para a obtenção do parâmetro de ondulação médio.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N |d_i|}{N} \quad (4)$$

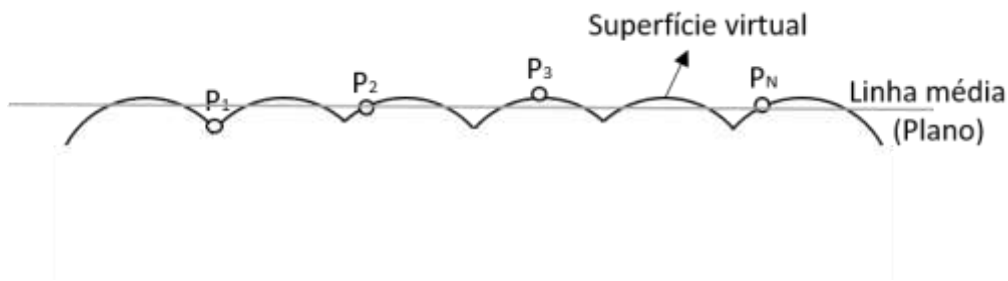


Figura 40 – Diagrama esquemático para determinar ondulação de pré-formas de WAAM.

Deslocando o plano verticalmente para a posição do ponto mínimo da superfície virtual e eliminando as extremidades da análise, conforme Fig. 41, foi possível determinar o volume mínimo de material a ser removido (VMR) da pré-forma em um processo de pós processamento (usinagem, por exemplo), para a obtenção de uma estrutura de melhor acabamento e forma. Este volume é estimado pela soma das distâncias entre os pontos da superfície e o plano mínimo por meio da Eq. (5).

$$V_{usinado} = \sum_{i=1}^N d_i \quad (5)$$

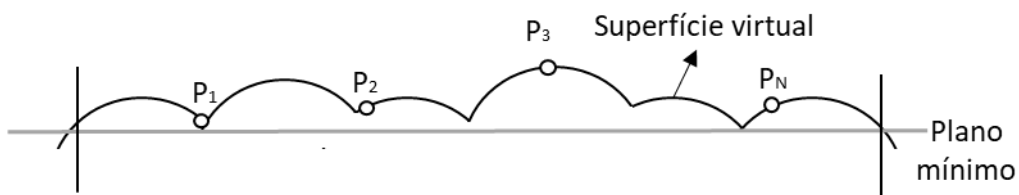


Figura 41 - Diagrama esquemático para determinar o volume mínimo de material a ser removido das pré-formas.

Apesar de representar um importante parâmetro, o volume mínimo de material a ser removido não pode ser utilizado para quantificar o aproveitamento do ponto de vista de geometria, mas sim apenas de matéria prima, uma vez que a região de análise não a mesma para todas as pré-formas (em função das partes descartadas). Uma alternativa para o aproveitamento do ponto de vista de forma foi avaliar a espessura mínima de material a ser removido (EMR), de forma que quanto menor for esta espessura, maior será o aproveitamento do material. Esta espessura foi definida como a distância entre o maior pico da superfície e o plano mínimo, ilustrada pela Fig. 42. Os resultados de aproveitamento serão então apresentados tanto pelo volume mínimo médio de material a ser removido, como fator de aproveitamento de matéria prima, como que pela espessura mínima média de material a ser removido, como fator de aproveitamento de forma.

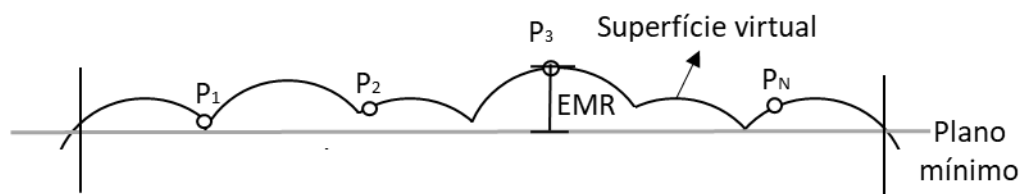


Figura 42 - Diagrama esquemático para determinar EMR.

Quando é registrado o resultado da medição de uma grandeza física, é obrigatório fazer alguma indicação quantitativa da qualidade desse resultado, de tal maneira que outras pessoas possam avaliá-lo e compará-lo com outros dados (BIPM et al., 2018). Para estimar a exatidão do sistema de medição, foi realizada uma etapa de validação do *software* que segue descrita no próximo capítulo onde foi calculado o erro sistemático ( $E$ ), que é definido como o componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível (BIPM et al., 2018). Esta etapa utilizou um gabarito de geometria conhecida para comparar os dados da sua superfície (medidos por um método convencional) com as informações obtidas a partir da superfície virtualmente reconstruída.

O parâmetro quantitativo que expressa a confiabilidade do resultado de uma medição se chama incerteza (BIPM et al., 2018). Foi avaliada a incerteza do tipo A, que é obtida por meio de uma análise estatística de séries de observações visando repetibilidade, como variância e desvio padrão (BIPM et al., 2018) e expressa pela Eq. (6) (BIPM et al., 2018). A incerteza expandida, com um coeficiente  $k = 2$ , foi obtida e utilizada para expressar um nível de confiança de aproximadamente 95 %, de acordo com a Eq. (7) (BIPM et al., 2018).

$$u(a) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

$$U = k \times u(a) \quad (7)$$

Nas Equações (6) e (7),  $s$  é o desvio padrão associado às leituras e  $n$  é a quantidade de medidas.

Os procedimentos para avaliação das incertezas do tipo B são mais elaborados e requerem maior atenção em comparação à incerteza do tipo A. É necessário levar em consideração todas as informações disponíveis que estejam relacionadas à qualidade do resultado da medição (BIPM et al., 2018). Dessa forma, uma abordagem mais detalhada dos fatores que implicariam em erros no sistema de medição foi proposta como um possível trabalho futuro.

Por fim, o erro máximo foi calculado por meio da Eq. (8) (BIPM et al., 2018) para determinar a faixa onde se espera que esteja contido o maior erro possível do sistema de medição.

$$E_{m\acute{a}x} = E + U \quad (8)$$

### 3.2.2 Análise geométrica pela seção transversal

A geometria das pré-formas também foi verificada por meio da análise da seção transversal das peças, já que este método se apresenta como o mais simples e comum. Foram escolhidas quatro posições distintas para o corte, duas centrais e duas localizadas a 20 mm das extremidades conforme Fig. 43. Os cortes foram realizados com jato de água abrasivo e a seção ficou com a aparência apresentada na Fig. 44a após etapa de polimento em lixa nº 400 e macrografia em um escâner da marca Epson modelo Perfection V19.

Por meio de um *software* de análise de imagens, desenvolvido anteriormente pela equipe do LAPROSOLDA-UFU, realizou-se a leitura das macrografias das seções transversais e virtualmente reconstruiu o perfil do corte (2D) de cada seção em duas dimensões. A Figura 44a mostra a imagem da macrografia de uma seção da pré-forma e na Fig. 44b é possível visualizar esta mesma imagem pós-tratamento. Uma etapa de calibração do sistema também foi realizada com base em uma escala de dimensão conhecida.

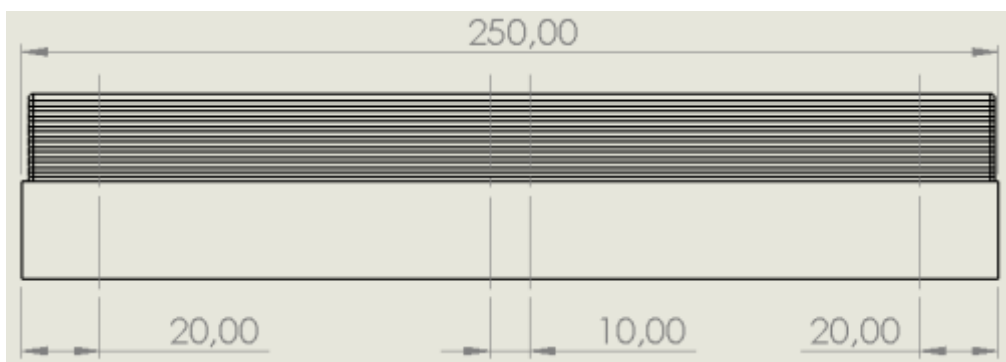


Figura 43 – Ilustração da pré-forma com indicação das regiões de corte (dimensões em mm).

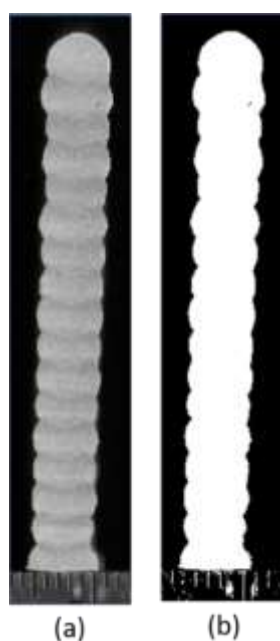


Figura 44 – Seção transversal (a) original e (b) tratada para análise do *software* de perfilografia.

Com o perfil virtualmente reconstruído, ilustrado na Fig. 45b, e os pontos dos contornos obtidos (superior em vermelho e inferior em azul), foi possível realizar a análise geométrica para avaliar o efeito dos parâmetros  $V_A$ ,  $V_D$  e LEWR sobre as pré-formas em termos de ondulação e aproveitamento, semelhante ao realizado para o método via escaneamento.



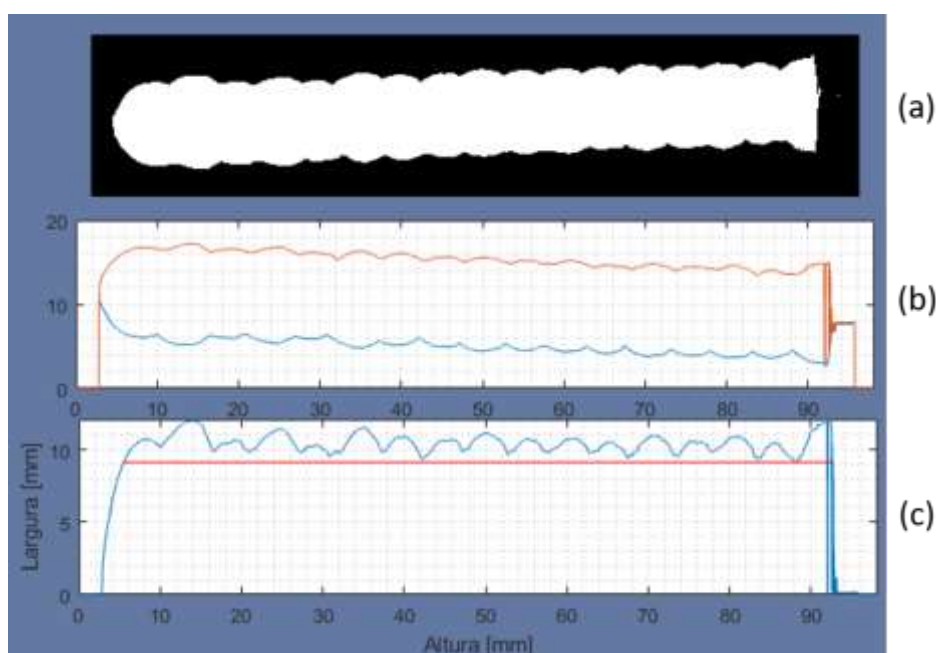


Figura 45 – (a) Imagem tratada da seção transversal (b) reconstrução virtual do perfil; (c) gráfico da altura x largura da pré-forma.

### 3.2.2.1 Parâmetro de análise

Com os pontos que representam o perfil da seção transversal, foi possível reconstruir as duas regiões laterais da parede individualmente e assim proceder com uma análise diferente para cada lado. Para eliminar a influência de possíveis inclinações no estudo, foi realizada uma linearização de primeira ordem dos pontos. A diferença entre os pontos da curva original do perfil e da reta de linearização foi utilizada para gerar os novos pontos do contorno superior. Com as informações da largura, foi possível obter os pontos do contorno inferior.

Foi obtida a linha média de cada curva de modo que a soma dos valores dos pontos acima da linha foi numericamente igual à soma dos valores dos pontos abaixo. A distância absoluta entre os pontos (de coordenadas  $x_i$  e  $y_i$ ) e a linha média (reta de coeficientes A, B e C) foi calculada via Eq. (9) (BOULOS e de CAMARGO, 1975) e a média estimada pela Eq. (10) (XIONG et al., 2018) para obter o parâmetro de ondulação de cada contorno. A média do parâmetro de ondulação foi calculada separadamente para a região central e de extremidades da pré-forma, com quatro medições em cada. Os valores de desvio padrão foram utilizados para o cálculo de incerteza conforme Eq. (7).

$$d_i = \frac{Ax_i + By_i + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (9)$$

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N |d_i|}{N} \quad (10)$$

Novamente foi obtida uma linha horizontal ao eixo de referência passando pelo ponto mínimo do contorno superior e inferior do perfil. Foi possível então calcular um parâmetro percentual de aproveitamento mínimo de material ( $A_P$ ), sendo a razão entre a área de material aproveitável ( $A_{aprov}$ ) e a área total de material depositado ( $A_{dep}$ ), via Eq. (9). A Figura 46 ilustra as regiões em questão. Da mesma forma, os resultados para o  $A_P$  foram expressos em termos médios e os desvios padrão utilizados para estimar a incerteza da medição.

$$A_P = \frac{A_{aprov}}{A_{dep}} \times 100 (\%) \quad (11)$$

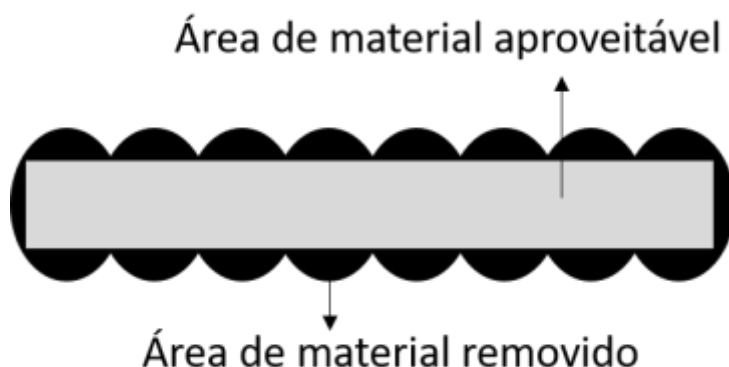


Figura 46 – Esquema representativo da área de material aproveitável e removido.

### 3.2.2 Análise geométrica pela medição convencional de altura e largura

Os valores da altura e da largura da pré-forma foram avaliados utilizando um paquímetro digital da marca Mitutoyo e modelo 500-171-20B com resolução de 0,01 mm.

As regiões de medição foram chamadas de A, B e C, conforme esquema ilustrativo da Fig. 47. As regiões A e C foram localizadas à 15 mm das extremidades da pré-forma enquanto a região B representou o centro da peça. Foram efetuadas três medições em cada ponto e os resultados expressos em termos de altura e largura média, sendo que os desvios padrão foram utilizados para calcular a incerteza de medição conforme Eq. (7).

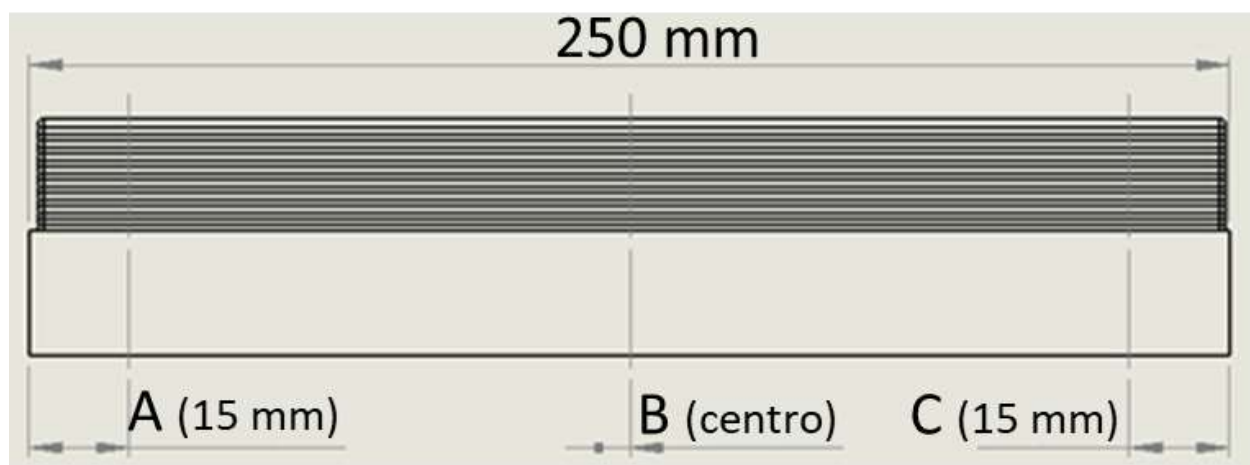


Figura 47 – Localização dos pontos de medição A, B e C por método convencional.

### 3.3 Avaliação de porosidade

O nível de porosidades foi estimado pelo método de Arquimedes, ou seja, através da técnica de gravimetria, que fornece resultados confiáveis uma vez que todo o volume da amostra é considerado ao invés de apenas seções transversais únicas (SPIERINGS E SCHNEIDER, 2011). É um procedimento econômico e rápido para esse fim, comparado a outros métodos comuns (microscopia e tomografia computadorizada). Pela simplicidade, não avalia a superfície da peça, o tamanho, formato e distribuição dos vazios e permite distinguir os poros de outros defeitos.

Para essas medições foi utilizada uma balança digital (marca Shimadzu e modelo UX6200H) de resolução 0,01 g e água deionizada. Também via corte por jato de água abrasivo, uma fatia central da pré-forma com 10 mm de comprimento, ilustrada na Figs. 48a e 48b, foi retirada e utilizada como amostra para os testes. Uma etapa de limpeza com solvente para remoção da camada de tinta foi necessária antes da separação do material depositado do substrato.

Três medições no ar e na água foram realizadas para cada amostra, primeiro no ar para evitar que a água se infiltrasse nos defeitos superficiais. Nas medições em água, bolhas ocasionais foram removidas para evitar possíveis erros.



Figura 48 - Exemplo de fatia central utilizada na gravimetria das pré-formas: (a) seção transversal (b) vista lateral.

Os resultados são apresentados em termos de percentual de volume de vazios em relação a uma densidade de referência, uma vez que a eventual presença de trincas internas, outros vazios e/ou defeitos de falta de fusão, por exemplo, podem afetar os resultados de porosidade. Este valor de densidade padrão foi obtido a partir de uma amostra do arame (AWS ER5356) de liga de alumínio utilizada na deposição (composição na Tab. 2) sob a mesma técnica de gravimetria.

### 3.3.1 Gravimetria

Para aplicação da técnica de gravimetria, foi utilizada uma plataforma construída especificamente para esta etapa. O projeto é ilustrado na Fig. 49a e a plataforma foi fabricada via manufatura aditiva por extrusão de material (FDM). A impressão ocorreu no âmbito do Centro Universitário UNA (Uberlândia-MG) com uso de uma impressora 3D modelo GTMAX Core A2V2 e com plástico ABS como material. A versão final da plataforma é apresentada na Fig. 49b.

O objetivo do uso desta plataforma foi facilitar o processo de medição da massa em ambiente seco e imersa em líquido, conforme Figs. 50a e 50b respectivamente, mantendo

constante as condições ambientais e o zero da balança. Com estes valores, foi possível calcular a densidade da amostra por meio da Eq. (12).

$$\rho_{amostra} = \frac{\rho_{liquido} \cdot m_{ar}}{m_{ar} - m_{liquido}} \quad (12)$$

Na Equação (12),  $\rho_{liquido}$  é a densidade do líquido utilizado, no caso água deionizada (1,00 g/cm<sup>3</sup>),  $m_{ar}$  é a massa da amostra medida no ar e  $m_{liquido}$  é a massa da amostra medida quando imersa no líquido.

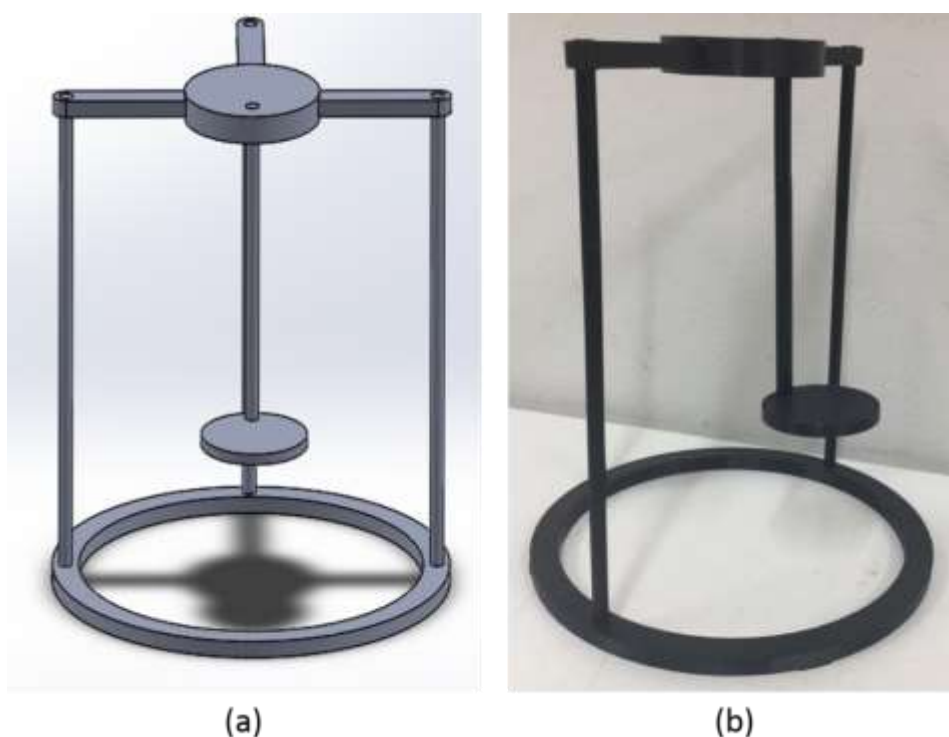


Figura 49 – Plataforma para medição de porosidade por gravimetria: (a) projeto em CAD; (b) montada após impressão 3D.

Utilizando este método, a densidade do arame de deposição (ER5356) foi calculada para servir como referência na etapa de cálculo do parâmetro de análise de porosidade (próxima seção). Uma certa quantidade de arame foi enrolada e teve sua massa aferida à seco e depois imersa em água deionizada à temperatura de 20 °C. Os dados e resultado são expressos na Tab. 7 e as medições nas Figs. 50a e 50b.

Tabela 7 – Dados para cálculo da densidade do arame.

	Valor médio	Incerteza
Massa da amostra à seco	2,39 g	0,00 g
Massa da amostra imersa em líquido	1,48 g	0,00 g
Densidade da água deionizada	1,00 g/cm <sup>3</sup>	
Densidade da amostra	2,61 g/cm <sup>3</sup>	0,01 g/cm <sup>3</sup>

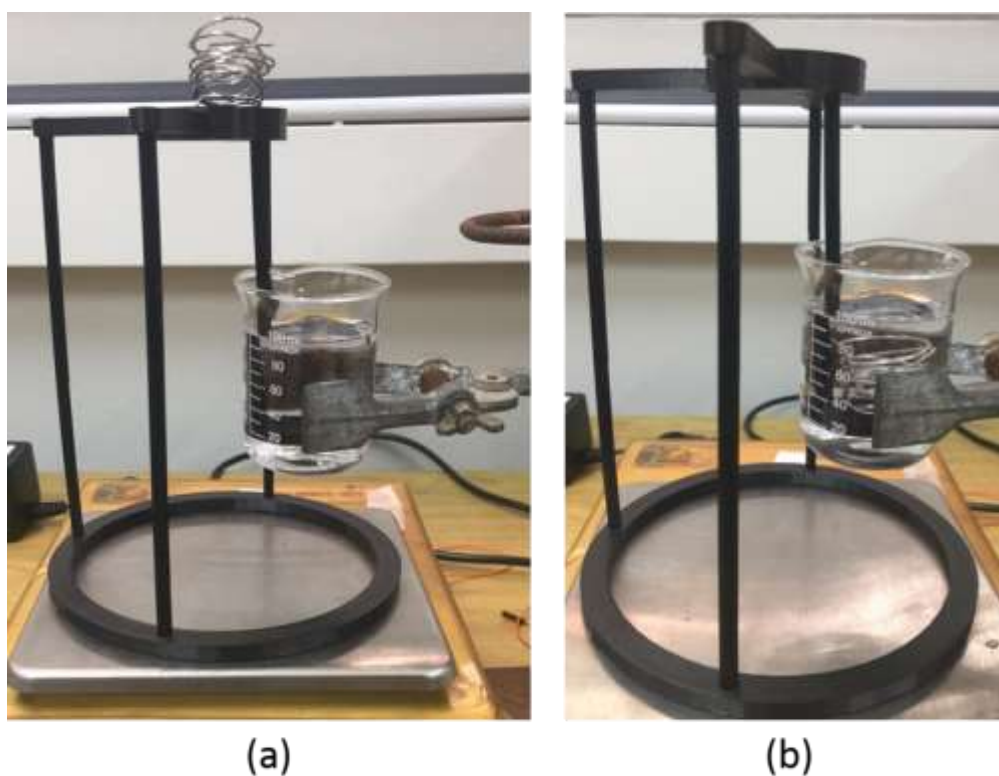


Figura 50 – Medição da massa (a) à seco e (b) imersa para cálculo de densidade do arame depositado (referência).

### 3.3.2 Parâmetro de análise (Volume de vazios)

O parâmetro utilizado para a análise de porosidade foi o percentual de volume de vazios do corpo de prova em relação a uma densidade de referência (calculada via amostra do arame de deposição na seção anterior). Para o cálculo deste percentual, foi utilizada a Eq. (13).

$$V_{\text{vazios}} = (\rho_{\text{Aluminio}} - \rho_{\text{amostra}}) \times \frac{100}{\rho_{\text{Aluminio}}} (\%) \quad (13)$$

Na Equação (13),  $\rho_{Aluminio}$  é a densidade referência da liga de alumínio (arame) e  $\rho_{amostra}$  é a densidade da amostra de prova (amostra como depositada) calculada via Eq. (12).

Para calcular a incerteza de medição em termos de volume de vazios, foi utilizado o método de propagação de incertezas. A incerteza da medição da massa foi calculada a partir do desvio padrão das três medidas, conforme Eqs. (14) e (15). Na sequência, foi calculada a incerteza para a densidade da amostra via Eq. (16) e posteriormente a incerteza para o volume de vazios por meio da Eq. (17).

$$u_{ar} = \frac{s_{ar}}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

$$u_{liquido} = \frac{s_{liquido}}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

$$u_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{amostra}}{\partial m_{liquido}}\right)^2 \cdot u_{liquido}^2 + \left(\frac{\partial \rho_{amostra}}{\partial m_{ar}}\right)^2 \cdot u_{ar}^2} \quad (16)$$

$$u_{votume} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{vazios}}{\partial \rho}\right)^2 \cdot u_{\rho}^2} \quad (17)$$

### 3.4 Avaliação térmica

Com o objetivo de proceder com uma análise térmica quantitativa, a temperatura durante a deposição foi monitorada. Wu et al. (2017) sugeriram que a medição deste parâmetro diretamente no substrato levaria a grandes erros, especialmente quando o tempo de parada era muito pequeno. Também, considerando o constante aumento do nível de água para manter o LEWD constante, neste trabalho não faz sentido a medição em um ponto fixo no substrato.

Buscando analisar sempre os dados da camada anterior à deposição, um pirômetro infravermelho (IR), com especificações apresentadas na Tab. 8, foi colocado junto ao sistema de movimentação da tocha de deposição. O foco de medição do pirômetro foi posicionado a 30 mm do centro do arco, pois distâncias menores provocaram ruídos nas medições (da SILVA, 2019). Considerando que a emissividade varia com volume, rugosidade, oxidação e temperatura da superfície (HAGQVIST, SIKSTRÖM E CHRISTIANSS, 2013), a mesma foi definida em 22 %, seguindo a estimativa realizada por da Silva (2019) para esta mesma aplicação utilizando o mesmo modelo de aparelho, onde um termopar tipo K foi utilizado para o ajuste.

Tabela 8 – Especificações do pirômetro (LUMASENSE, 2019).

Pirômetro infravermelho	Mikron MI-PE140 com foco óptico
Faixa espectral	3-5 $\mu\text{m}$
Faixa de temperatura	30-1000 $^{\circ}\text{C}$
Tamanho do foco	Diâmetro de 2,9 mm – distância de 380 mm
Resolução	0,1 $^{\circ}\text{C}$

Como o equipamento foi posicionado de forma fixa em relação à tocha, os valores de temperatura à frente do arco foram obtidos a cada duas camadas depositadas. Em função dos passes bidirecionais, na primeira camada o pirômetro estava focalizado à frente da poça de fusão, na seguinte ele estava direcionado para a posição atrás da poça, conforme esquema apresentado nas Figs. 51a e 51b.

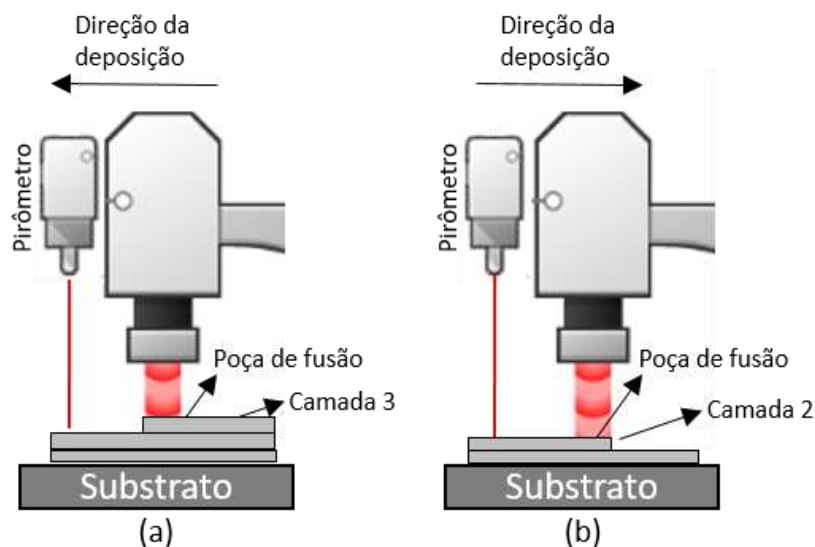


Figura 51 – Representação dos equipamentos de aquisição de dados do pirômetro: (a) antes da poça de fusão (b) após a poça de fusão.

Dessa forma foi possível obter os dados da temperatura na região anterior e posterior à poça de fusão para camadas alternadas ao longo do processo de deposição. Observou-se que os dados se aproximaram de uma distribuição bimodal, ilustrada na Fig. 52a, onde a temperatura média à frente do arco correspondeu ao primeiro quartil (Q1- 25 %). Já a temperatura média da região posterior foi representada pelo valor do terceiro quartil (Q3 – 75 %), como também descrito por da Silva (2019).



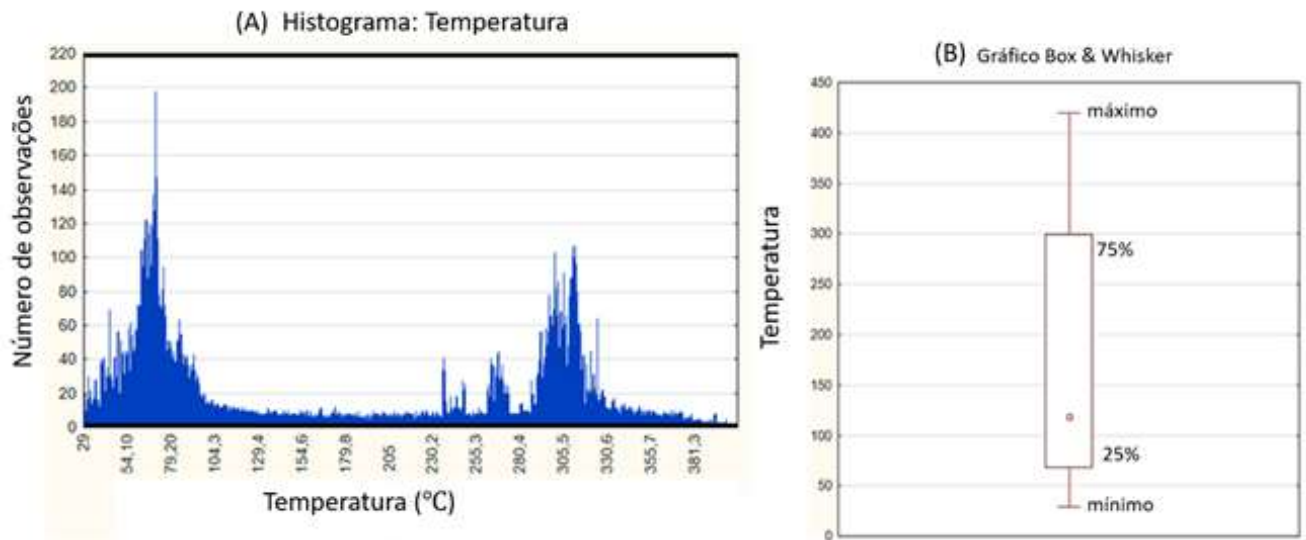


Figura 52 – (a) Histograma apresentando uma distribuição bimodal para a temperatura; (b) gráfico Box & Whisker localizando o primeiro (25 %) e terceiro (75 %) quartil.

Sendo assim, a temperatura de à frente do arco foi analisada com o objetivo de avaliar seu comportamento diante da variação dos parâmetros de deposição:  $V_A$  (Velocidade de alimentação),  $V_D$  (Velocidade de deposição) e LWED (distância entre a aresta da camada em deposição e a lâmina d'água). Como mencionado no capítulo de revisão bibliográfica, quanto mais baixa a temperatura medida, menor é o acúmulo de calor do processo.

## CAPÍTULO IV

### 4. VALIDAÇÃO DO SOFTWARE DE ESCANEAMENTO

O sistema de escaneamento a *laser* utilizado na análise geométrica das pré-formas fabricadas por WAAM, descrito no capítulo III (Metodologia e Equipamentos), passou por uma etapa de validação para verificar sua exatidão e a possível representação da ondulação superficial (efeito *stair-step*) das peças depositadas.

O processo como um todo (escaneamento e reconstrução virtual da superfície) foi aplicado para uma estrutura de geometria conhecida (gabarito). Esta peça, em liga de alumínio, ilustrada pelas Figs. 53a e 53b, foi fabricada a partir de um bloco pelo processo de fresamento convencional formando 6 níveis de superfície em alturas distintas, apresentados na Fig. 54, de modo a reproduzir magnitudes dos picos e vales da ondulação superficial das pré-formas. As 5 diferenças entre alturas das superfícies ( $\Delta H_n$ ) foram utilizadas como referência para quantificar o erro sistemático do sistema e a representatividade da reconstrução virtual em cada nível, através da comparação entre medições realizadas pelo método convencional com contato e da técnica de escaneamento. Esta etapa foi realizada em sala escura para eliminar possíveis interferências de fontes luminosas.



Figura 53 – Gabarito utilizado na validação sob (a) vista superior e (b) vista lateral.

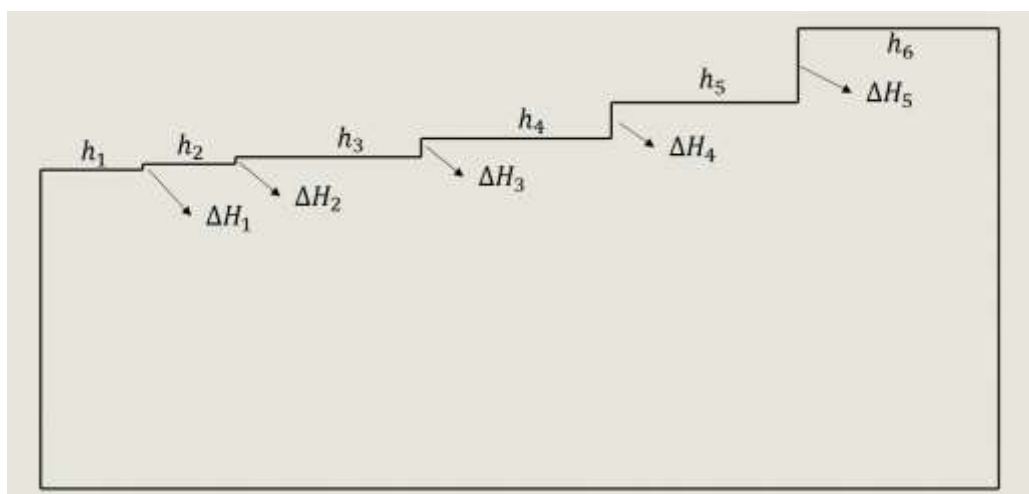


Figura 54 – Identificação das alturas e diferenças entre alturas na seção transversal do gabarito.

Para a medição convencional, os 6 níveis de altura de superfície ( $h_n$ ) foram calculados através da média aritmética de três medições em cada um dos 5 pontos igualmente espaçados ao longo do comprimento do gabarito, como apresentado na Fig. 55. Foi utilizado um traçador de alturas digital já calibrado, pertencente ao Laboratório de Metrologia – UFU, modelo HDS-H12°C da marca Mitutoyo com faixa nominal de 300 mm e resolução 0,01 mm e as medições realizadas à 25 °C. As 5 diferenças entre alturas ( $\Delta H_n$ ) foram calculadas pela variação entre os níveis de altura correspondentes e, propositalmente resultaram em valores distintos. Os valores encontrados são expressos na Tab. 9.



Figura 55 – Localização dos 5 pontos de medição das alturas das superfícies do gabarito.

Tabela 9 – Valores de altura e diferença entre alturas das superfícies do gabarito.

Alturas das superfícies (mm)		Incerteza (mm)	Diferença entre alturas das superfícies (mm)		Incerteza (mm)
$h_1$	8,44	0,00			
$h_2$	8,61	0,00	$\Delta H_1$	0,18	0,01
$h_3$	8,78	0,00	$\Delta H_2$	0,17	0,01
$h_4$	9,26	0,00	$\Delta H_3$	0,48	0,00
$h_5$	10,23	0,01	$\Delta H_4$	0,98	0,00
$h_6$	12,21	0,00	$\Delta H_5$	1,98	0,00

Para a técnica de escaneamento, alguns parâmetros (pintura da superfície da peça; velocidade de escaneamento; ângulo de incidência e potência do *laser*) foram considerados como passíveis de influência no processo durante testes e avaliações preliminares. Dessa forma, a validação foi realizada com uma análise da influência destes fatores sob o erro de medição.

Foram levantadas as medidas dos níveis de altura de cada superfície via escaneamento. Devido à possibilidade do recurso computacional, o resultado levou em consideração todo o comprimento da superfície do gabarito, e não apenas de 5 posições fixas como no método convencional. As diferenças entre alturas também foram calculadas pela variação entre os níveis de altura correspondentes e, por fim, os erros entre as duas metodologias foram avaliados.

O alinhamento do gabarito na mesa foi realizado com o uso de um relógio comparador analógico Mitutoyo modelo 2046S com resolução de 0,01 mm e 10 mm de capacidade (10 voltas), ilustrado na Fig. 56. A distribuição dos equipamentos utilizados no escaneamento do gabarito é apresentada pela Fig. 57.



Figura 56 – Verificação de alinhamento do gabarito com uso de relógio comparador.

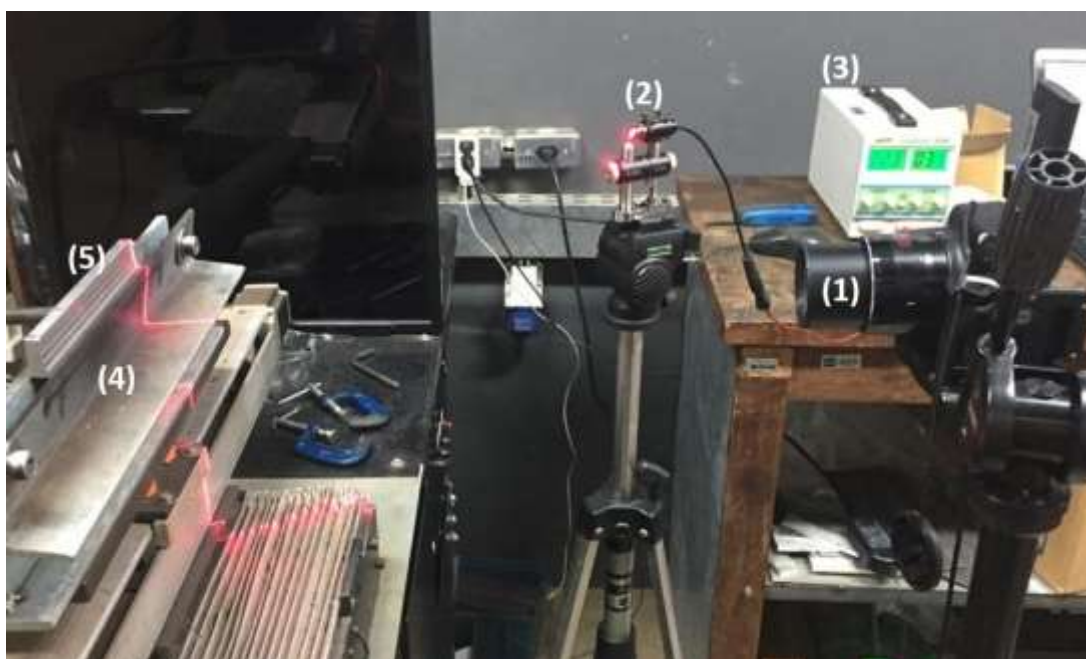


Figura 57 – Distribuição de equipamentos no escaneamento: (1) Câmera de filmagem; (2) *Laser*; (3) Fonte eletrônica; (4) Suporte da mesa CNC; (5) Gabarito.

#### 4.1 Avaliação da pintura superficial

Durante os primeiros escaneamentos foi verificado um alto brilho do *laser* na superfície de alumínio do gabarito, fato que poderia interferir na leitura do vídeo por meio do *software* em desenvolvimento. Sendo assim, decidiu-se por avaliar o efeito da pintura da superfície com o uma tinta *spray* comercial de cor preta fosca (para minimizar reflexos). A tinta utilizada foi da marca ChemiColor. As Figuras 58a e 58b apresentam o gabarito sem e com a pintura. Uma alternativa seria utilizar um filtro ótico do tipo passa banda para deixar passar para a câmera apenas a comprimento de onda do *laser*, mas essa alternativa foi deixada para trabalhos futuros.

Para esta avaliação foram mantidos constantes os demais parâmetros de escaneamento, conforme Tab. 10. Os erros referentes à diferença entre as alturas das superfícies foram avaliados em soma com uma análise qualitativa da imagem do *laser* durante o escaneamento e reconstrução virtual da geometria.

Foram analisados dois vídeos de escaneamento para cada condição em estudo. O valor de diferença entre as alturas média entre estes dois vídeos foi calculado pela média aritmética. Dessa forma foi possível obter o erro de medição em termos percentuais e absolutos.

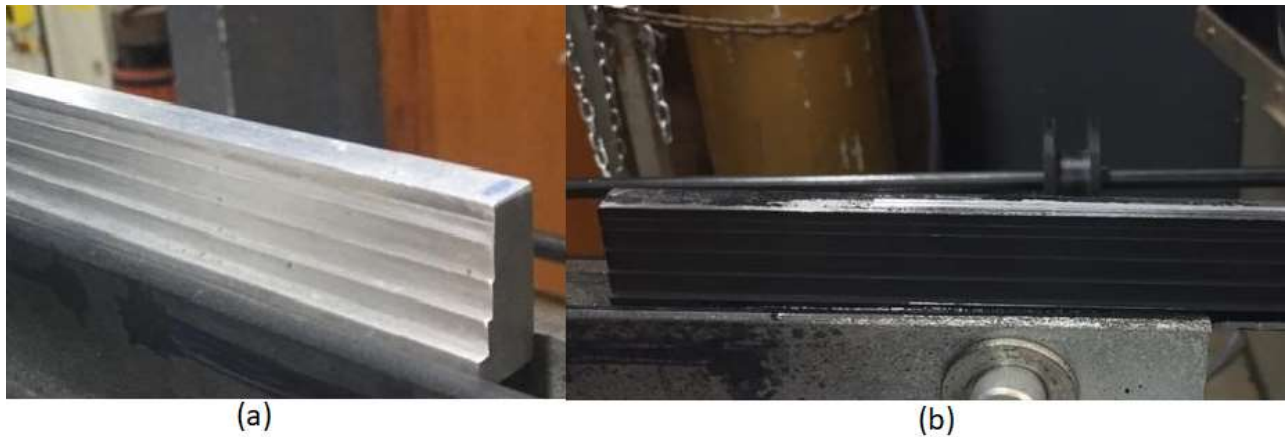


Figura 58 – Gabarito (a) sem pintura e (b) com pintura.

Tabela 10 – Parâmetros de escaneamento para avaliação da pintura.

Velocidade de escaneamento	600 mm/min
Ângulo de inclinação do <i>laser</i>	40°
Distância do <i>laser</i> até a peça	365 mm
Distância da câmera até a peça	165 mm
Zoom da câmera	$\infty$ - 30 cm
Potência do <i>laser</i>	0,22 W (0,10 A x 2,20 V)

Ao observar as Figuras 59a e 59b, é possível perceber que a superfície sem pintura apresenta uma elevada reflexão e brilho do *laser*, em virtude das propriedades da liga de alumínio. Na Figura 59a observa-se que o brilho provoca uma alta quantidade de oscilações no traçado da superfície, tanto na imagem original quanto na tratada. Em contrapartida, na Fig. 59b é verificada uma maior linearidade do traço em amarelo que representa a superfície do gabarito e promove sua reconstrução geométrica virtual.

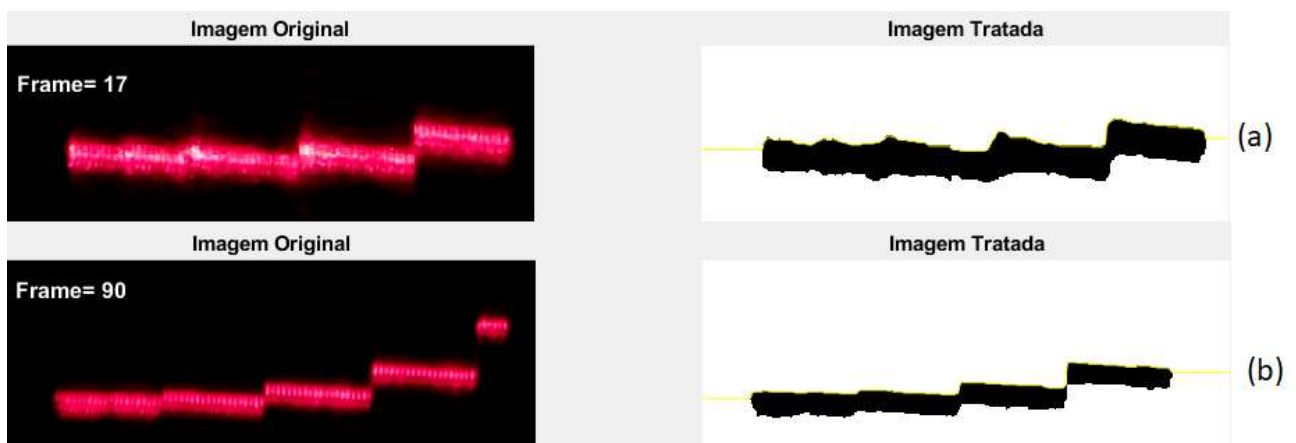


Figura 59 – *Laser* incidido na superfície (a) sem pintura e (b) com pintura.

Analisando quantitativamente, os erros para as diferenças entre as alturas das superfícies foram muito maiores para o caso da peça sem pintura, chegando a valores de 0,45 mm conforme a Tab. 11. Os erros para  $\Delta H_1$  e  $\Delta H_2$  não foram apresentados pois se mostraram ainda maiores, não fazendo sentido a utilização desta altura. Dessa forma, conclui-se que a pintura da superfície com tinta de cor preferencialmente preto fosco é fundamental para a análise por imagens de componentes fabricados em alumínio, mitigando equívocos provocados pela alta refletividade do material. Em materiais como aço comum ao carbono, mais escuro e opaco no estado como depositado, essa necessidade talvez possa ser descartada.

Tabela 11 – Tabela com os erros de medição para análise com e sem pintura do gabarito.

	Valor referência	Superfície não pintada				Superfície pintada			
		Valor medido (mm)	Incerteza Expand. (mm)	Erro real (mm)	Erro percentual (%)	Valor medido (mm)	Incerteza Expand. (mm)	Erro real (mm)	Erro percentual (%)
$\Delta H_3$	0,48	0,03	0,02	0,45	93,49	0,34	0,01	0,14	28,52
$\Delta H_4$	0,98	0,53	0,06	0,45	46,24	0,86	0,06	0,12	12,08

#### 4.2 Avaliação da velocidade de escaneamento

Outro importante parâmetro analisado foi a velocidade de escaneamento, que corresponde à velocidade em que a mesa CNC auxiliar foi programada para se movimentar. Esta medida possui impacto direto na produtividade do processo de medição, no tempo de cada escaneamento e na quantidade de *frames* que podem ser analisados, tendo em vista que a taxa de aquisição de *frames* da câmera é constante (30 *frames* por segundo).

Foram analisadas 4 velocidades distintas: 300, 600, 900 e 1200 mm/min. Em cada caso, três vídeos de escaneamentos foram avaliados e a diferença entre alturas média entre as superfícies foi obtida. Os erros absolutos e percentuais também foram calculados. Não foi realizada análise para o valor de  $\Delta H_5$  pois a presença do substrato interferiu na reconstrução virtual desta superfície. Os demais parâmetros se mantiveram constantes conforme a Tab. 12.





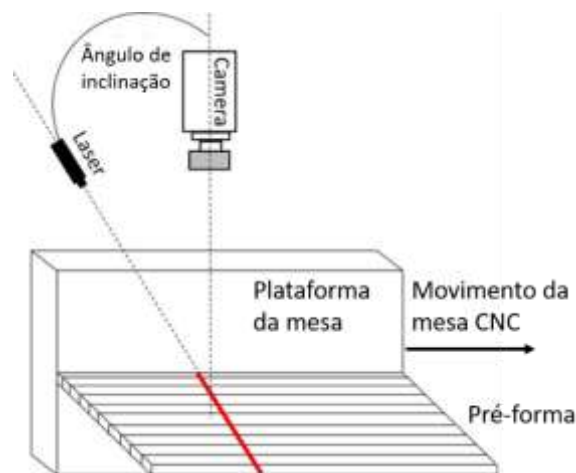


Tabela 14 – Erros percentuais para cada diferença entre alturas de superfícies.

	300 (mm/min)		600 (mm/min)		900 (mm/min)		1200 (mm/min)	
	Média (%)	Incerteza Expand. (%)	Média (%)	Incerteza Expand. (%)	Média (%)	Incerteza Expand. (%)	Média (%)	Incerteza Expand. (%)
$\Delta H_1$	58,28	2,22	58,83	1,58	61,70	2,51	61,54	1,29
$\Delta H_2$	22,67	0,50	29,35	7,08	23,04	2,53	24,90	1,48
$\Delta H_3$	6,34	6,07	11,07	3,15	7,97	0,91	9,22	0,40
$\Delta H_4$	4,63	1,53	2,09	1,84	1,98	2,35	1,81	0,15

### 4.3 Avaliação do ângulo de inclinação do *laser*

Considerando o ângulo de inclinação do *laser* ilustrado na Fig. 60, foi verificado o efeito de sua variação. Foram analisadas as seguintes angulações: 30°, 40°, 50° e 60° e, em cada caso, três vídeos de escaneamentos foram avaliados e a diferença entre as alturas das superfícies obtida por meio da média aritmética. Os erros absolutos e percentuais também foram calculados.

Figura 60 – Indicação do ângulo de inclinação do *laser* durante escaneamento.

Os demais parâmetros de escaneamento são apresentados na Tab. 15. Em função do posicionamento do *laser* em relação à mesa CNC auxiliar e câmera, foi necessário variar minimamente a distância do *laser* até a peça para obter os ângulos sob análise.

Tabela 15 - Parâmetros para avaliação da velocidade de escaneamento.

Zoom da câmera	$\infty$ - 10 cm			
Pintura da superfície	Cor preta fosca			
Macro	Manual – aproximadamente 15 cm			
Potência do <i>laser</i>	0,26 W (0,12 A x 2,20 V)			
Distância da câmera até a peça	150 mm			
Distância do <i>laser</i> até a peça	260 mm	270 mm	280 mm	320 mm
Ângulo	30°	40°	50°	60°

As Figuras 61a, 61b, 61c e 61d apresentam as imagens do escaneamento para os quatro ângulos: 30°, 40°, 50° e 60° respectivamente. Foi possível perceber pela imagem original que o aumento do ângulo ocasionou um aumento na espessura do *laser* sobre a superfície, como se fosse um efeito de alargamento feixe de luz e algo esperado. Outro efeito observado foi a redução da intensidade do brilho do feixe, resultado deste aumento de espessura e também da distância entre o *laser* e a peça. Analisando as imagens tratadas, foi verificado que o ângulo de 50° apresentou menores imperfeições na região superior do *laser*, a partir da qual se representa a superfície virtual em construção.

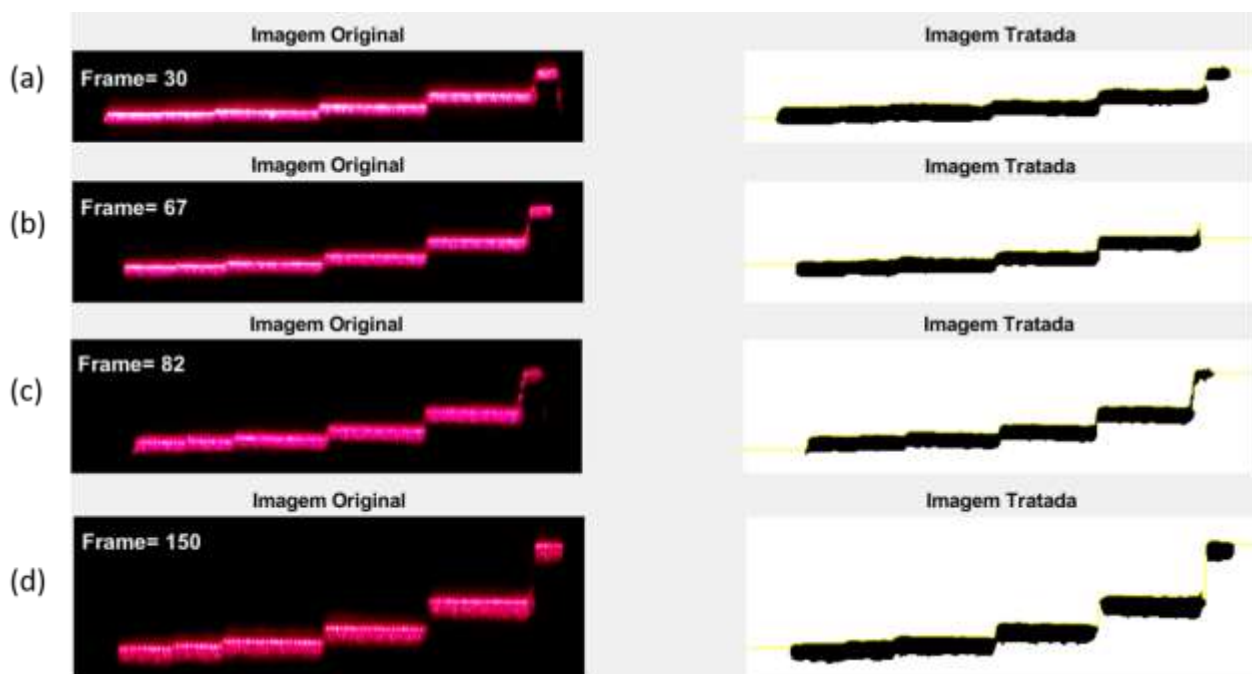


Figura 61 –Escaneamento para os ângulos (a) 30°, (b) 40°, (c) 50° e (d) 60°.

Observando os resultados de forma quantitativa, as Tabs. 16 e 17 indicam que o aumento do ângulo de 30° até 50° resultou na redução dos erros para as maiores diferenças entre as alturas

de superfície. Como esperado por meio da análise da Fig. 61, o ângulo de 50° foi o que apresentou menores erros para a faixa de maior interesse de trabalho, que varia entre 0,48 mm e 0,98 mm e apresentou erros absolutos de 0,04 mm e 0,02 mm respectivamente. Para as menores diferenças de altura, nas quais elevada sensibilidade do escaneamento é requerida, os erros não apresentaram um padrão e foram mais elevados em termos percentuais.

O maior ângulo (60°), apesar de apresentar pequenos erros, expôs uma considerável limitação no posicionamento dos equipamentos disponíveis, necessitando de uma série de aparatos e suportes para garantir a estabilidade do processo, o que requer um monitoramento mais atencioso. Este excesso de detalhes em comparação aos demais ângulos o tornou desfavorável.

Tabela 16 - Erros absolutos para a variação de ângulos do *laser*.

	30°		40°		50°		60°	
	Média (mm)	Incerteza Expand. (mm)	Média (mm)	Incerteza Expand. (mm)	Média (mm)	Incerteza Expand. (mm)	Média (mm)	Incerteza Expand. (mm)
$\Delta H_1$	0,07	0,00	0,08	0,00	0,11	0,00	0,09	0,00
$\Delta H_2$	0,02	0,01	0,05	0,01	0,04	0,00	0,03	0,01
$\Delta H_3$	0,18	0,02	0,07	0,02	0,04	0,00	0,05	0,02
$\Delta H_4$	0,08	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02

Tabela 17 - Erros percentuais para a variação de ângulos do *laser*.

	30°		40°		50°		60°	
	Média (%)	Incerteza Expand. (%)	Média (%)	Incerteza Expand. (%)	Média (%)	Incerteza Expand. (%)	Média (%)	Incerteza Expand. (%)
$\Delta H_1$	39,04	0,73	42,17	1,73	61,70	2,51	51,91	1,42
$\Delta H_2$	9,88	5,50	27,45	6,67	23,04	2,53	18,25	3,48
$\Delta H_3$	37,25	3,33	15,34	3,70	7,97	0,91	9,55	4,46
$\Delta H_4$	8,43	4,45	4,61	2,48	1,98	2,35	2,59	1,79

#### 4.4 Avaliação da potência do *laser*

Por fim, foi comparado o efeito da potência do *laser* sob os erros do sistema de medição. Foi utilizada uma condição de alta potência (0,26 W – 0,12 A e 2,20 V) e outra de baixa potência (0,22 W – 0,10 A e 2,20 V) e os demais parâmetros apresentados na Tab. 18. A Figura 62 apresenta a diferença da intensidade do brilho do *laser* na superfície, resultado de uma variação de 0,02 W. A variação foi realizada através do ajuste fino da corrente possibilitada pela fonte eletrônica conectada ao módulo do *laser*.

Tabela 18 - Parâmetros para avaliação da potência do *laser*.

Zoom da câmera	$\infty$ - 10 cm		
Pintura da superfície	Cor preta fosca		
Macro	Manual – aproximadamente 15 cm		
Distância da câmera até a peça	150 mm		
Distância do <i>laser</i> até a peça	260 mm	270 mm	320 mm
Ângulo	30°	40°	60°

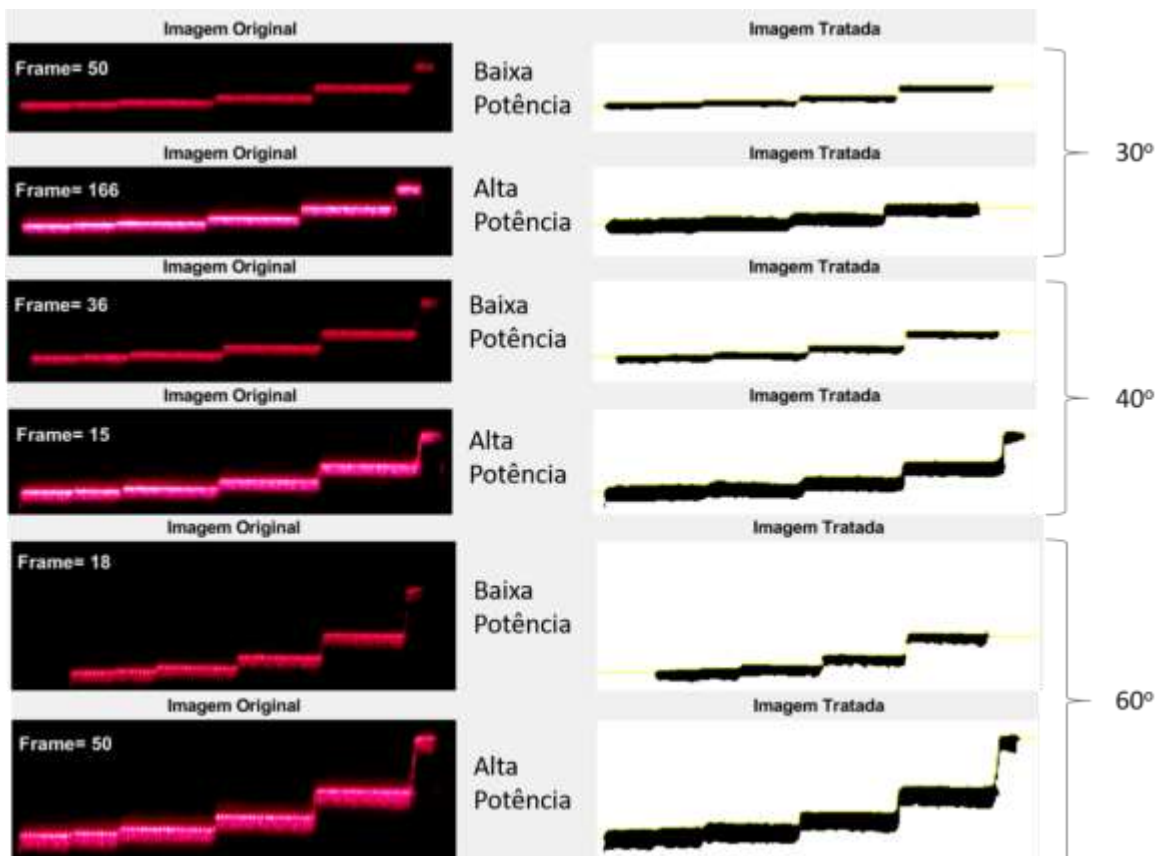


Figura 62 - Intensidade do brilho do *laser* na superfície para as duas condições diferentes de potência.

O uso de uma potência mais controlada (mais baixa) diminuiu a intensidade do brilho do feixe de *laser* sobre a superfície. Em uma análise visual comparando as imagens tratadas da Fig. 62, é possível perceber uma maior uniformidade dos bordos superiores do feixe de *laser* decorrente da menor luminosidade, ocasionando em uma superfície digital com menores imperfeições e oscilações. Este contorno superior requer melhor detalhamento pois é onde o *software* faz a reconstrução virtual.

Os erros expressos nas Tabelas 19 e 20 refletem o que foi visualizado na Fig. 62. Com exceção de  $\Delta H_1$ , todas as demais diferenças entre alturas medidas pelo escaneamento se mantiveram constante ou se aproximaram ainda mais dos valores de referência quando o brilho (potência) foi reduzido. Entretanto, na prática, a redução excessiva da potência do *laser* pode prejudicar o escaneamento na medida em que baixa intensidade de brilho não são captados pelo sistema.

Tabela 19 - Erros absolutos médios para a variação de potência do *laser*.

	30°		40°		60°	
Potência	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa
$\Delta H_1$	0,07	0,09	0,08	0,11	0,09	0,10
$\Delta H_2$	0,02	0,02	0,05	0,03	0,03	0,03
$\Delta H_3$	0,18	0,04	0,07	0,03	0,05	0,04
$\Delta H_4$	0,08	0,03	0,05	0,01	0,03	0,04

Tabela 20 - Erros percentuais médios para a variação de potência do *laser*.

	30°		40°		60°	
Potência	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa
$\Delta H_1$	39,04 %	49,02 %	42,17 %	59,80 %	51,91 %	56,48 %
$\Delta H_2$	9,88 %	13,27 %	27,45 %	18,12 %	18,25 %	16,41 %
$\Delta H_3$	37,25 %	7,44 %	15,34 %	6,19 %	9,55 %	7,31 %
$\Delta H_4$	8,43 %	2,65 %	4,61 %	1,46 %	2,59 %	3,72 %

#### 4.5 Conclusões parciais

A técnica de reconstrução virtual de superfície via escaneamento a *laser* tem alto potencial de aplicação na avaliação qualidade macrogeométrica de peças fabricadas por WAAM e mesmo por outros processos. Os erros sistemáticos verificados são razoavelmente baixos, principalmente

quando avaliadas variações entre picos e vales de 0,98 mm e 0,48 mm, sendo que, para os primeiros, foram obtidos erros de aproximadamente 0,01 mm e 1,46 % em condições específicas. Dessa forma, o sistema de medição possui uma boa exatidão. As Figuras 63a, 63b e 63c apresentam a superfície virtual do gabarito reconstruída para alguns casos.

Conclui-se, por fim, que a velocidade de escaneamento pouco interfere na qualidade da reconstrução virtual da superfície, e que velocidades mais altas podem ser aplicadas para redução de tempo de operação, observando sempre a representatividade do número de *frames* analisados. O aumento do ângulo entre a câmera e o *laser* se mostrou benéfico, limitando-se às condições operacionais dos equipamentos, ou seja, até 60°. É preferível que o *laser* esteja com sua potência controlada em um nível mais baixo, suficiente para sensibilizar o sistema. Também para mitigar o alto brilho superficial, sugere-se que as superfícies em alumínio estejam revestidas na cor preta fosca.

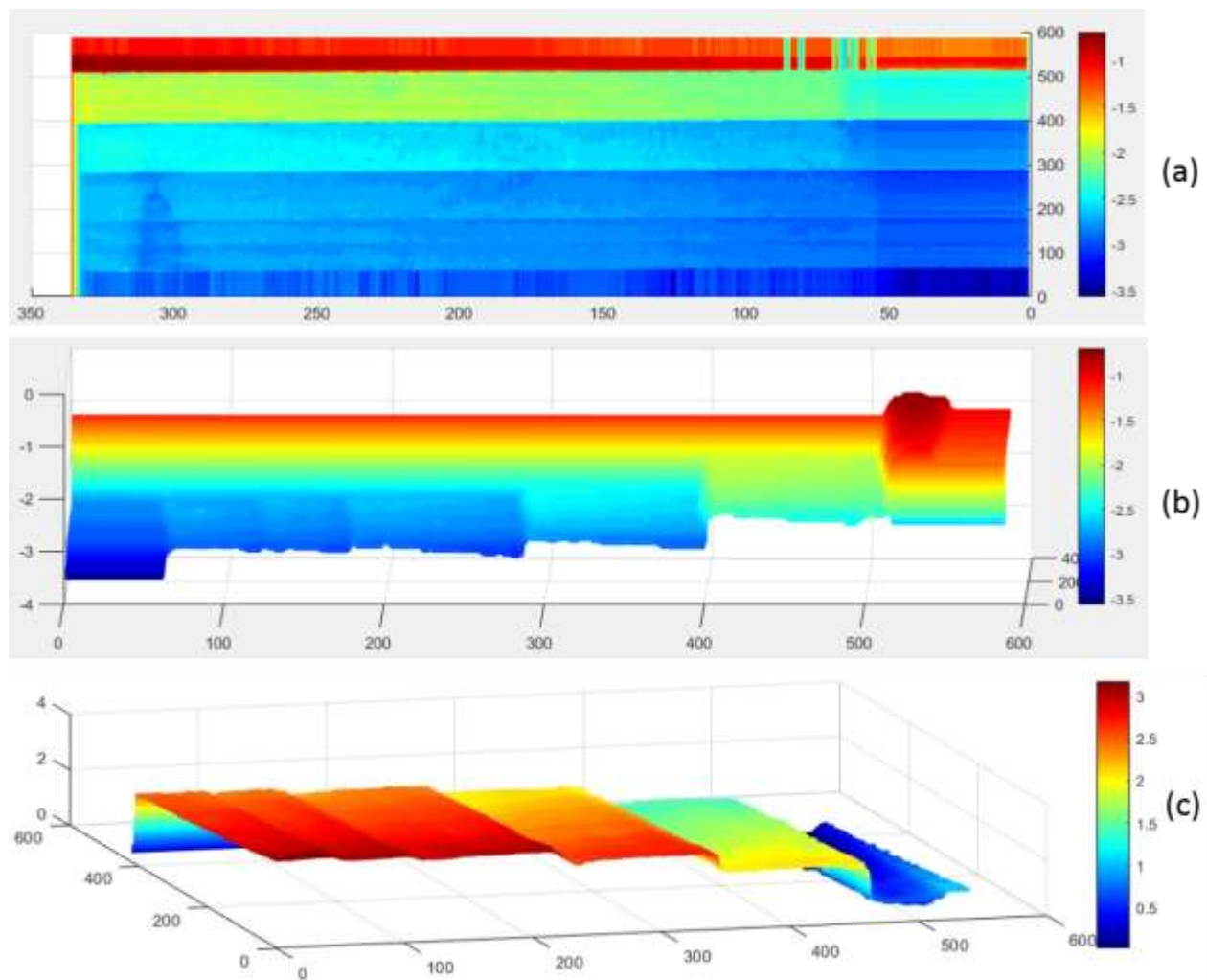


Figura 63 – Escaneamento do gabarito: (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) em perspectiva.

# CAPÍTULO V

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise da geometria

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes à geometria das pré-formas fabricadas sob as diferentes condições de deposição.

#### 4.1.1 Avaliação de altura e largura das pré-formas

Uma medição dos valores de altura e largura das pré-formas foi realizada utilizando o paquímetro digital especificado no capítulo de Metodologia e Equipamentos. Os pontos de medição variaram ao longo do comprimento da estrutura, sendo que os pontos denominados A e C representaram os valores localizados à aproximadamente 15 mm das extremidades. O ponto B buscou avaliar as dimensões da região central. Os gráficos dos valores medidos são apresentados nas Figs. 64, 65, 66 e 67 e 68 e 69 para altura e largura.

De forma geral, a altura das pré-formas na região central (ponto B) apresentou maiores valores quando comparada com os números desta medida para as extremidades. Este fato pode ser justificado pela maior tendência de acúmulo de calor localizado nessas regiões de início e fim de deposição, já que a fonte de calor e de material fundido depositado, ou seja, o arco, rapidamente volta a uma região recém aquecida e depositada. Esta concentração de energia térmica local leva à um maior espalhamento do material fundido nessas regiões, comprometendo a estrutura no seu crescimento vertical.

De forma contrária, as poucas pré-formas com valores de LEWD em 10 mm ou menos apresentaram uma maior uniformidade de altura entre suas regiões centrais e extremas. Com o nível de água mais próximo da poça fundida, a dissipação de calor é maior e mais constante ao longo de todo o processo, tendo assim maior poder sobre as extremidades. Já para as pré-formas sem gerenciamento térmico ativo ou natural, não foi observada regularidade na altura, possivelmente em razão da falta de controle térmico.

Coerentemente, nota-se que a região central apresentou menores valores medidos de largura das pré-formas que as extremidades. Mais uma vez, o acúmulo de calor nas pontas

provoca o alargamento da poça fundida, o que resulta em maiores dimensões laterais nestas posições. A pré-forma 4, que representa a condição mais fria de deposição, foi a peça mais fina entre todas as fabricadas, enquanto a pré-forma 5, representando a condição mais quente, foi a estrutura mais espessa.

As barras de erros apresentadas nos gráficos representam a faixa de repetibilidade do resultado de medição com nível de significância de 95,45 %. O desvio padrão multiplicado pelo fator 2 é utilizado.

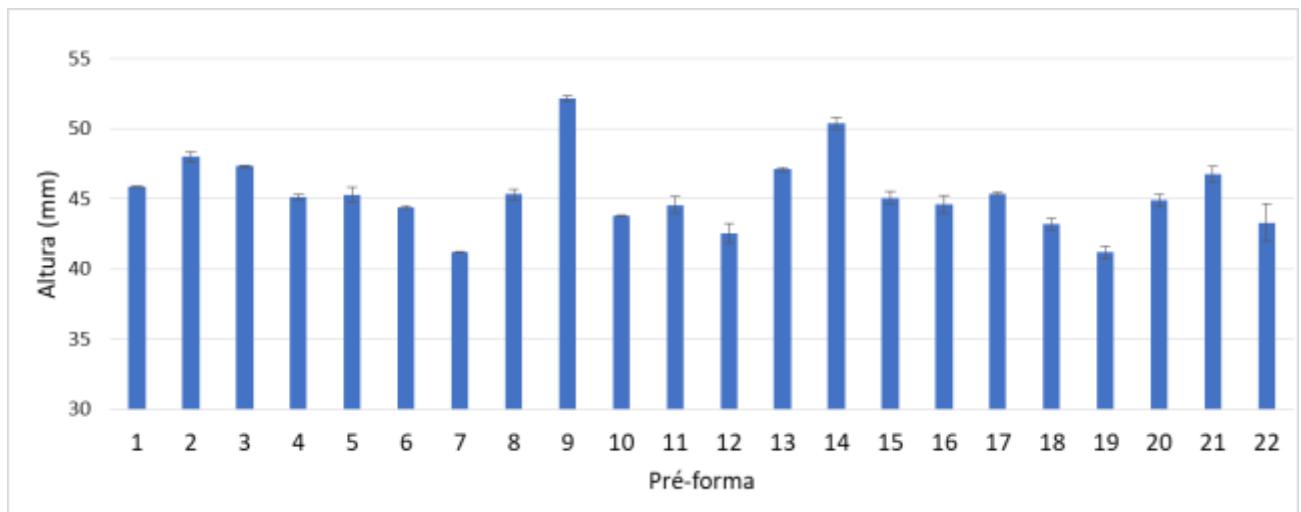


Figura 64 - Valores médios para a altura das pré-formas medida manualmente no ponto A.

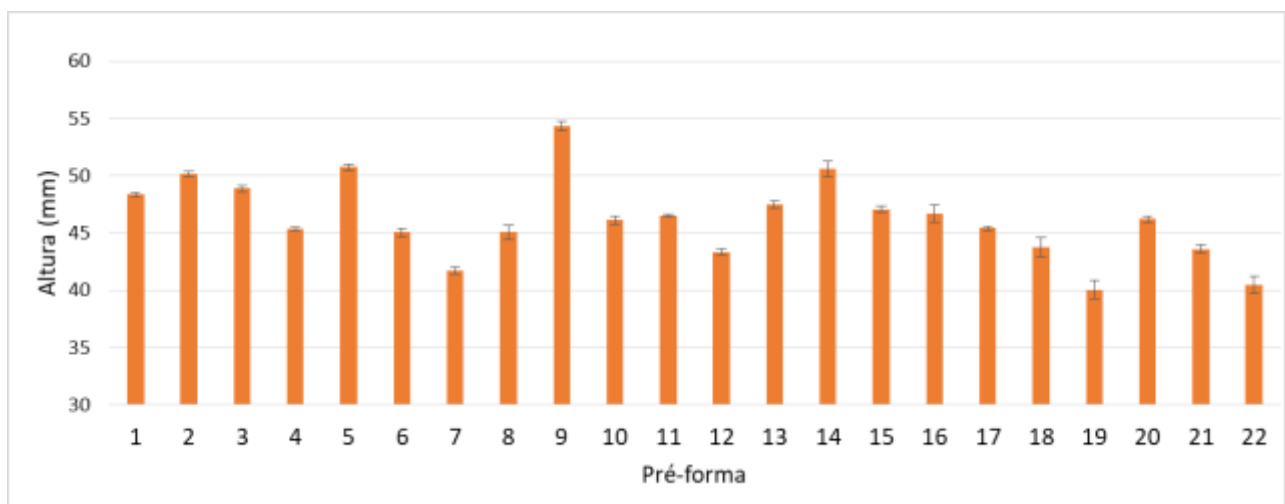


Figura 65 - Valores médios para a altura das pré-formas medida manualmente no ponto B.



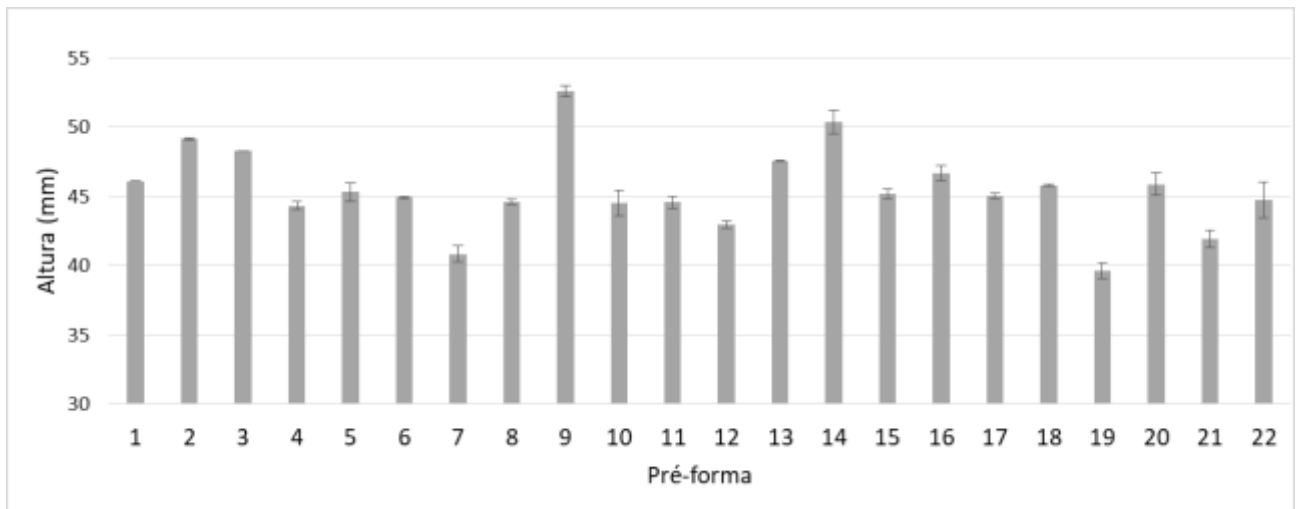


Figura 66 - Valores médios para a altura das pré-formas medida manualmente no ponto C.

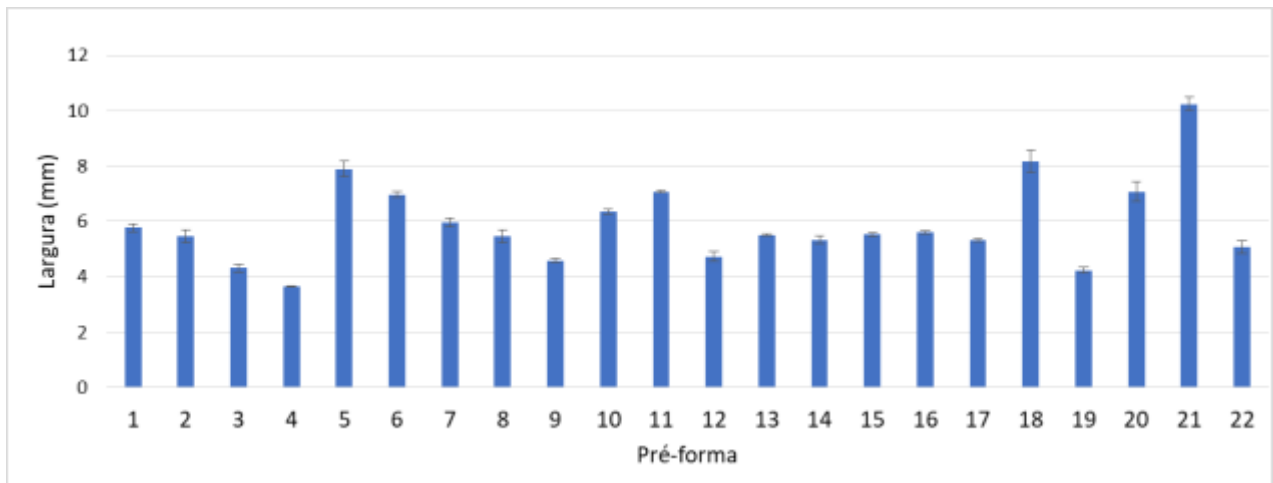


Figura 67 - Valores médios para largura das pré-formas medida manualmente no ponto A.

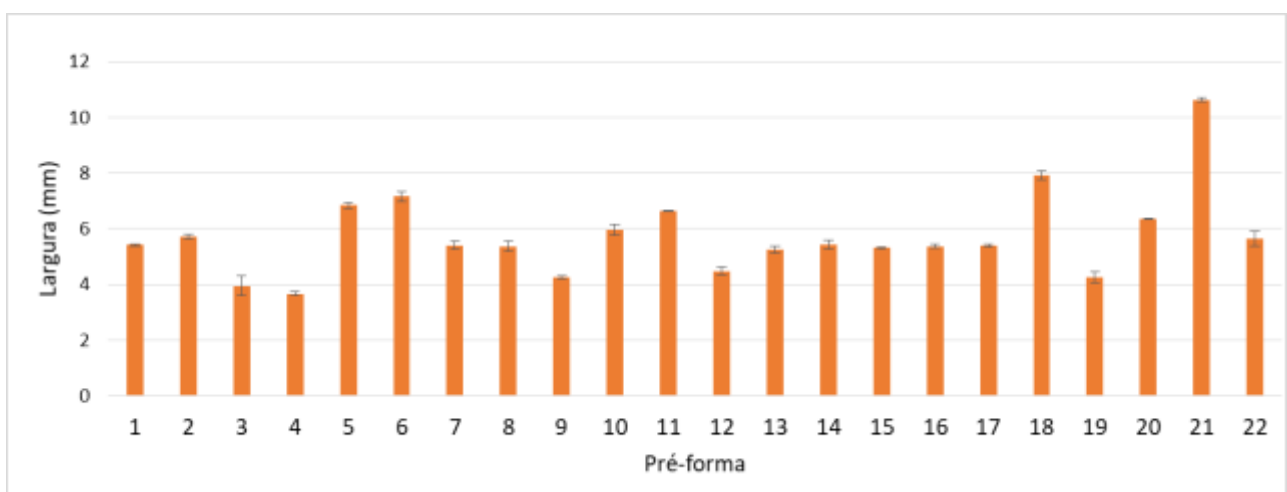


Figura 68 - Valores médios para largura das pré-formas medida manualmente no ponto B.

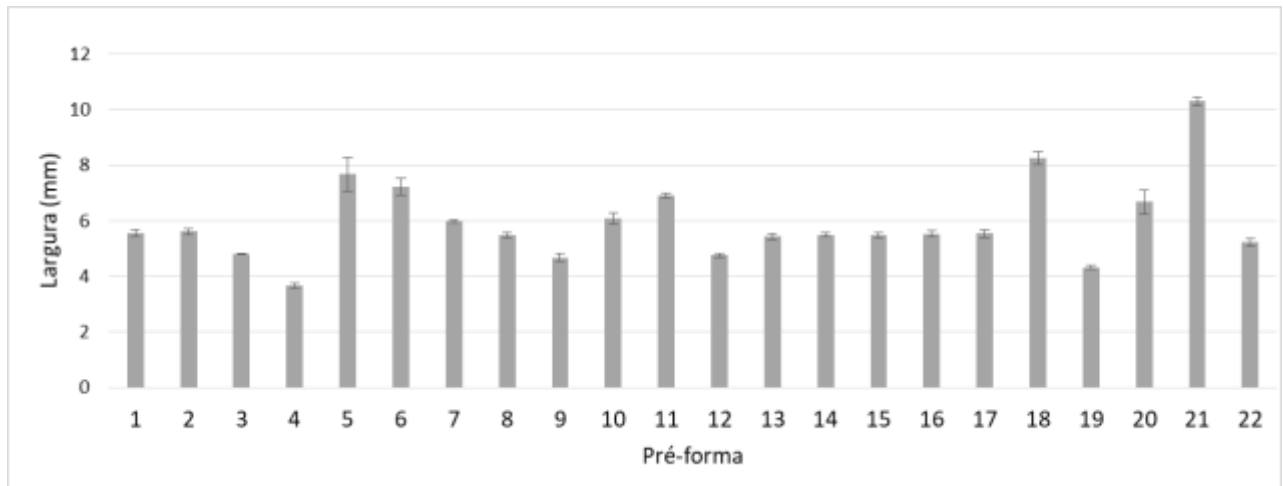


Figura 69 - Valores médios para largura das pré-formas medida manualmente no ponto C.

Comparando as pré-formas com e sem aplicação de gerenciamento térmico, não foi observado um comportamento padrão dentro da variação de altura para a região de extremidade. Entretanto, na região central, as alturas nas paredes com uso do RAQI apresentaram medições maiores, ao passo que as peças com resfriamento natural e sem resfriamento obtiveram valores semelhantes. Este comportamento é verificado na Fig. 70.

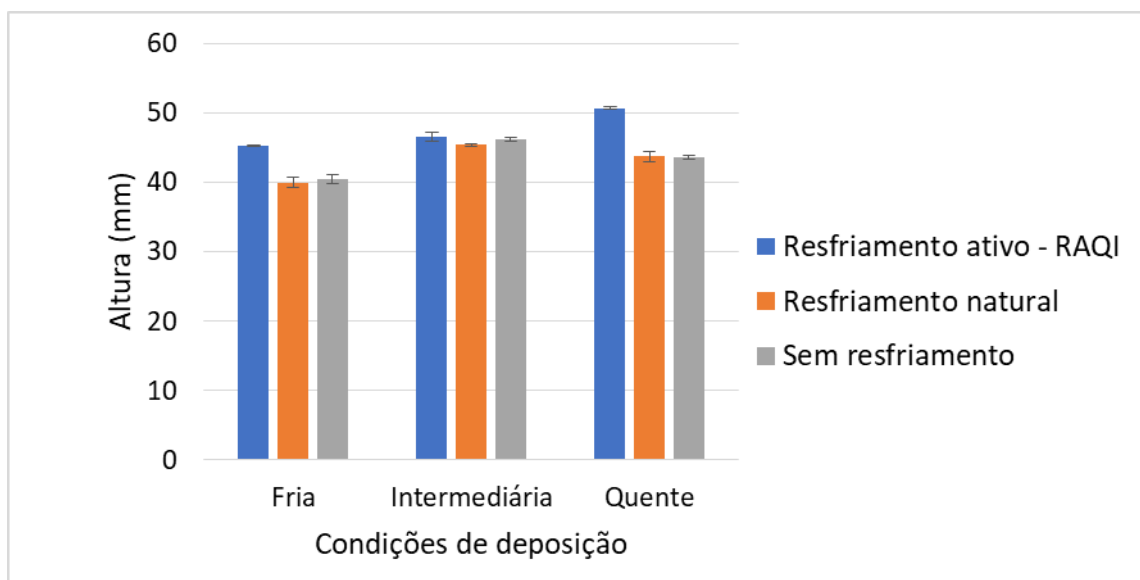


Figura 70 – Comparativo geral de altura da região central para as principais diferentes condições de deposição com e sem aplicação de resfriamento.

Entretanto, os resultados para largura mostraram que as peças sem resfriamento foram as mais afetadas pelo acúmulo de calor ao apresentarem estruturas mais espessas, especialmente para a condição mais quente de deposição, como ilustrado na Fig. 71 para a região central, onde o crescimento desta dimensão foi maior. Este padrão se manteve tanto para as regiões de extremidade quanto para a central. De forma geral, as duas técnicas de gerenciamento térmico levaram a valores de largura da pré-forma similares, sendo que houve uma certa redução neste parâmetro com a aplicação do RAQI. As Figuras 72a, 72b e 72c (condição mais fria), 73a, 73b e 73c (condição intermediária) e 74a, 74b e 74c (condição mais quente) ilustram estas pré-formas comparativas sob vistas frontais e superiores para avaliação visual destes parâmetros discutidos.

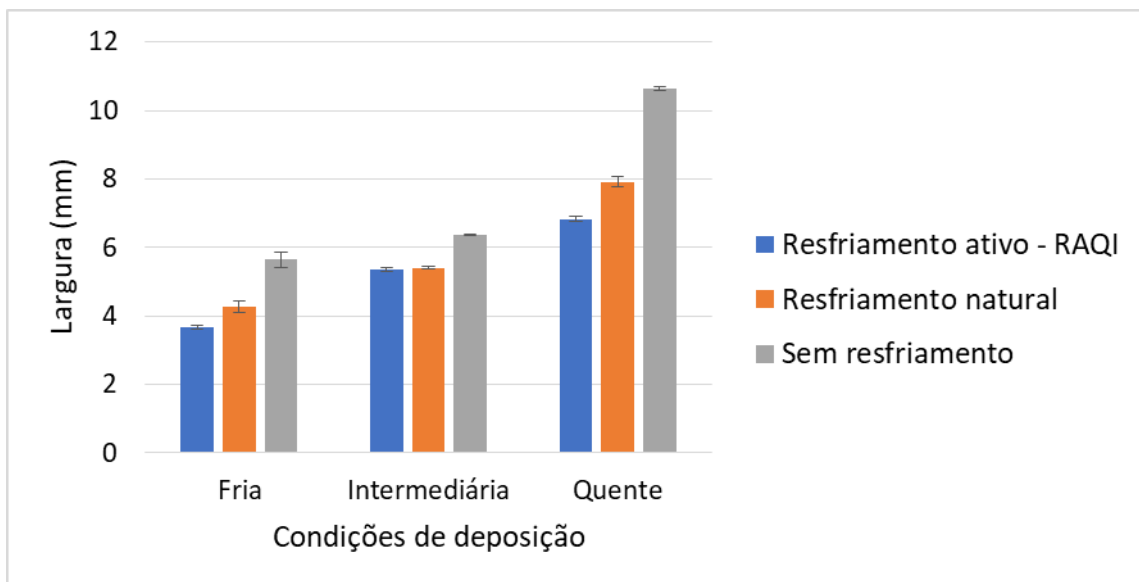


Figura 71 – Comparativo de largura da região central para as diferentes condições de deposição com e sem aplicação de resfriamento.

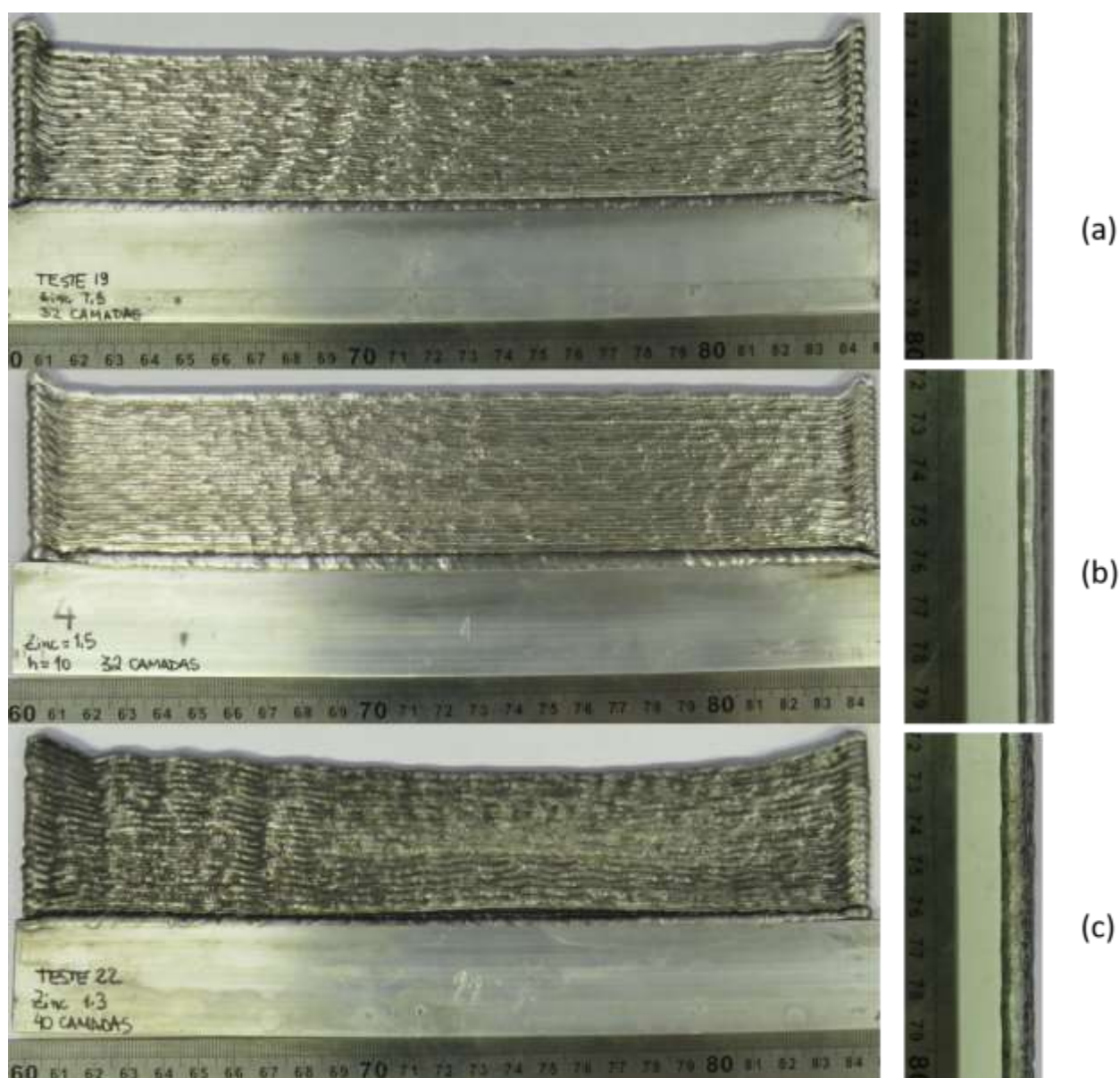


Figura 72 - Pré-formas para a condição de deposição mais fria: (a) com resfriamento natural e paradas (b) com RAQI e (c) sem resfriamento.

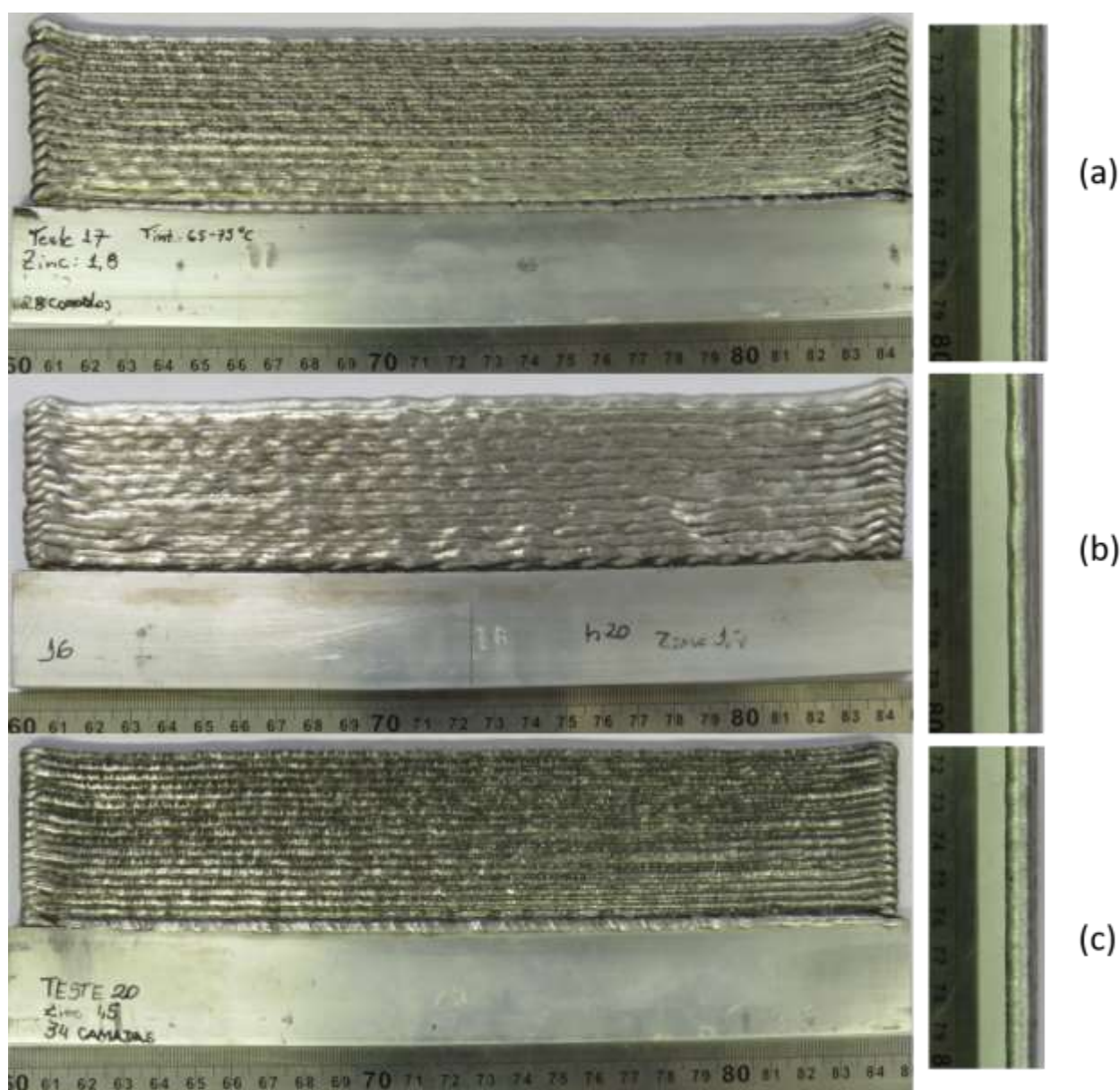


Figura 73 - Pré-formas para a condição de deposição intermediária: (a) com resfriamento natural e paradas (b) com RAQI e (c) sem resfriamento.



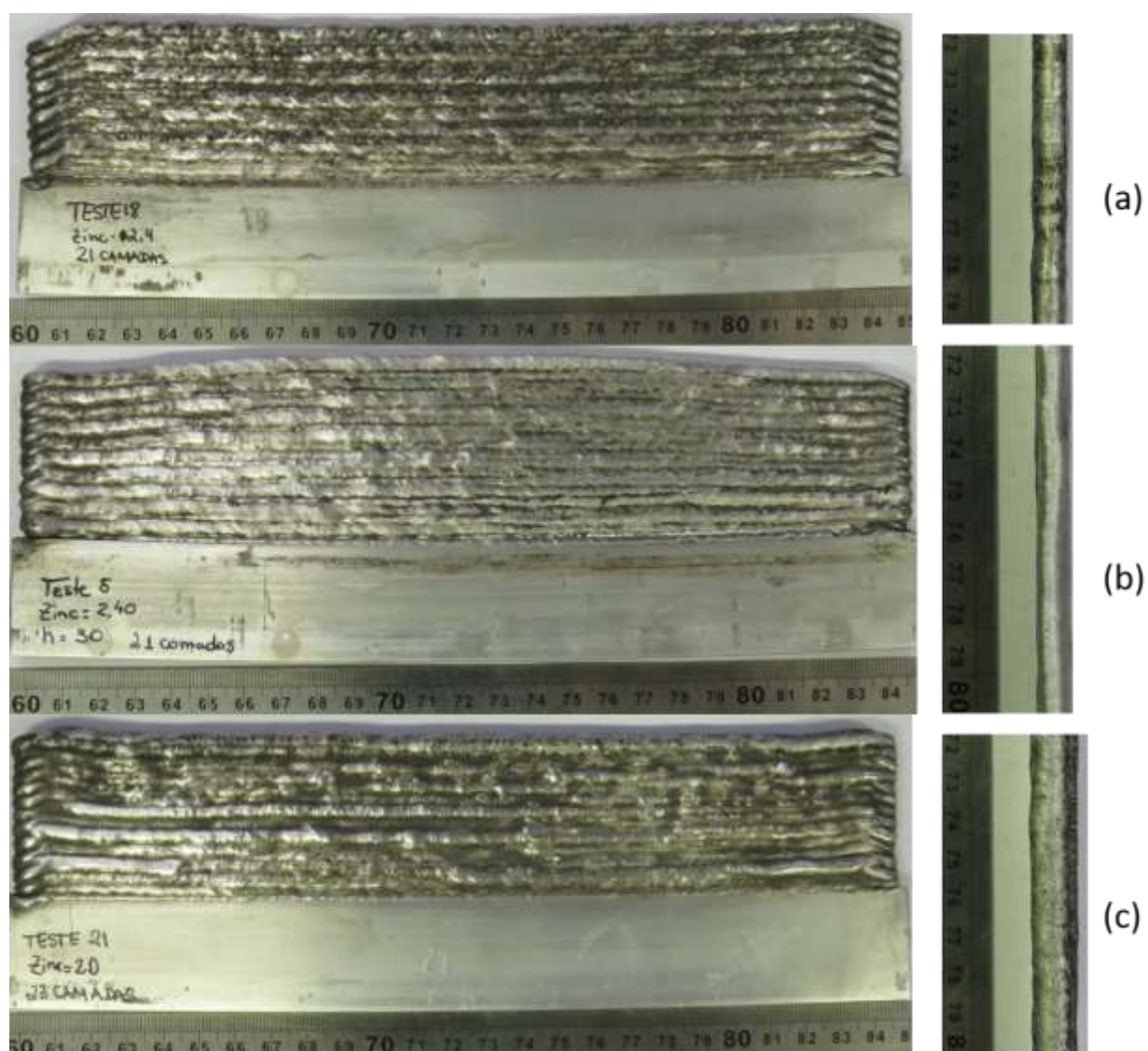


Figura 74 – Pré-formas para a condição de deposição mais quente: (a) com resfriamento natural e paradas (b) com RAQI e (c) sem resfriamento.

Para uma análise estatística, foram utilizados os valores médios de altura e largura do ponto B para todas as pré-formas que fizeram uso do gerenciamento térmico RAQI. Esta região escolhida reflete a característica mais central da pré-forma que é a região de maior interesse de trabalho, com menor acúmulo de calor e menos defeitos. Os ajustes realizados por um *software* estatístico, para um nível de significância de 10 %, obtiveram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de aproximadamente 69 % e 99 % para altura e largura respectivamente. O ajuste mostrou que as variáveis  $V_A$  e  $V_D$  são as que apresentam influência majoritária (linear e quadrática) na altura da região central das pré-formas, conforme apresentado pelo gráfico de Pareto da Fig. 75.

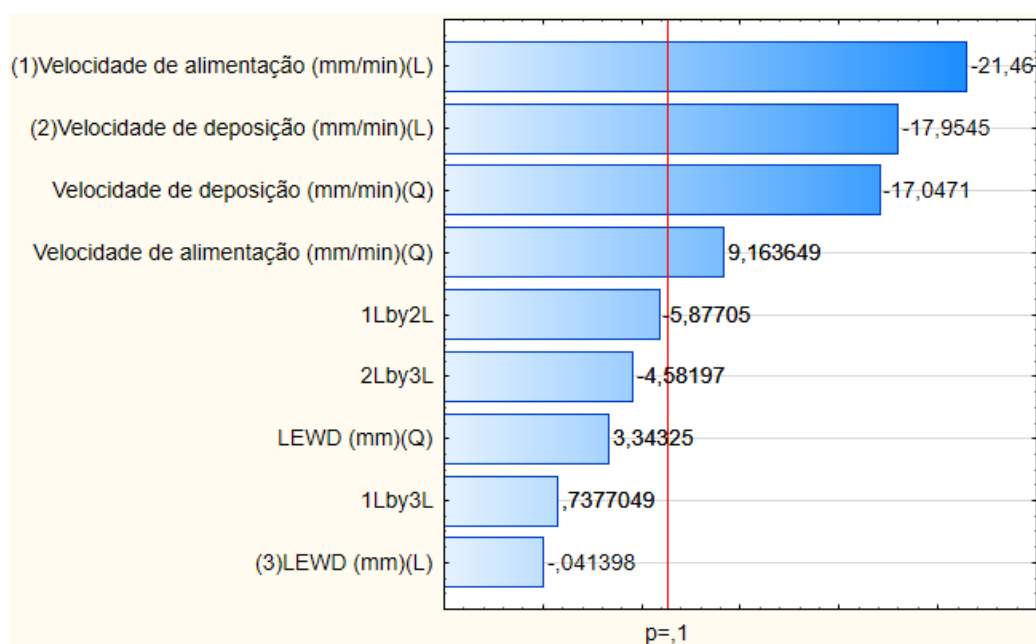


Figura 75 - Gráfico de Pareto para o ajuste da variável altura da região central das pré-formas.

As Figuras 76a e 76b apresentam a superfície de resposta e o perfil de resposta respectivamente para esta análise. Como pode ser verificado, não foi observada uma região específica de máximo ou mínimo do ajuste. A velocidade de alimentação em níveis mais baixos tende a criar estruturas mais altas para uma região central de velocidade de deposição ( $V_D$  entre 400 e 1100 mm/min), o que vai de encontro com o esperado para a análise já que uma menor  $V_A$  leva a menores valores de corrente e menor aporte térmico, criando camadas mais altas e menos colapsadas, até pela menor molhabilidade entre camadas com menores correntes e correspondentes menores aportes de calor. Uma análise similar pode ser feita para a  $V_D$  já que, dentro da faixa estudada, maiores velocidades de deposição levam a um menor aporte térmico.

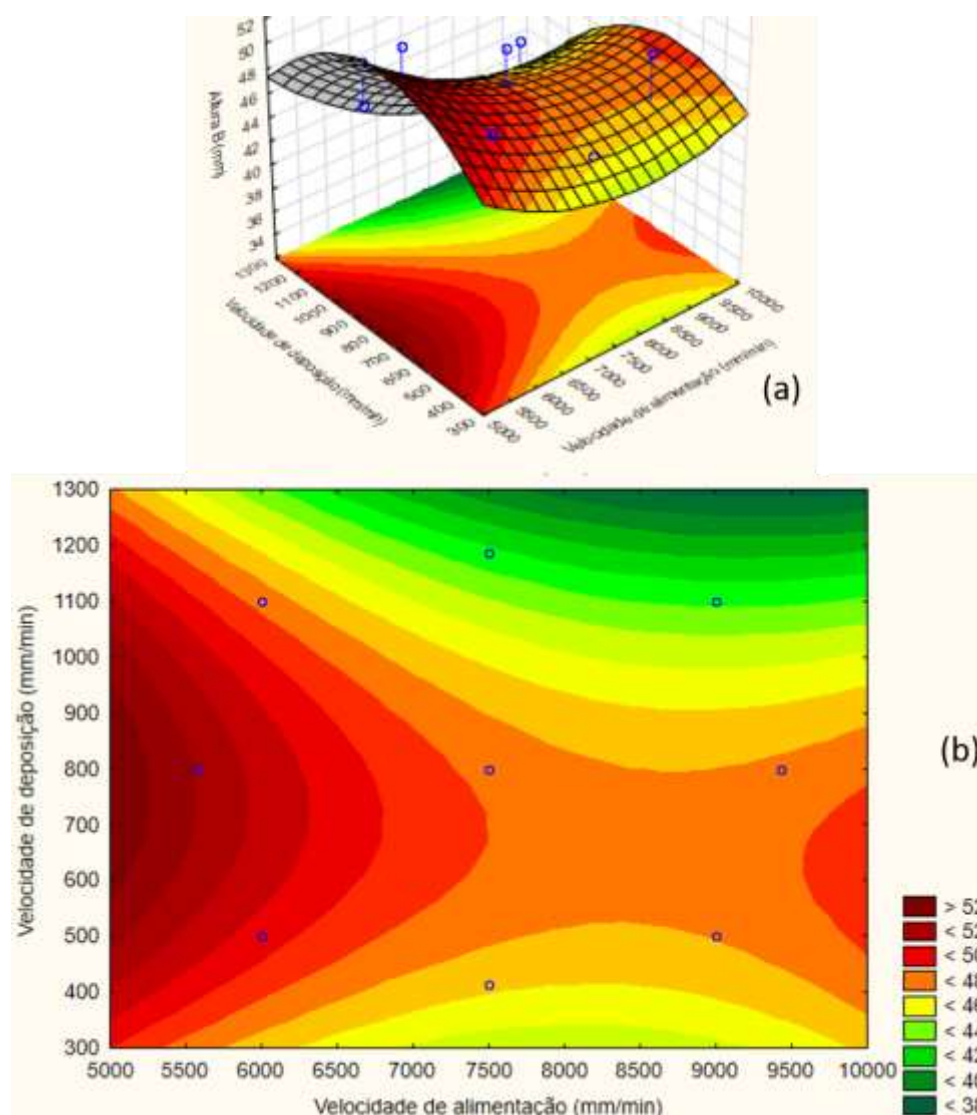


Figura 76 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros  $V_D$  e  $V_A$  sobre a altura da região central da pré-forma.

Para a largura da região central da pré-forma, todos os parâmetros influenciaram no ajuste, conforme apresentado pelo gráfico de Pareto da Fig. 77. Como observado pelas Figuras 78a e 78b, quanto maior foi a velocidade de alimentação, mais largas as camadas depositadas se tornaram. Já pelas Figuras 79a e 79b, quanto maior foi a velocidade de deposição, menor foi a largura verificada nas pré-formas. Estas duas constatações estão diretamente relacionadas com o aporte térmico já mencionado anteriormente, já que este apresenta menores níveis com maiores níveis de  $V_D$  e menores de  $V_A$ . Em relação ao LEWD, houve influência no ajuste, porém pouco perceptível conforme Figs. 80a e 80b.



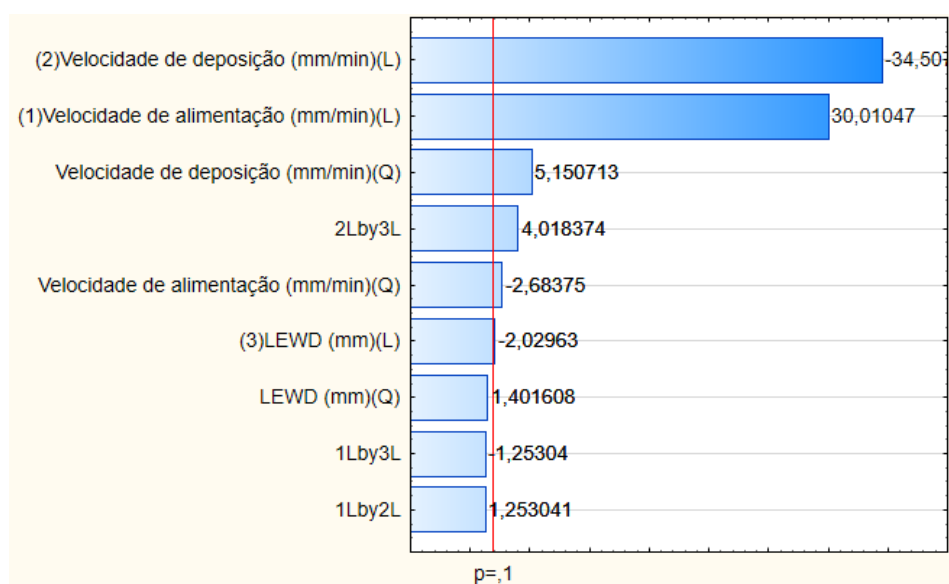


Figura 77 – Gráfico de Pareto para o ajuste da variável largura da região central das pré-formas.

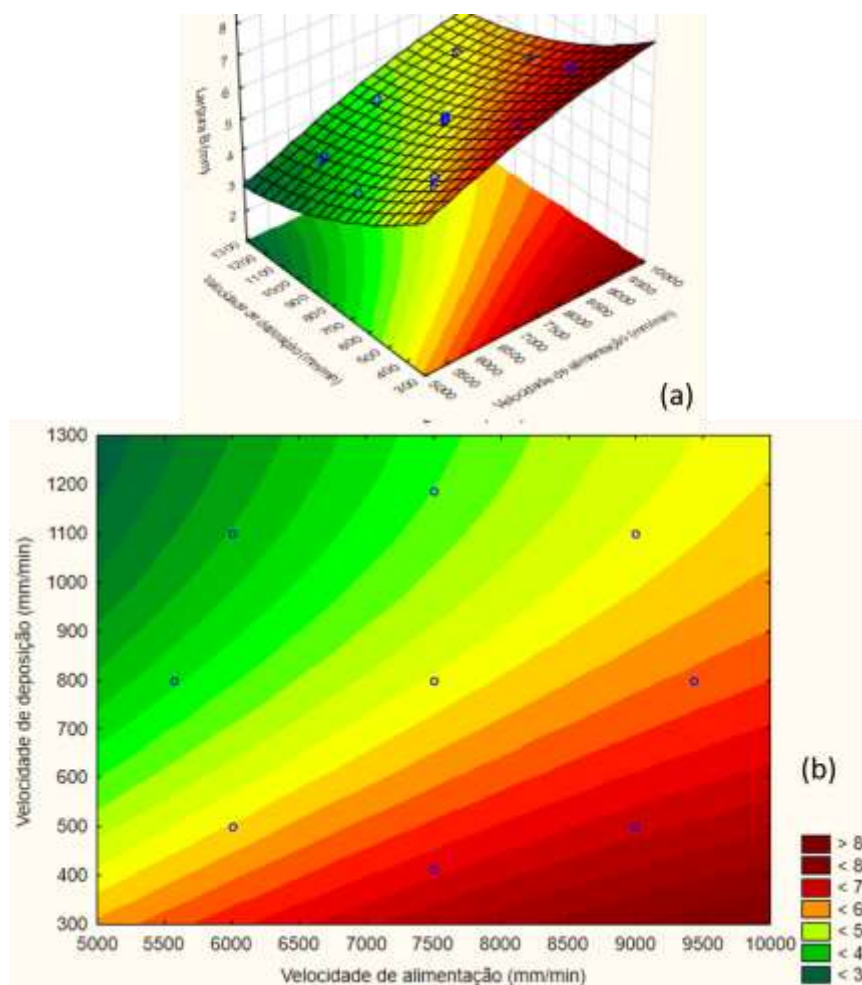


Figura 78 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros  $V_D$  e  $V_A$  sobre a largura da região central da pré-forma.

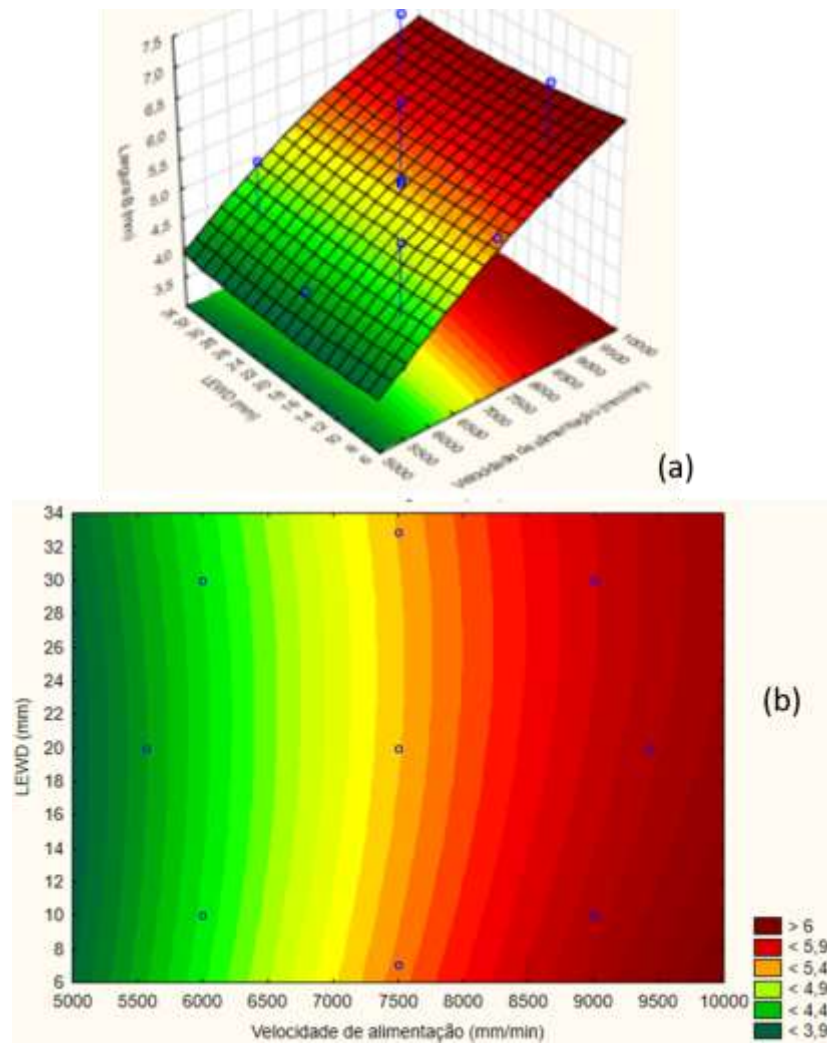


Figura 79 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros LEWD e  $V_A$  sobre a largura da região central da pré-forma.

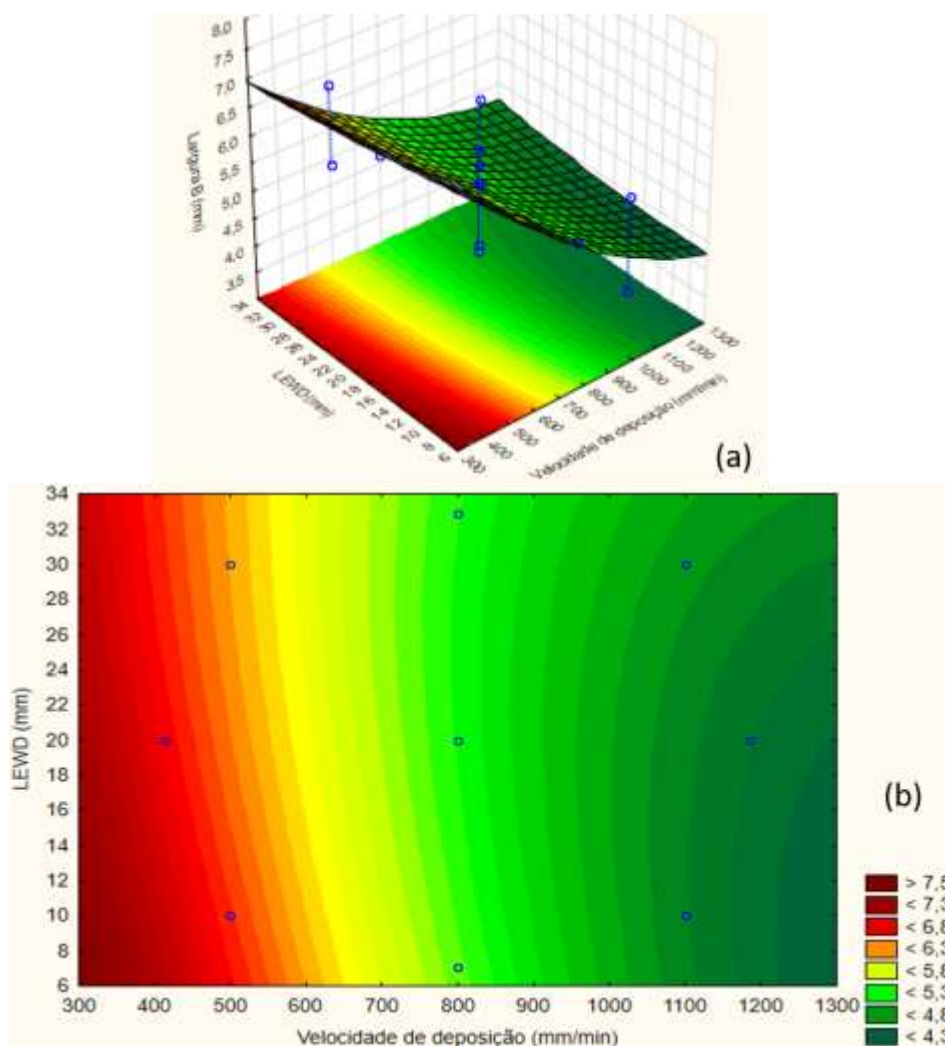


Figura 80 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta para os parâmetros LEWD e  $V_D$  sobre a largura da região central da pré-forma.

#### 4.1.2 Avaliação geométrica via seção transversal

Com os dados dos contornos laterais (superior e inferior pela orientação adotada em função do posicionamento das seções para digitalização) da seção transversal das pré-formas, obtidos via *software* de análise por imagem, foi possível estimar o parâmetro de ondulação ( $W$ ) e de aproveitamento ( $A_P$ ) para as regiões de extremidade e central de cada peça depositada. As Figuras 81a e 81b ilustram, a título de exemplo, respectivamente a condição de menor (corrida 17) e maior (corrida 21) ondulação superficial entre as seções das extremidades analisadas.

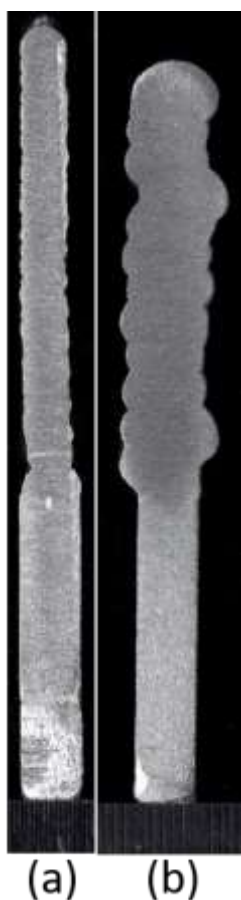


Figura 81 – Seções transversais da extremidade da (a) pré-forma 17 e (b) pré-forma (21) representando um baixo e alto parâmetro de ondulação, respectivamente.

De maneira geral, o parâmetro de ondulação na região central da pré-forma se apresentou ligeiramente menor do que nas extremidades, como observado na Fig. 82. Uma hipótese levantada foi de que a deposição no centro da peça ocorre com os parâmetros já estáveis, diferentemente com o que é notado nas extremidades quando oscilações podem se fazer presentes até que o processo entre em regime em termos de acúmulo e dissipação de calor.

Já o parâmetro de aproveitamento apresentou tendência de maiores valores para a região central quando comparado com as regiões de extremidade de cada pré-forma, conforme Fig. 83. Entretanto, quando levado em consideração os possíveis erros, percebe-se que existe uma possibilidade deste aproveitamento ter sido razoavelmente uniforme entre as duas posições. De fato, esperava-se um aproveitamento maior no meio da estrutura pois trata-se da região mais útil na fabricação de uma possível estrutura.

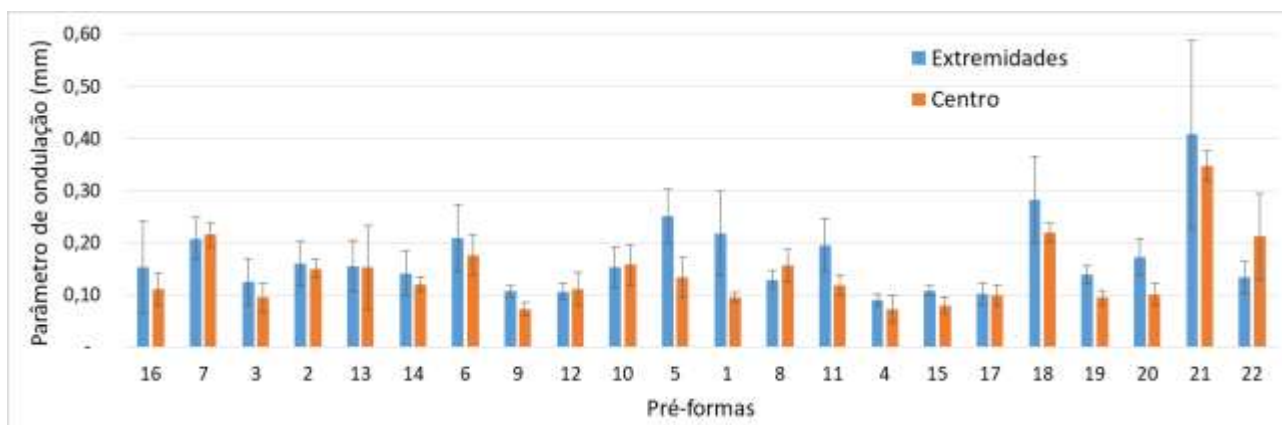


Figura 82 - Comparação do parâmetro de ondulação (mm) entre as regiões de extremidade e central das pré-formas.

Ao comparar as deposições com gerenciamento térmico RAQI e natural com paradas com a condição sem resfriamento, percebeu-se que o parâmetro de aproveitamento se manteve muito próximo do constante, tanto nas extremidades quanto no centro, indicando que tais técnicas não são significantes no comparativo entre quantidade de material final utilizado e quantidade de material depositado. As Figuras 84 e 85 ilustram esta comparação para as condições de deposição mais fria, intermediária e mais quente.

Já a ondulação da pré-forma apresentou maiores valores na condição de deposição mais quente e quando não houve aplicação de técnica de resfriamento, como observado pelas Figs. 86 e 87. Acredita-se que o maior calor imposto no processo combinado com a falta de controle da dissipação mesmo implicou nestas maiores irregularidades. Já para as deposições nas condições intermediária e mais fria, o resultado foi similar.

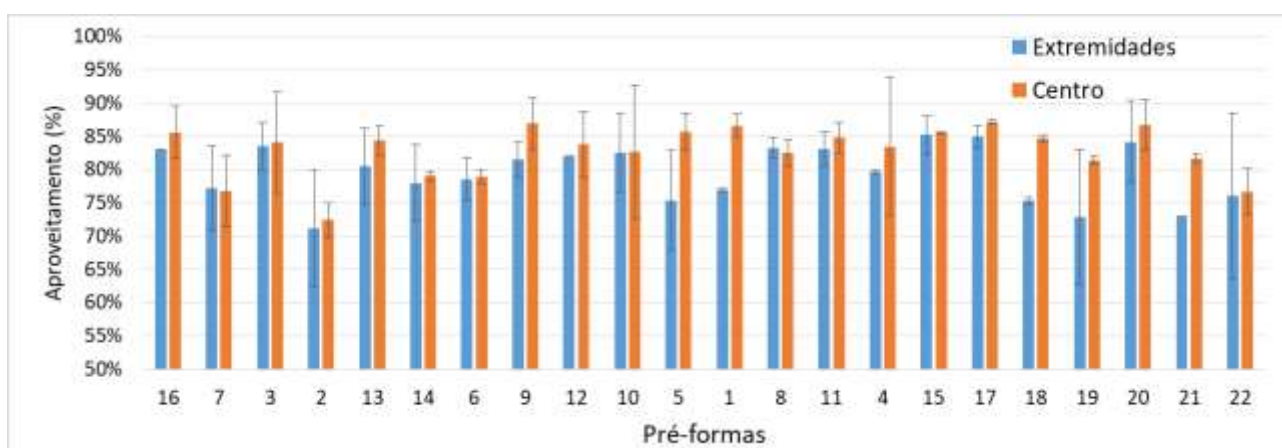


Figura 83 – Comparação do parâmetro de aproveitamento (%) entre as regiões de extremidade e central das pré-formas.

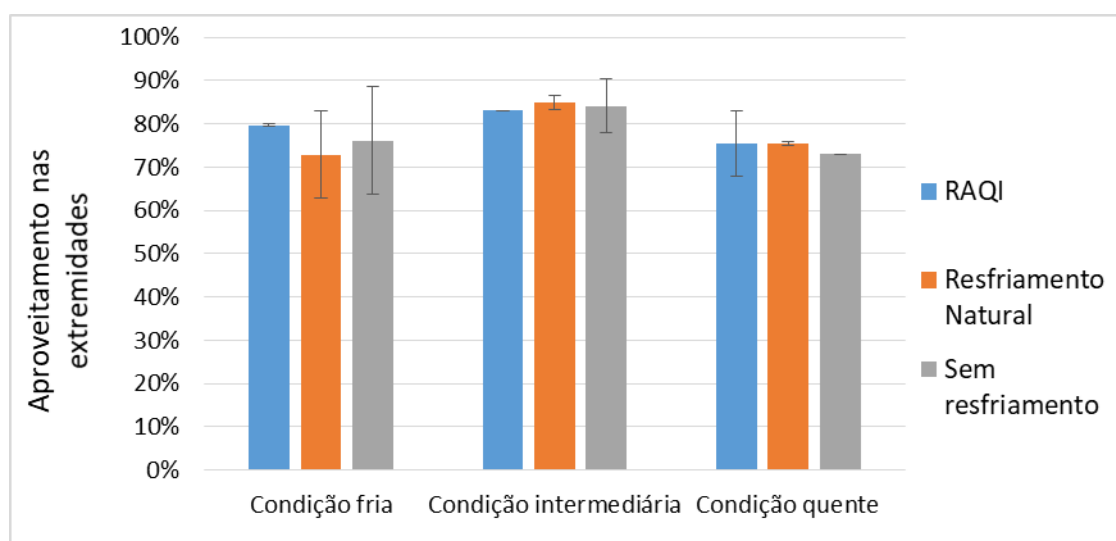


Figura 84 – Comparação do aproveitamento (%) nas extremidades para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico.

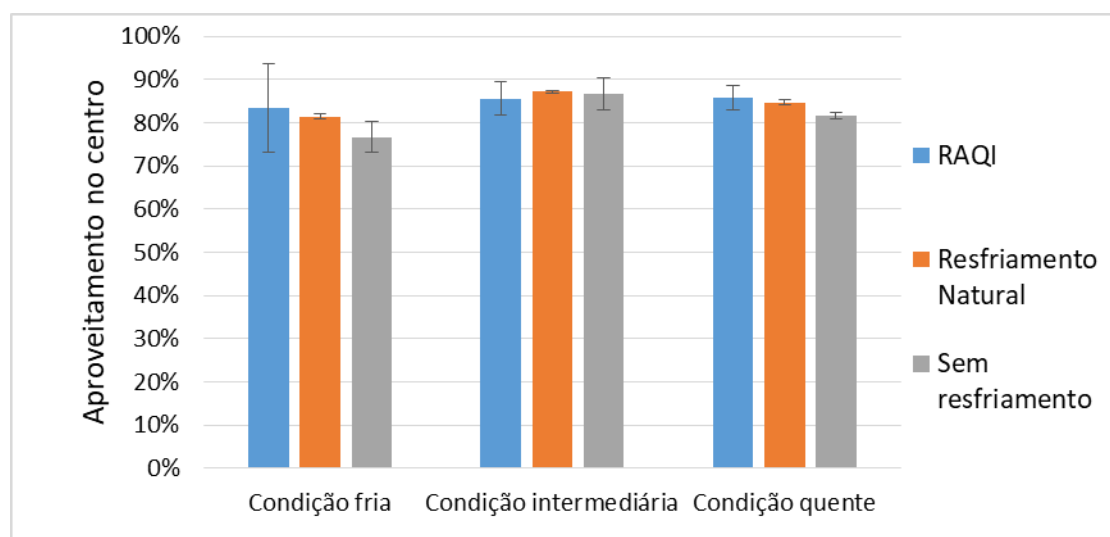


Figura 85 - Comparação do aproveitamento (%) na região central para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico.

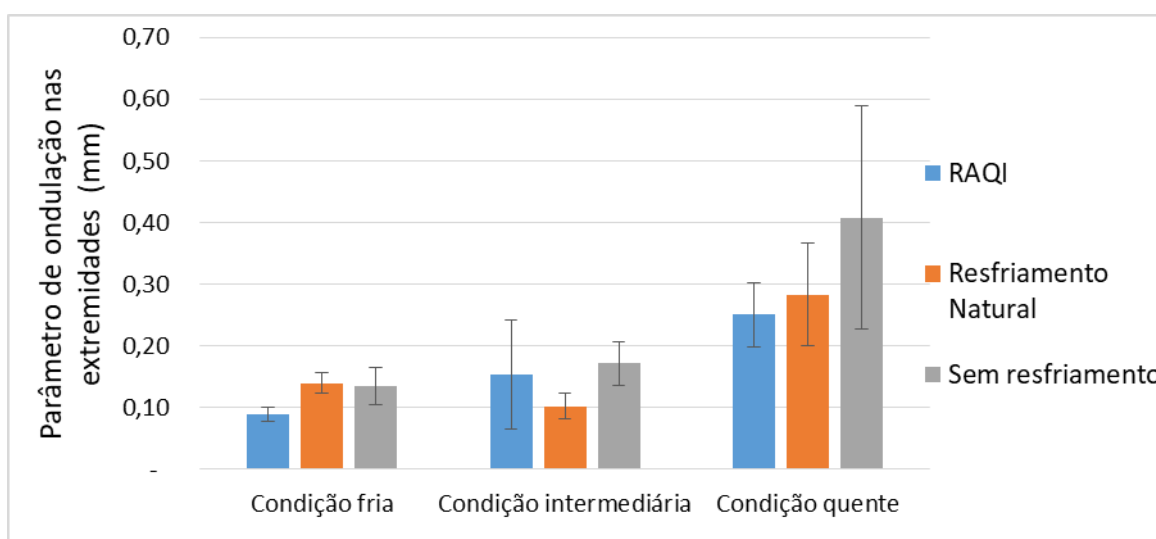


Figura 86 - Comparação do parâmetro de ondulação (mm) nas extremidades para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico.

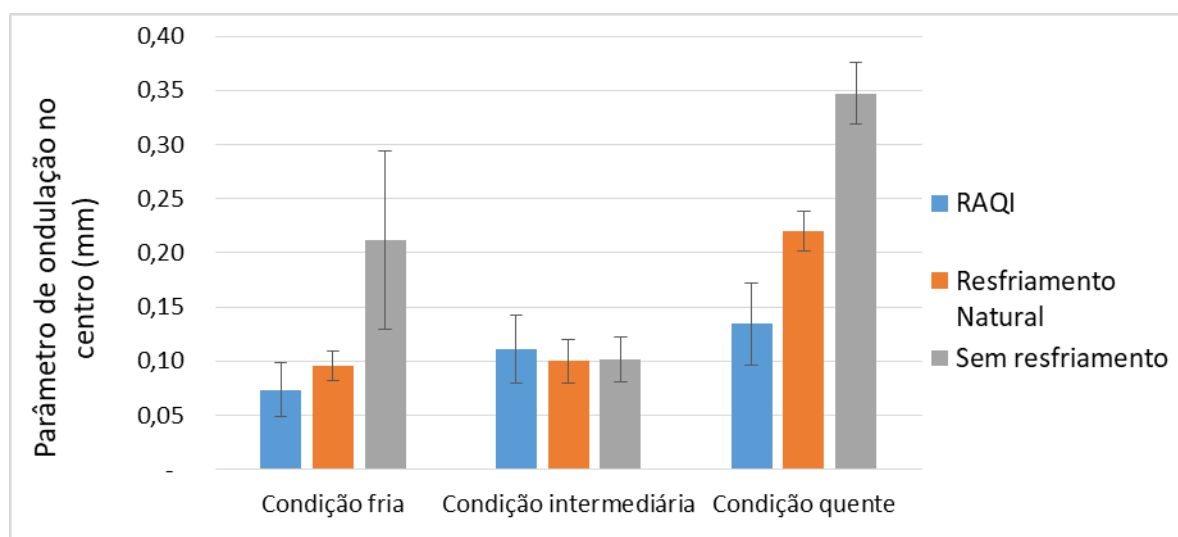


Figura 87 - Comparação do parâmetro de ondulação (mm) na região central para diferentes condições de deposição e técnicas de gerenciamento térmico.

Para as duas regiões de análise, foi realizado um ajuste pelo *software* estatístico com nível de significância de 10 % para os dois parâmetros em estudo. Quando analisado o aproveitamento nas extremidades, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) do ajuste ficou em aproximadamente 80 % e apenas os parâmetros LEWD e  $V_D$ , junto com a interação de  $V_A$  e LEWD, se apresentaram influentes, como observado pelo gráfico de Pareto da Fig. 88. Foi observado que a condição central dos três parâmetros de estudo ( $LEWD = 20$  mm,  $V_D = 800$  mm/min e  $V_A = 7500$  mm/min) tendem a apresentar um melhor índice de aproveitamento do material depositado

nas extremidades, conforme as Figs. 89a, 890b, 90a e 90b ilustram através da superfície e perfil de resposta.

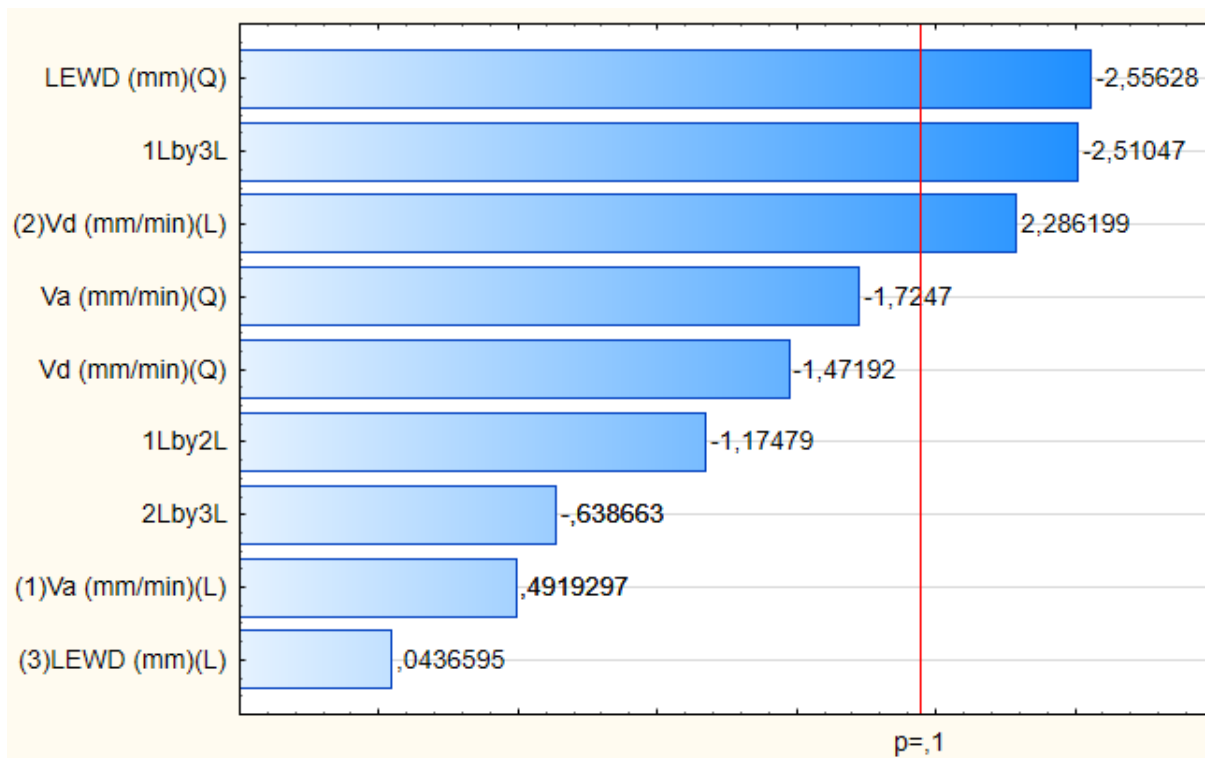


Figura 88 – Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o aproveitamento nas extremidades das pré-formas (%).



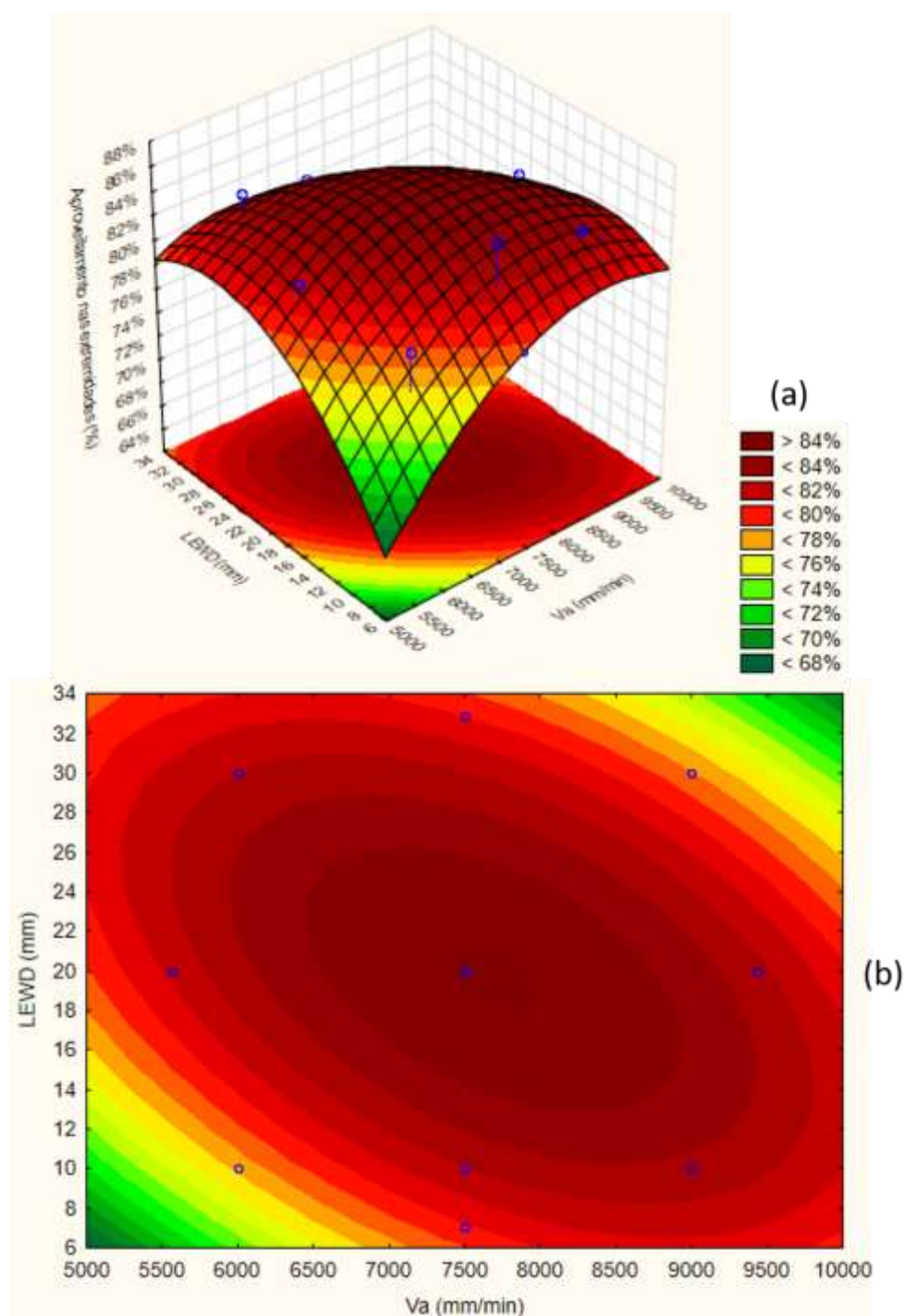


Figura 89 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do aproveitamento nas extremidades em função dos parâmetros LEWD e  $V_a$ .

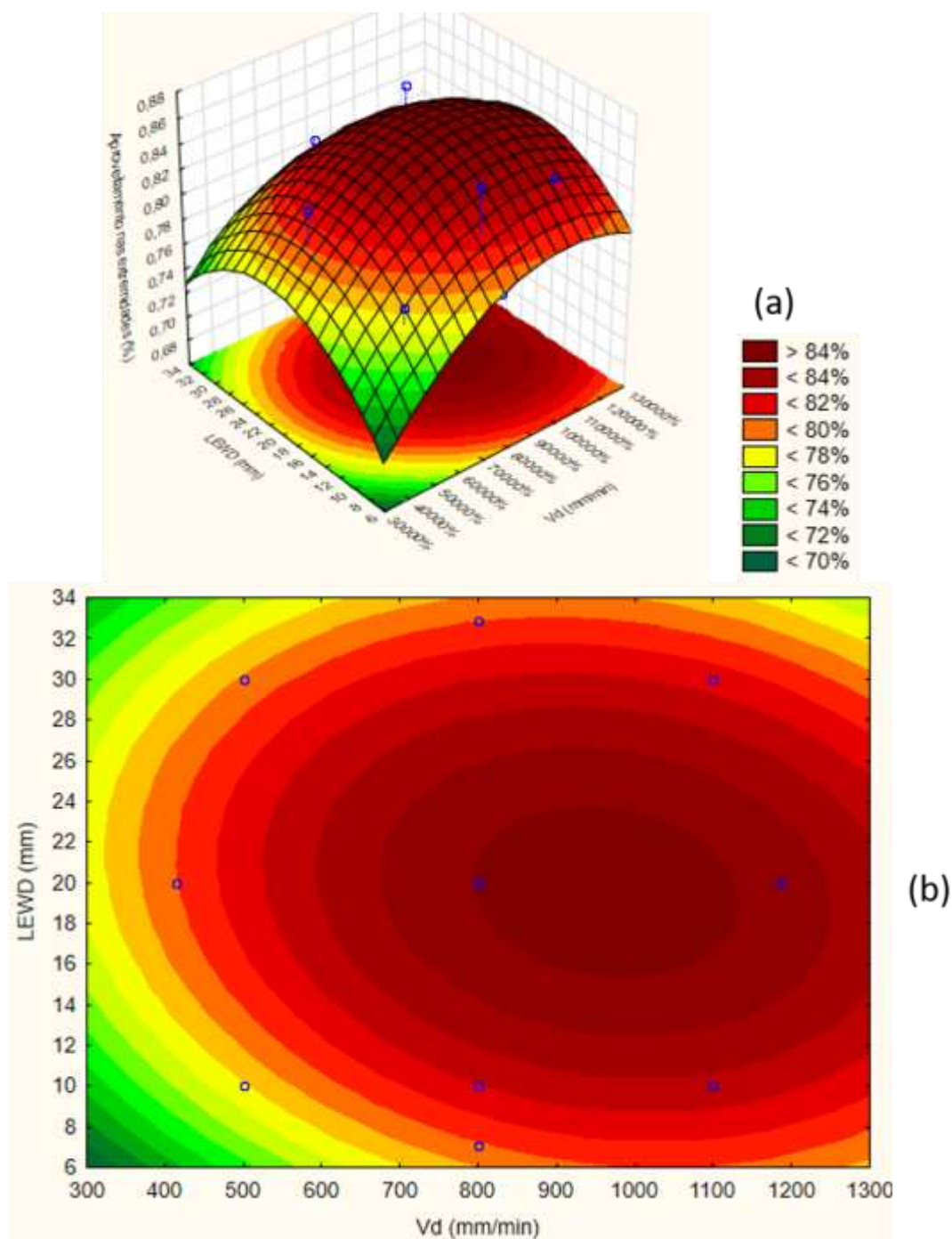


Figura 90 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do aproveitamento nas extremidades em função dos parâmetros LEWD e  $V_D$ .

Ao observar o aproveitamento na região central da pré-forma, o LEWD (linear e quadrático),  $V_D$  (quadrático) e as interações entre todos os parâmetros apresentaram influência sob o ajuste que obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 92 %. Assim como para as extremidades, as condições intermediárias dos parâmetros em estudo apresentaram melhores resultados para a

situação central, como observado na Fig. 91a, 91b e 91c, com uma tendência de maior aproveitamento para  $V_D$  e LEWD levemente mais altos e  $V_A$  mais baixo.

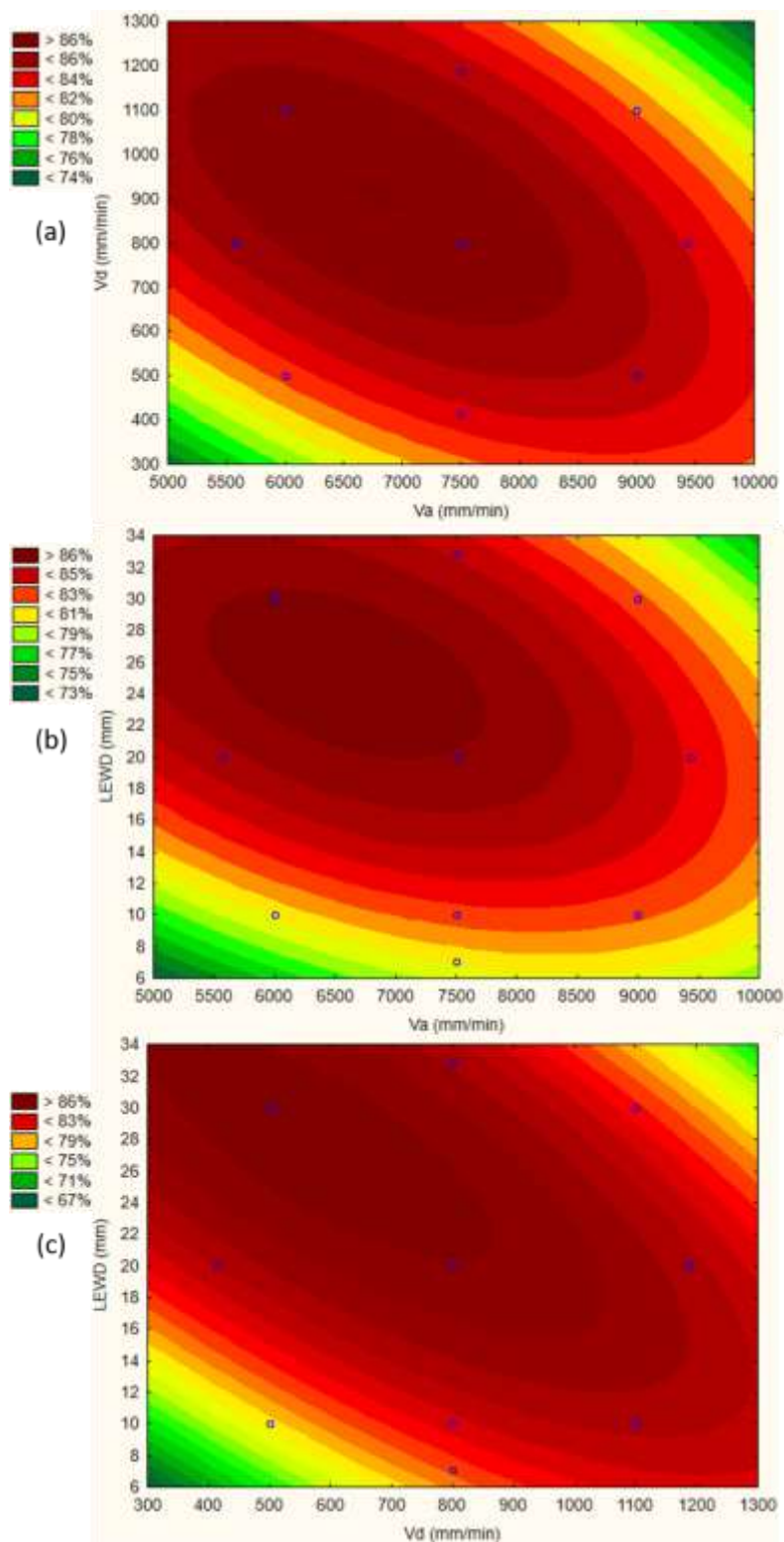


Figura 91 - Perfis de resposta do aproveitamento na região central em função dos parâmetros (a)  $V_A$  e  $V_D$  (b) LEWD e  $V_A$  (c) LEWD e  $V_D$ .

Quando analisado o parâmetro de ondulação nas extremidades, o ajuste com 10 % de significância foi realizado e obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 91 %, onde os três parâmetros em estudo apresentaram influência linear e  $V_D$  também de forma quadrática, conforme Fig. 92.

As Figuras 94a, 94b e 94c ilustra o comportamento da ondulação na região das extremidades em função da variação dos parâmetros. Foi observada uma tendência de aumento no parâmetro de ondulação na medida em que se reduz a velocidade de deposição. Uma menor  $V_D$  implica em maior quantidade de energia imposta por comprimento de deposição, levando à um possível alargamento da poça fundida que implica em desvios geométricos. Da mesma maneira, uma maior  $V_A$  está diretamente relacionada com maior corrente durante o processo. Como a potência é matematicamente representada pelo produto da corrente pela tensão, a taxa de energia imposta nas camadas também se torna maior, retornando aos problemas mencionados anteriormente. O LEWD apresentou um comportamento esperado na medida em que quanto mais perto da deposição, melhor é o resfriamento do processo e conseqüentemente a ondulação é menos afetada negativamente. Entretanto, valores muito baixos deste parâmetro podem tornar a deposição instável e amplificar os desvios geométricos.

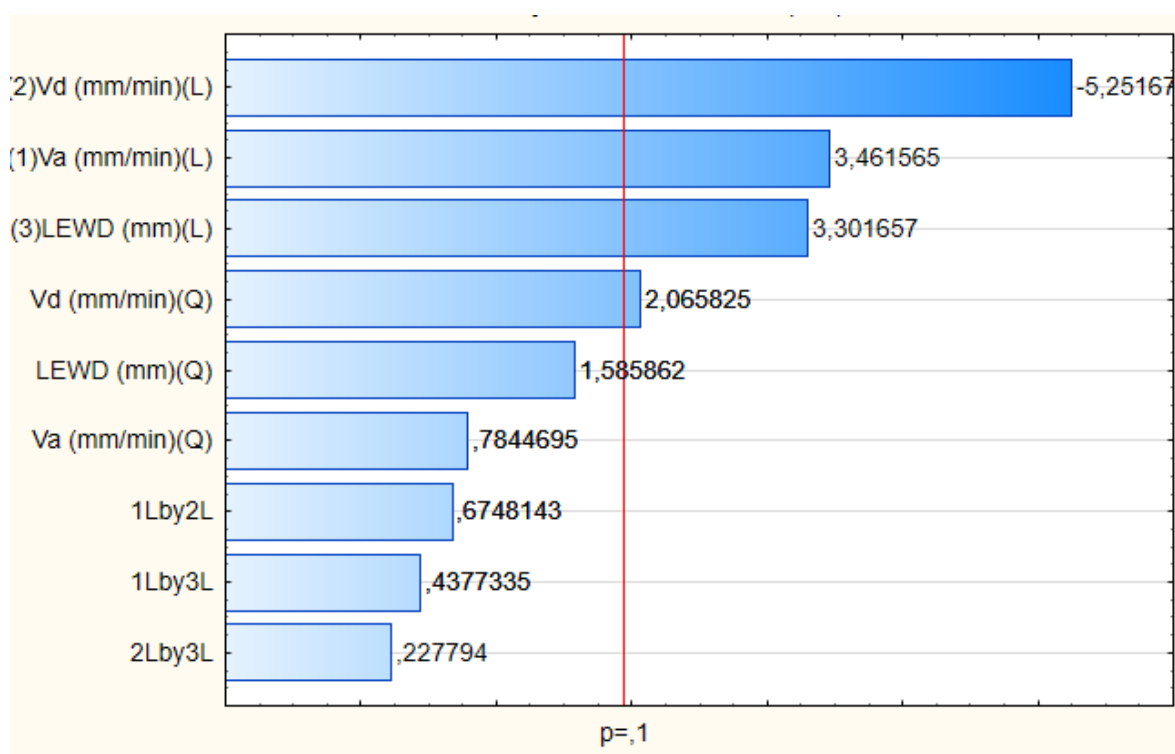


Figura 92 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o parâmetro de ondulação da região de extremidade das pré-formas.

De forma análoga, a ondulação foi analisada para a região central. O ajuste com nível de significância de 10 % foi realizado e obtido um  $R^2$  de aproximadamente 92 %. Neste caso, as variáveis influentes foram  $V_A$  e LEWD, além da interação da  $V_D$  com  $V_A$  e LEWD, conforme o gráfico da Fig. 93. A justificativa para o comportamento de cada parâmetro (Figs. 95a, 95b e 95c) segue o mesmo raciocínio utilizado para a região das extremidades.

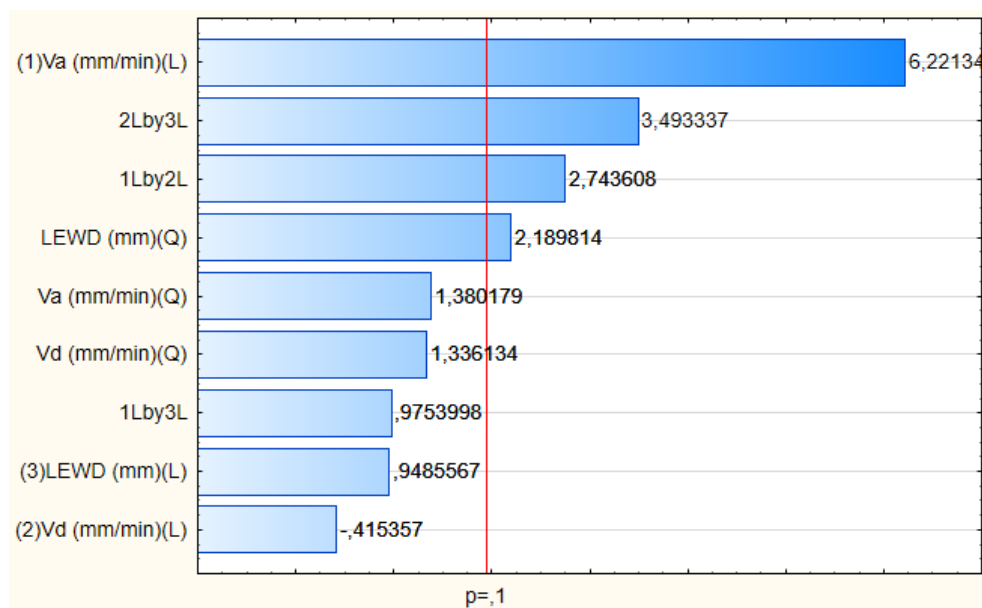


Figura 93 – Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o parâmetro de ondulação da região central das pré-formas.



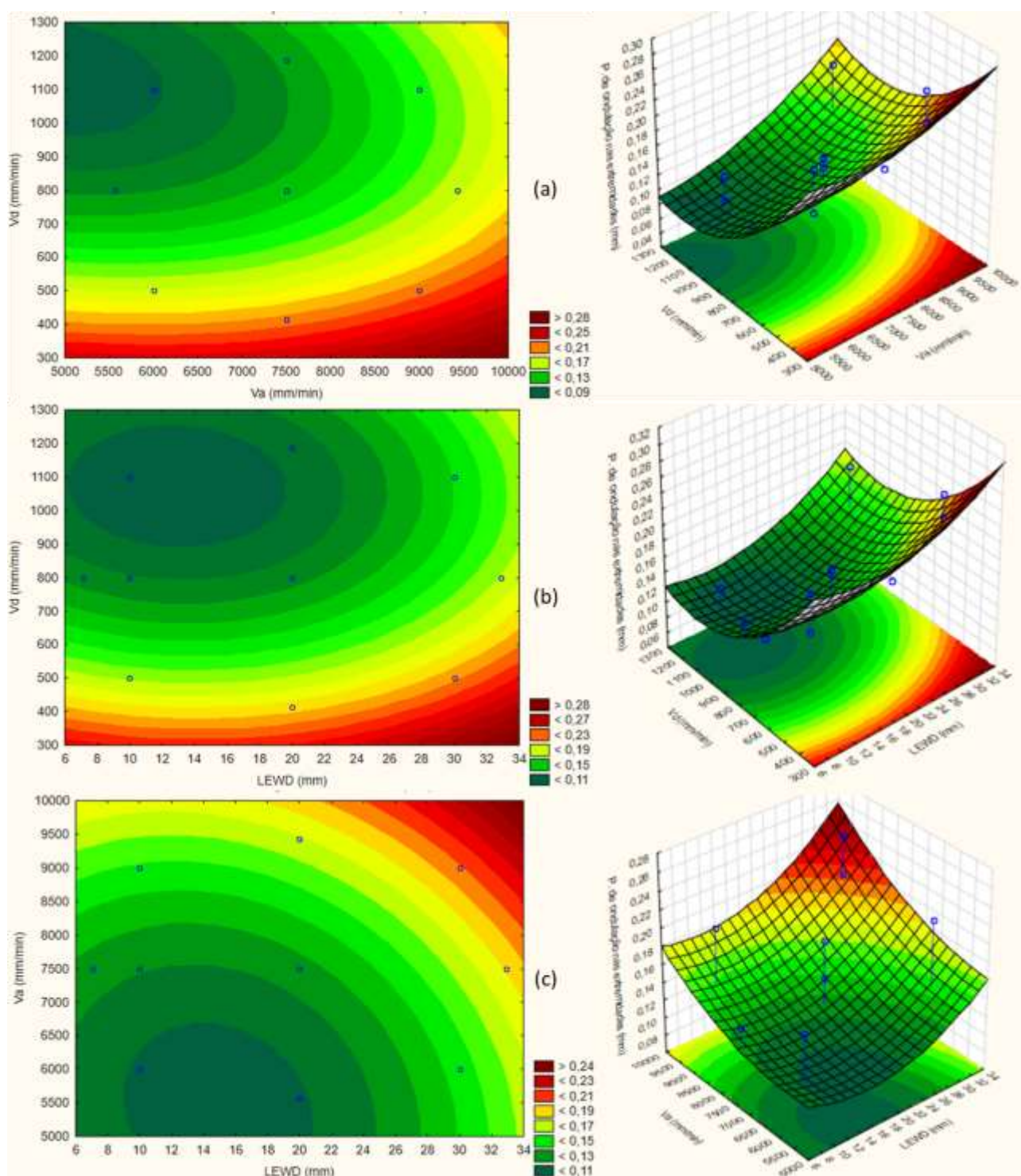


Figura 94 - Perfis e superfícies de resposta do parâmetro de ondulação na região de extremidade em função dos parâmetros (a)  $V_A$  e  $V_D$  (b) LEWD e  $V_D$  (c) LEWD e  $V_A$ .

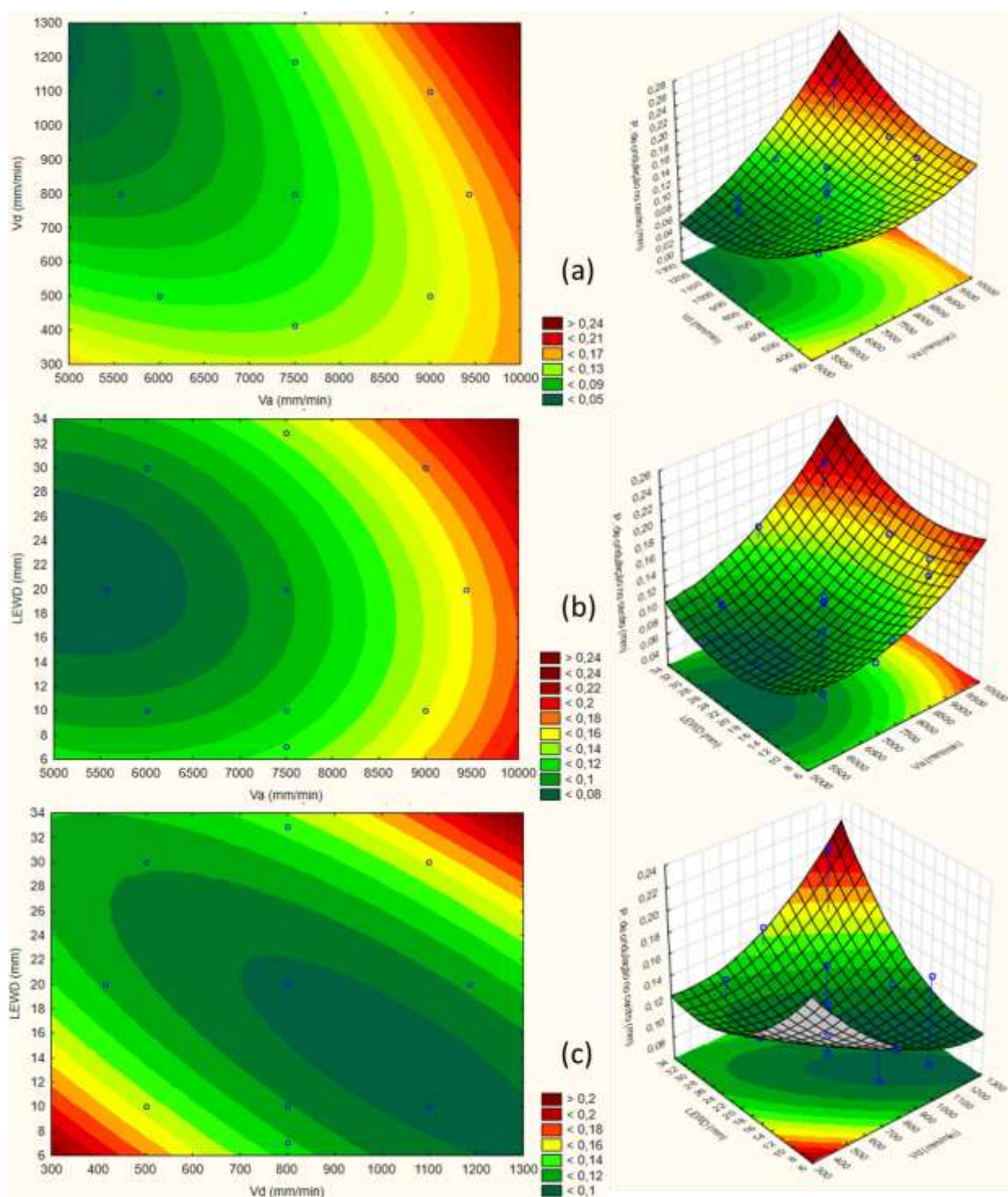


Figura 95 - Perfis e superfícies de resposta do parâmetro de ondulação na região central em função dos parâmetros (a)  $V_A$  e  $V_D$  (b) LEWD e  $V_D$  (c) LEWD e  $V_A$ .

### 4.1.3 Avaliação geométrica via escaneamento

O método de escaneamento foi utilizado para avaliar a geometria das pré-formas. As pré-formas 4, 5 e 16, que são referentes às condições mais quente, intermediária e mais fria, foram analisadas em ambos os lados (frente e verso) para avaliar a representatividade de se examinar as pré-formas por um só dos lados em relação aos dois.

Os resultados médios para o parâmetro de ondulação ( $W$ ), volume mínimo a ser removido (VMR) e espessura mínima de material a ser removida (EMR) são expressos na Tabs. 21 e 22 e nas Figs. 96, 97 e 98 através de gráficos comparativos.

Tabela 21 – Tabela com os resultados médios de  $W$ , EMR e VMR e suas incertezas.

Corrida	$W$ (mm)	Incerteza Expand. (mm)	EMR (mm)	Incerteza Expand. (mm)	VMR (mm <sup>3</sup> )	Incerteza Expand. (mm)
1	0,14	0,02	1,91	0,02	7516,01	72,09
2	0,20	0,01	1,64	0,03	7202,72	52,66
3	0,13	0,01	1,60	0,06	3840,69	34,42
4 frente	0,07	0,02	1,06	0,04	4937,66	59,27
4 verso	0,09	0,01	1,16	0,03	4873,62	23,26
5 frente	0,19	0,02	2,14	0,06	7753,00	30,27
5 verso	0,19	0,02	2,09	0,05	8622,67	41,16
6	0,19	0,02	2,34	0,06	7731,51	36,59
7	0,16	0,02	2,07	0,03	6021,19	32,60
8	0,13	0,02	1,37	0,04	4166,19	44,09
9	0,10	0,01	1,03	0,03	3558,40	75,39
10	0,13	0,01	1,21	0,04	3331,02	53,99
11	0,15	0,03	1,31	0,04	5152,87	54,04
12	0,14	0,03	1,77	0,03	3561,52	42,74
13	0,10	0,01	1,25	0,05	4094,81	30,68
14	0,13	0,01	1,39	0,05	6487,63	47,63
15	0,14	0,01	2,05	0,03	8049,17	58,77
16 frente	0,08	0,01	1,23	0,02	4844,19	51,32
16 verso	0,15	0,02	2,13	0,02	4708,26	88,33



Tabela 22 - Tabela com os resultados médios de W, EMR e VMR e suas incertezas estimadas via escaneamento para as pré-formas comparativas.

Corrida	W (mm)	Incerteza Expand. (mm)	EMR (mm)	Incerteza Expand. (mm)	VMR (mm <sup>3</sup> )	Incerteza Expand. (mm)
17	0,08	0,00	1,06	0,03	2780,25	167,65
18	0,18	0,01	1,53	0,03	3567,44	121,57
19	0,11	0,02	1,24	0,02	3274,93	26,94
20	0,10	0,01	1,05	0,04	3237,76	59,21
21	0,24	0,01	2,41	0,05	5453,31	38,82
22	0,08	0,01	0,82	0,03	2365,14	80,73

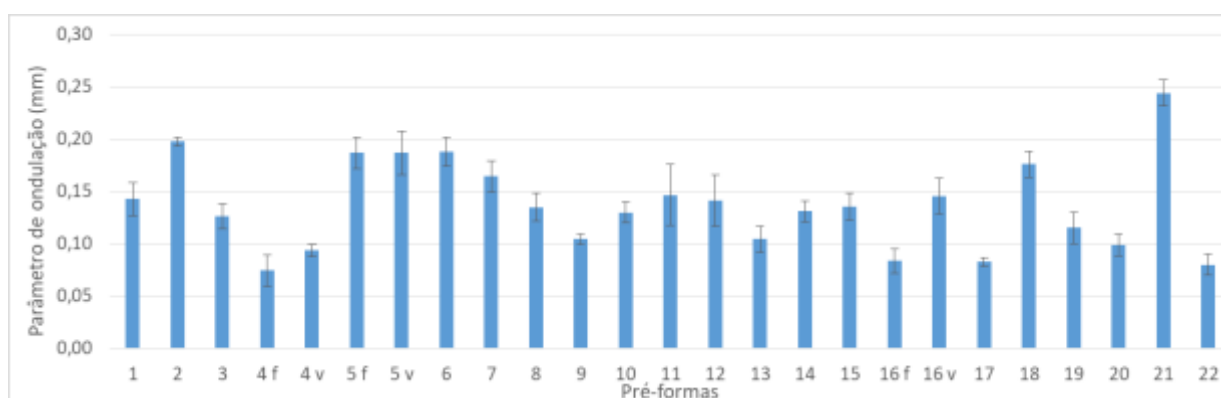


Figura 96 – Gráfico comparativo entre pré-formas para o parâmetro de ondulação e incertezas pelo escaneamento.

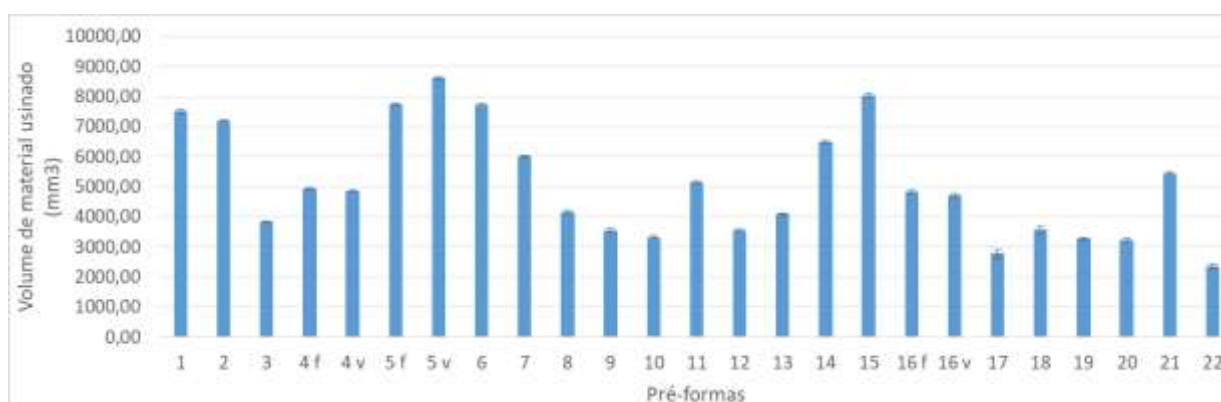


Figura 97 – Gráfico comparativo entre pré-formas para o VMR e incertezas pelo escaneamento.

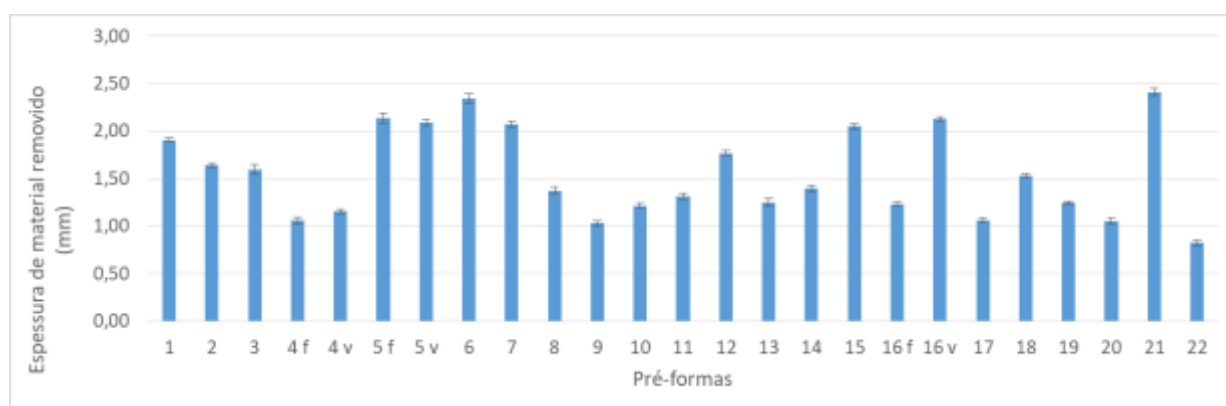


Figura 98 - Gráfico comparativo entre pré-formas para a EMR e incertezas pelo escaneamento.

Foi observado que a condição mais fria (pré-forma 4) apresentou os menores valores para o parâmetro de ondulação ( $W$ ), como era esperado para esta situação de menor energia imposta durante o processo de deposição. Em contrapartida, seguindo este raciocínio, a condição mais quente (pré-forma 5) foi a que apresentou maiores valores de ondulação e EMR.

Foi realizada uma comparação entre os valores do parâmetro de ondulação obtidos pelas duas técnicas de análise por imagens (via seção transversal e escaneamento) para as condições mais fria, intermediária e mais quente, de forma a verificar sua correlação. Os resultados são expressos na Fig. 99. Foi observado que os resultados são mais próximos nas pré-formas 4 e 16 que representam respectivamente as situações de menor e intermediário calor imposto na deposição, sendo que houve certa discrepância para o processo mais quente, o que provavelmente está relacionado às maiores variações de forma para esta condição. Vale ressaltar os menores desvios nas medidas feitas com escaneamento, o que torna essa forma de medição mais adequada, até pela representatividade de toda a pré-forma, mesmo que de um lado só. Pelos resultados gerais, sugere-se investir na montagem virtual de todo o volume depositado, pela combinação das duas superfícies, para então calcular os parâmetros de qualidade de forma, e até de aproveitamento, levando em consideração toda a pré-forma (ambos os lados).

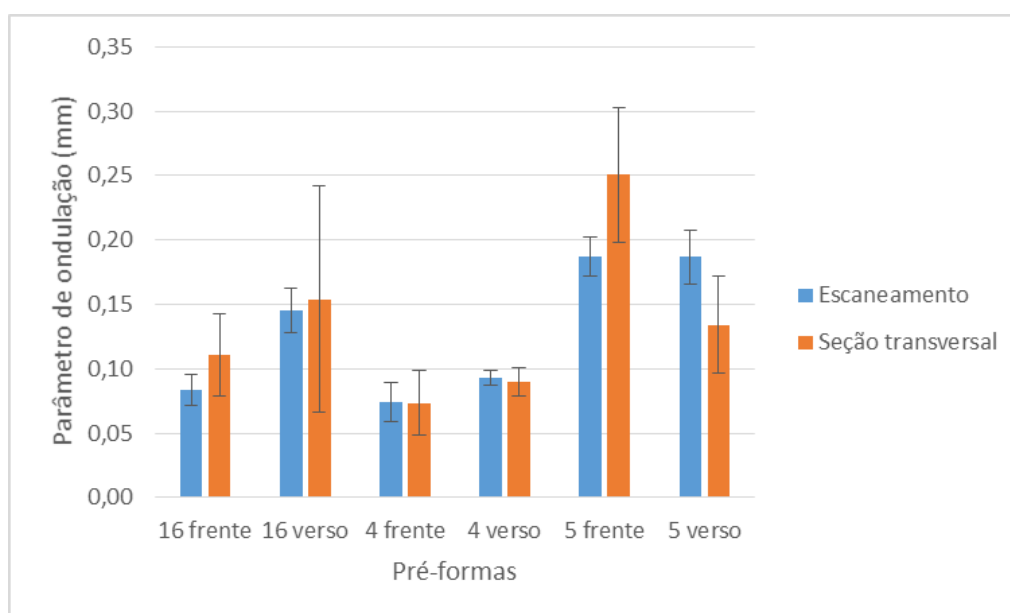


Figura 99 – Comparação entre os métodos via escaneamento e análise de seção transversal na avaliação geométrica.

Para estas mesmas condições de deposição, foi avaliada a influência do gerenciamento térmico sobre o parâmetro de ondulação e na espessura mínima de material a ser removido. As Figuras 100 e 101 apresentam os resultados em forma de gráfico. Observou-se que o processo sem resfriamento foi negativo apenas na condição mais quente de deposição, mantendo um comportamento semelhante às técnicas com resfriamento (RAQI e natural) nas duas outras condições. Sendo assim, se reforça que o alto calor imposto em um processo requer um controle térmico para se obter desvios geométricos menores.

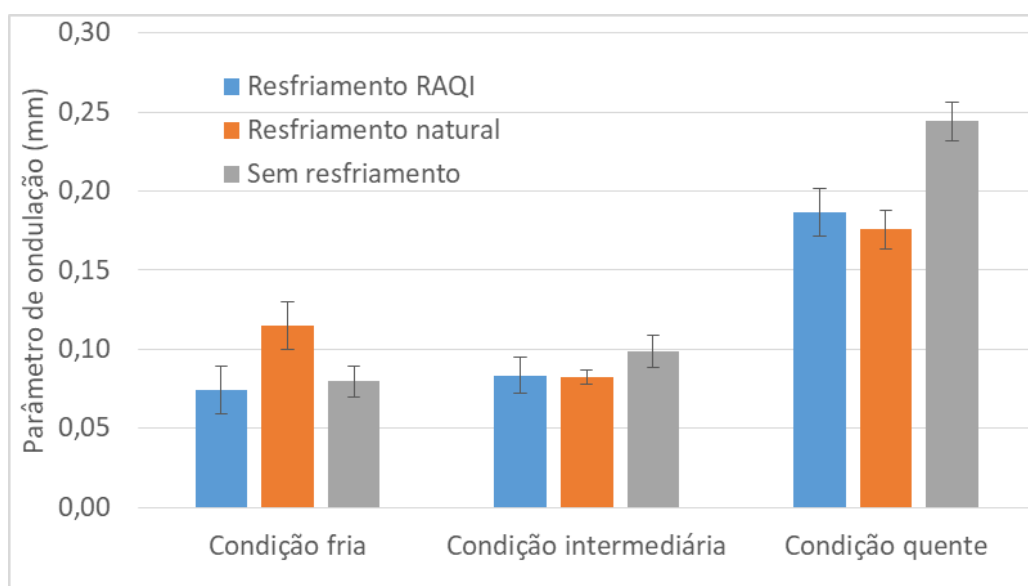


Figura 100 - Comparação entre diferentes condições de deposição com e sem resfriamento sobre o parâmetro de ondulação (W).

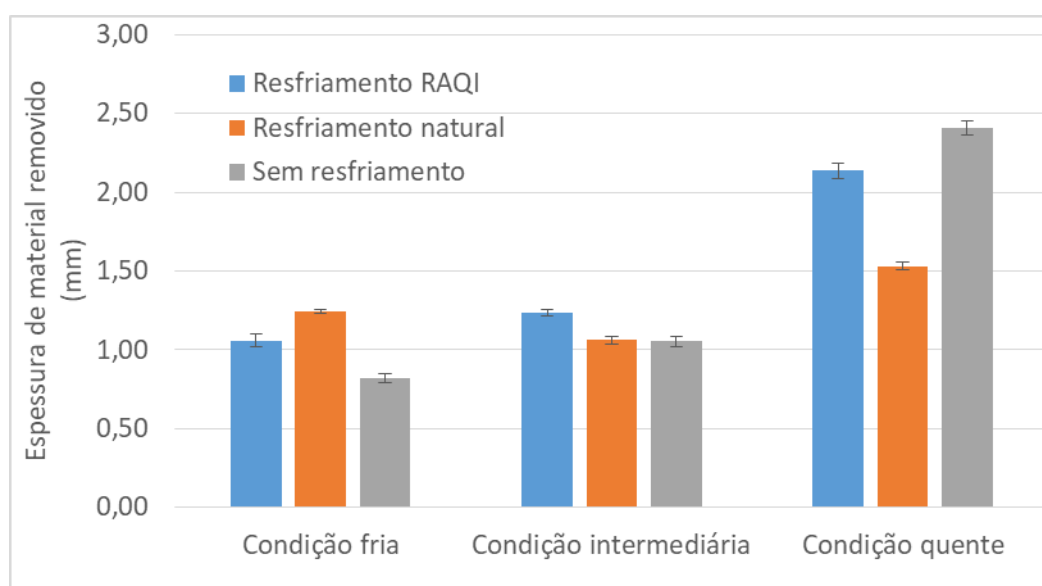


Figura 101 - Comparação entre diferentes condições de deposição com e sem resfriamento sobre a espessura de material a ser removido (EMR).

Um ajuste estatístico com nível de significância de 10 % foi realizado para avaliar a influência dos parâmetros de estudo sobre a ondulação (W) das pré-formas onde foi aplicado o gerenciamento térmico RAQI. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido foi de aproximadamente 82 %. As variáveis apresentadas como influentes no processo foram: velocidade de deposição (com comportamento linear e quadrático), velocidade de alimentação (de forma linear) e a interação entre LEWD e  $V_D$ . O gráfico de Pareto da Fig. 102 apresenta este resultado.

Corroborando a literatura corrente (da SILVA, 2019), o aumento da velocidade de alimentação tende a ocasionar em aumento do parâmetro de ondulação, o que reflete em maiores desvios geométricos. Em soma, a redução da velocidade de deposição também provocou este efeito. Ambas estão relacionadas com o aumento do calor imposto no processo, confirmando a necessidade de gerenciamento térmico para mitigar efeitos negativos sobre a peça fabricada. Para o parâmetro LEWD, foi observado que existe uma região (entre 11 e 29 mm) na qual a ondulação apresentou os menores valores, o que também vai de encontro aos resultados preliminares apresentados na literatura, mesmo que para uma faixa mais estreita de parâmetros de deposição (da SILVA, 2019). Na medida em que esta faixa é extrapolada, a ondulação passa a aumentar. Este comportamento é verificado pois altos valores de LEWD significam menor dissipação de calor e baixos valores, representando grande proximidade entre a lâmina de água e o arco elétrico, o que pode ocasionar distúrbios na poça fundida e até mesmo excesso de falta de molhabilidade e uniformização das camadas. Os resultados para a influência destas variáveis sobre a ondulação são expressos nas Figs. 103, 104 e 105.

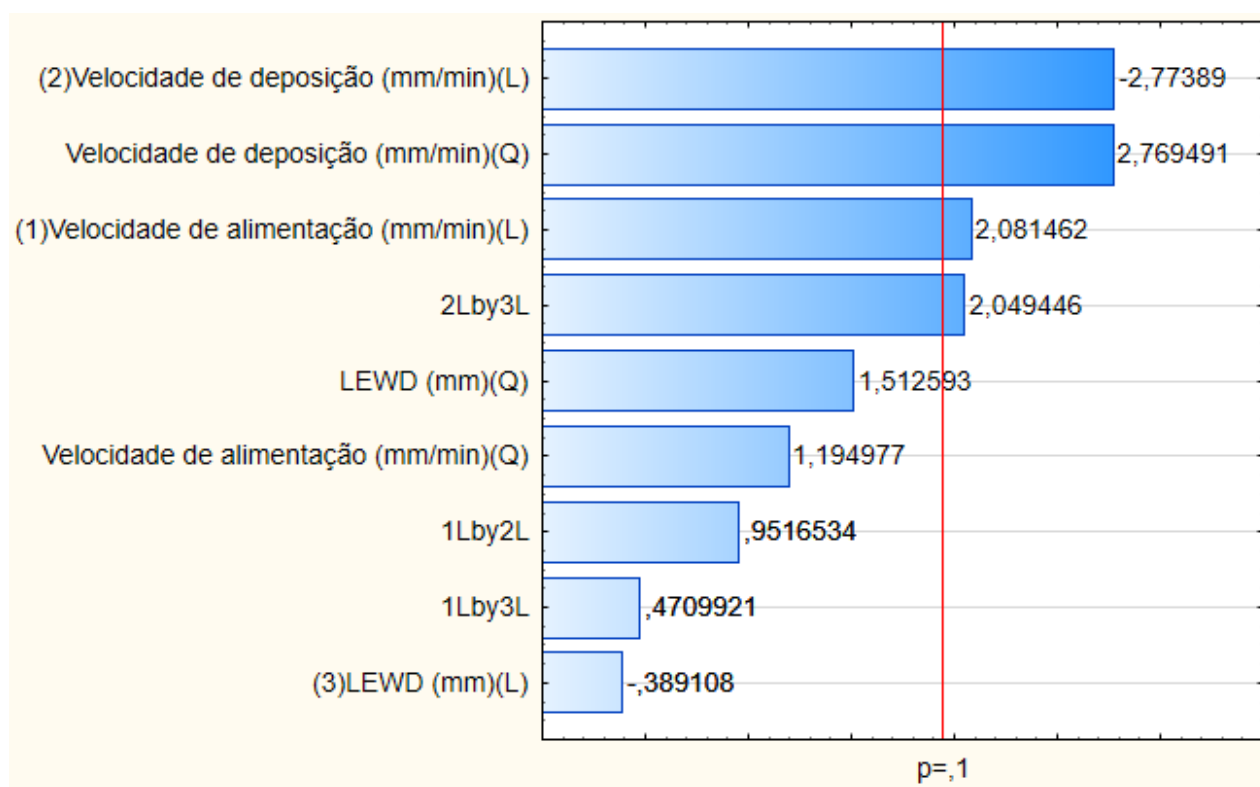


Figura 102 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob a ondulação (W) obtida via escaneamento.

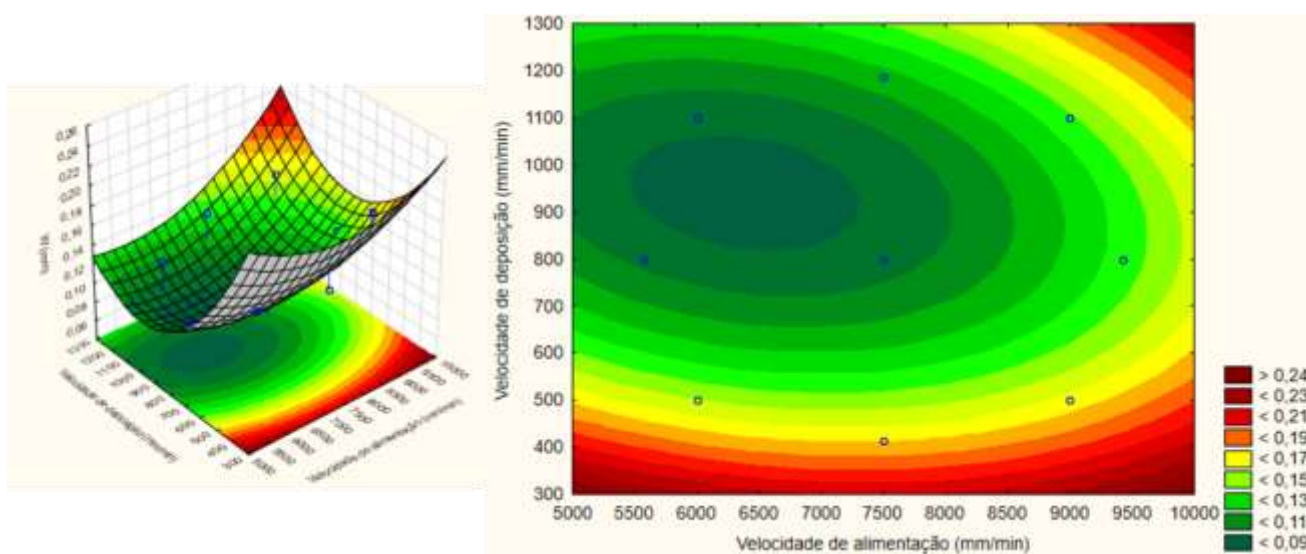


Figura 103 – Superfície e perfil de resposta do parâmetro de ondulação (W) em função dos parâmetros  $V_D$  e  $V_A$ .

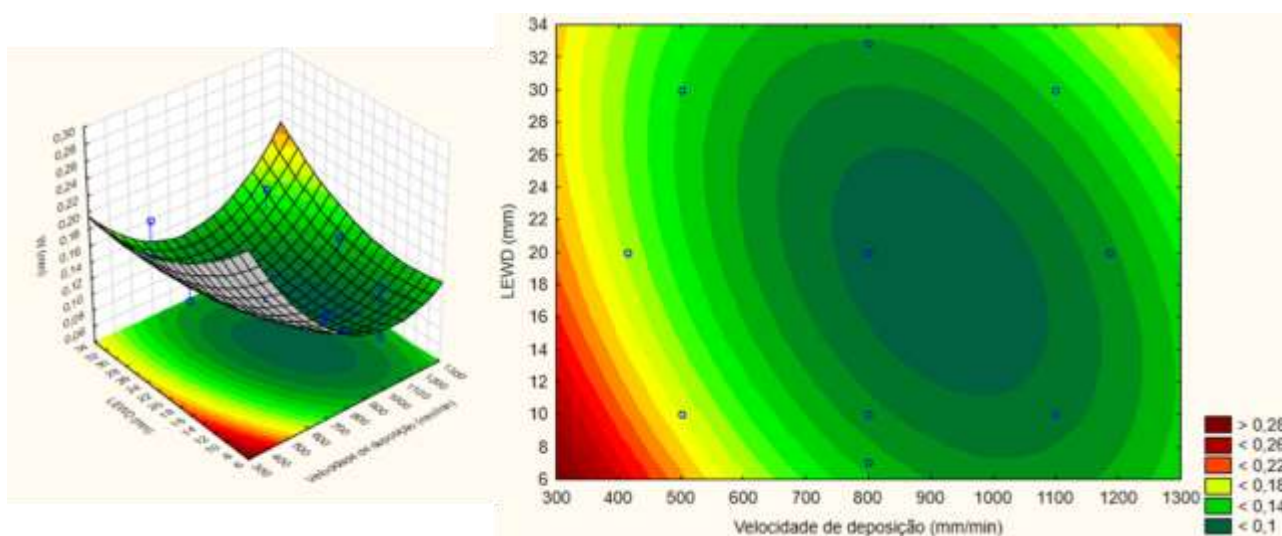


Figura 104 - Superfície e perfil de resposta do parâmetro de ondulação (W) em função dos parâmetros  $V_D$  e LEWD.

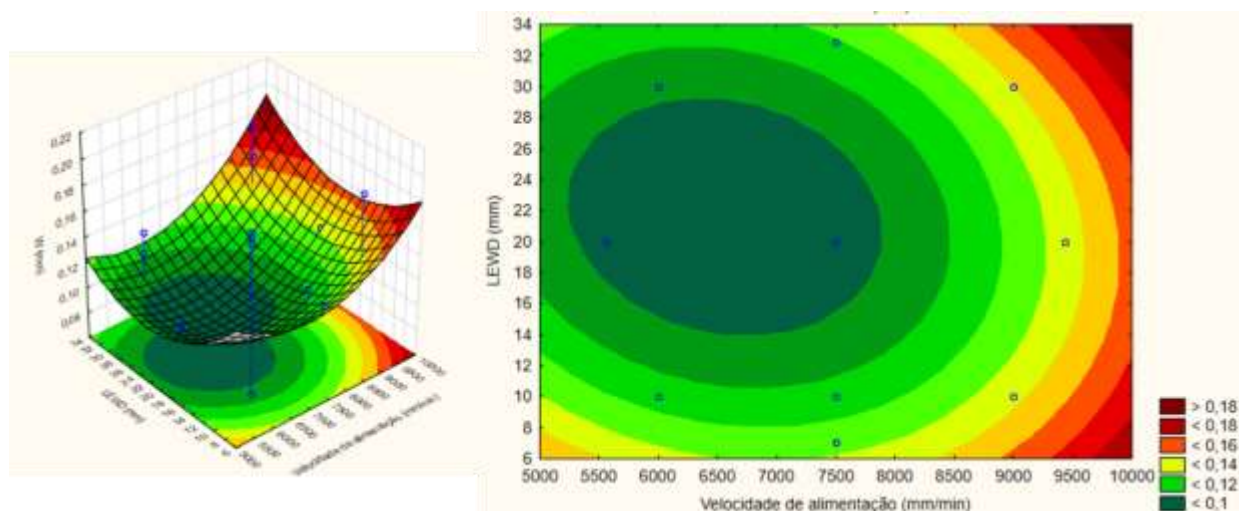


Figura 105 - Superfície e perfil de resposta do parâmetro de ondulação (W) em função dos parâmetros LEWD e  $V_A$ .

O ajuste estatístico com nível de significância de 10 % foi realizado para avaliar a influência dos parâmetros de estudo sobre a espessura mínima de material a ser removido (EMR). O coeficiente de determinação foi estimado em 51 % e não foi observada influência de nenhuma variável, conforme expresso pelo gráfico de Pareto da Fig. 106.

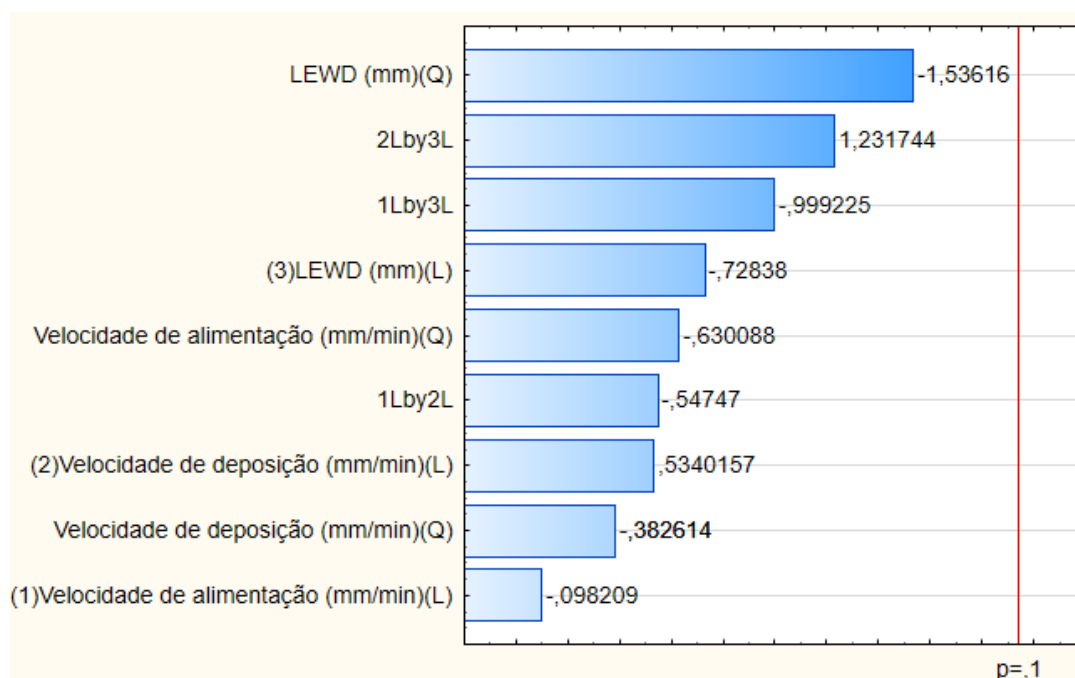


Figura 106 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob a espessura mínima de material a ser removido (EMR) obtida via escaneamento.

## 4.2 Análise da porosidade

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados relativos à porosidade das pré-formas fabricadas sob as diferentes condições de deposição.

As medidas de massa à seco e aparente (imerso em um líquido) das amostras foram obtidas. Os valores médios e as respectivas incertezas são apresentados na Tab. 23. A corrida denominada de “referência” se refere ao arame AWS ER5356 (o mesmo utilizado na deposição de material).

Tabela 23 - Valores médios da medição de massa das amostras e respectivas incertezas.

Corrida	Massa à seco (gramas)		Massa imersa (gramas)	
	Média	Incerteza expandida	Média	Incerteza expandida
16	5,09	0,00	3,09	0,00
7	3,99	0,00	2,43	0,00
3	3,52	0,00	2,13	0,00
2	4,87	0,00	2,95	0,00
13	4,63	0,00	2,82	0,00
14	5,46	0,00	3,29	0,00
6	5,77	0,00	3,49	0,00
9	3,97	0,00	2,43	0,00
12	3,81	0,00	2,32	0,00
10	5,35	0,00	3,27	0,00
5	6,89	0,00	4,18	0,01
1	5,22	0,00	3,18	0,00
8	4,62	0,00	2,80	0,00
11	6,20	0,00	3,77	0,00
4	3,01	0,00	1,83	0,00
15	4,99	0,00	3,05	0,00
17	5,11	0,00	3,11	0,00
18	7,22	0,00	4,40	0,00
19	3,20	0,00	1,96	0,00
20	5,97	0,00	3,64	0,00
21	8,20	0,00	4,99	0,00
22	4,32	0,00	2,63	0,00
Referência	2,39	0,00	1,48	0,00



Os valores de densidade das amostras foram calculados por meio das medidas médias de massa e são apresentados na Tab. 24. O volume de vazios foi calculado para cada amostra em relação à densidade do arame de referência. Os resultados e incertezas são apresentados também na Tab. 24 e em forma de gráfico na Fig. 107. De forma geral, para os parâmetros e materiais utilizados, foi possível concluir que a aplicação do gerenciamento térmico RAQI não induz a níveis prejudiciais de porosidade e os resultados apresentados estão de acordo com a literatura corrente (HASELHUHN et al., 2016, RYAN et al., 2018 e da SILVA et al., 2018).

Tabela 24 - Resultados do cálculo de densidade e volume de vazios das amostras.

Corrida	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Incerteza Expand. (g/cm <sup>3</sup> )	Volume de vazios (%)	Incerteza Expand. (%)
16	2,54	0,01	2,56	0,51
7	2,55	0,00	2,30	0,41
3	2,52	0,01	3,32	0,71
2	2,52	0,00	3,28	0,32
13	2,55	0,00	2,15	0,28
14	2,51	0,00	3,82	0,46
6	2,52	0,00	3,30	0,00
9	2,56	0,00	1,75	0,41
12	2,56	0,00	2,03	0,42
10	2,56	0,00	1,91	0,30
5	2,53	0,01	2,95	0,55
1	2,56	0,00	1,97	0,35
8	2,52	0,00	3,34	0,40
11	2,55	0,00	2,25	0,30
4	2,54	0,01	2,73	0,75
15	2,56	0,00	1,88	0,31
17	2,54	0,00	2,57	0,31
18	2,55	0,00	2,21	0,31
19	2,57	0,00	1,65	0,49
20	2,56	0,00	1,88	0,30
21	2,55	0,00	2,19	0,34
22	2,55	0,00	2,30	0,38
Referência	2,61	0,01		

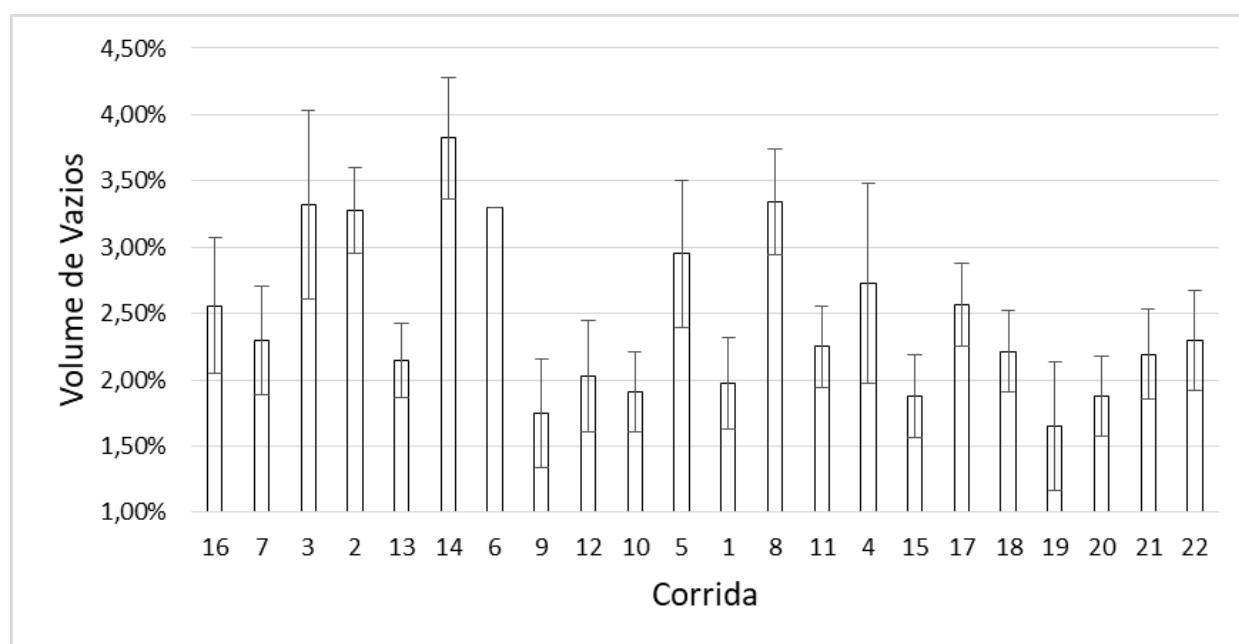


Figura 107 – Gráfico comparativo entre pré-formas para o volume de vazios e incertezas.

Para avaliar o efeito dos parâmetros  $V_A$ ,  $V_D$  e LEWD no volume de vazios, foi realizado um ajuste pelo *software* estatístico com nível de significância de 10 % que obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de aproximadamente 74 %. Por meio do gráfico de Pareto da Fig. 108, observou-se que o parâmetro LEWD foi o único significativo, e com influência linear (L) e quadrática (Q) no percentual de volume de vazios das amostras verificadas. Os demais parâmetros não foram influentes no resultado.

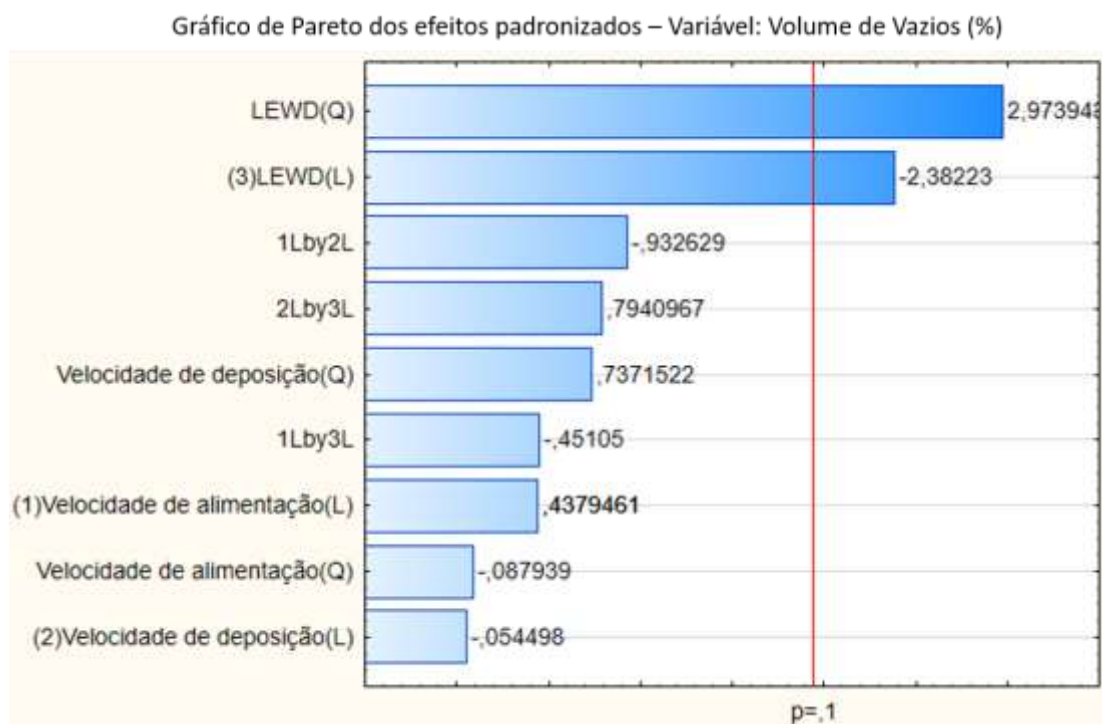


Figura 108 – Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sob o volume de vazios (%).

As Figuras 109a e 110a apresentam as superfícies de resposta para o volume de vazios em função dos parâmetros LEWD e  $V_A$  e  $V_D$  respectivamente. A influência quadrática pode ser bem visualizada nestas duas imagens. Já as Figs. 109b e 110b representam o perfil de resposta e foi verificado que valores maiores de LEWD (maior distância entre a lâmina d'água e a camada em deposição) induziram a menores níveis de volume de vazios. Verificou-se ainda que para distâncias LEWD abaixo de 8 mm o volume de vazios estimado pode ultrapassar os 5 %, se tornando uma condição preocupante para a fabricação. A proximidade do vapor de água em relação à região de deposição (poça fundida e arco elétrico) e a alta velocidade de solidificação do material, levando ao aprisionamento de gases, podem ser listadas como razões condizentes que justificariam este aumento do nível de porosidades para LEWD menores.

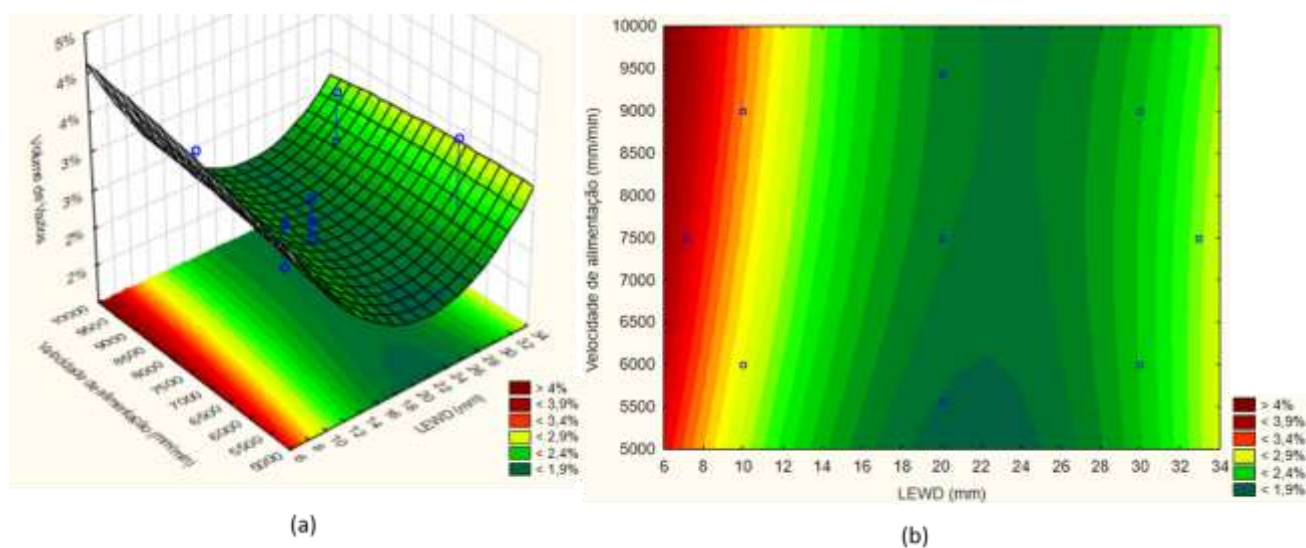


Figura 109 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do volume de vazios em função dos parâmetros LEWD e  $V_A$ .

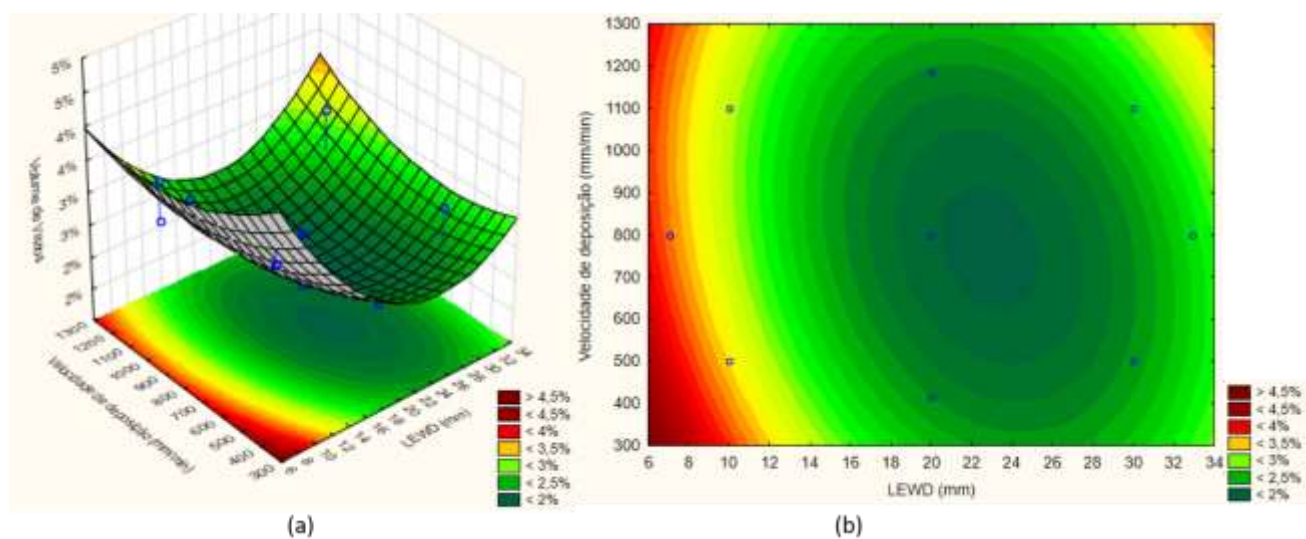


Figura 110 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do volume de vazios em função dos parâmetros LEWD e  $V_D$ .

### 4.3 Análise térmica

Os dados da temperatura 30 mm à frente do e após o arco foram adquiridos ao longo de toda a deposição. A Figura 111 ilustra os ciclos térmicos da pré-forma 16 e representa o padrão típico observado para os demais casos. No caso em questão, foram depositadas 28 camadas e cada ciclo térmico (período com patamares alto e baixo de temperaturas) representou 2 camadas construídas em função da estratégia de deposição por passes/camadas bidirecionais.

A Figura 112 apresenta um ciclo térmico individual, onde duas camadas foram fabricadas e a “deposição da camada 1” representa o período em que o pirômetro estava direcionado à frente da poça de fusão e a “deposição da camada 2” o período em que o equipamento estava apontado na região posterior à poça. Nesta mesma figura, o ponto em vermelho representa a temperatura medida antes da deposição da camada e na posição de 30 mm à frente do arco elétrico. Esta temperatura foi utilizada para as análises térmicas, por ser o menor valor observado antes de cada camada e, assim, representar a redução de calor experimentada pelas pré-formas em cada condição de deposição e resfriamento.

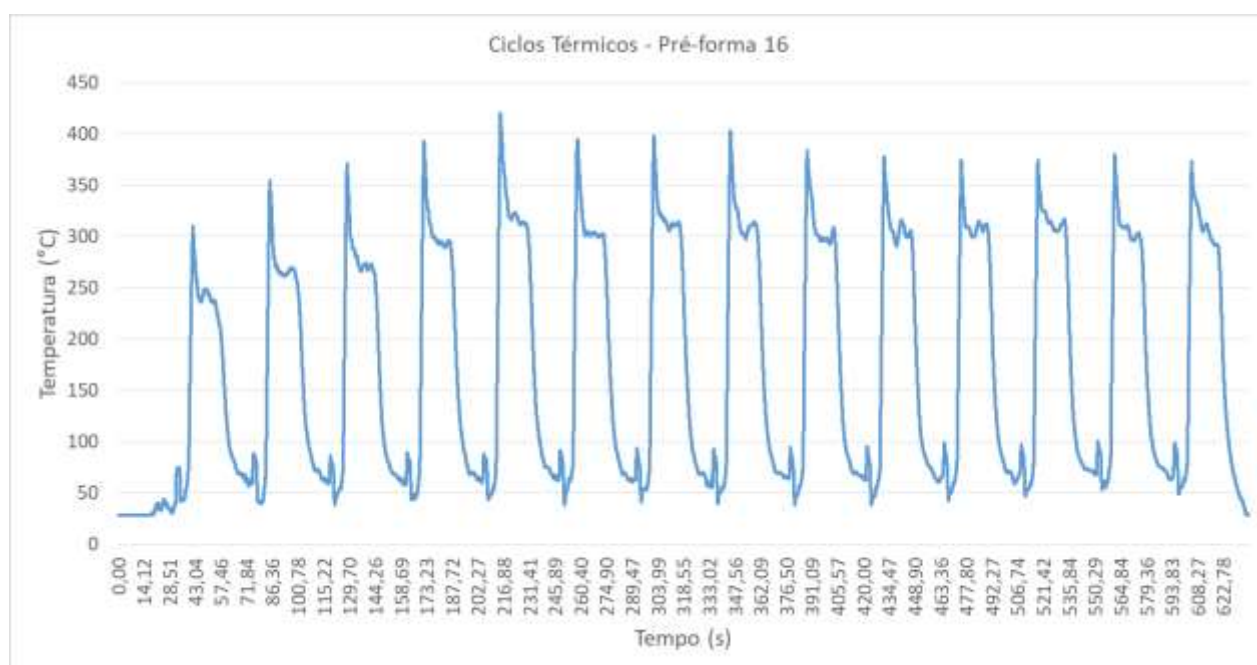


Figura 111 – Ciclos térmicos na deposição da pré-forma 16.

Conforme observado na Fig. 111 e nas Figs. 113a, 113b e 113c, para todas as pré-formas nas quais foi aplicado o gerenciamento térmico RAQI, o valor da temperatura medida à frente do arco antes da deposição se manteve baixo e com pequenas variações ao longo de todo o processo. Dessa forma, a principal função da técnica que é mitigar a alta energia térmica acumulada no processo foi verificada. Esta uniformidade de temperatura representa que o calor aportado ao longo da fabricação está em equilíbrio com o fluxo de calor em dissipação via radiação, e principalmente convecção e condução (direcionado para a água). Em alguns casos específicos, principalmente para pequenos valores de LEWD, a temperatura medida alcançou o valor da temperatura ambiente (29 °C), indicando que a dissipação esteve acima da imposição de calor na peça.

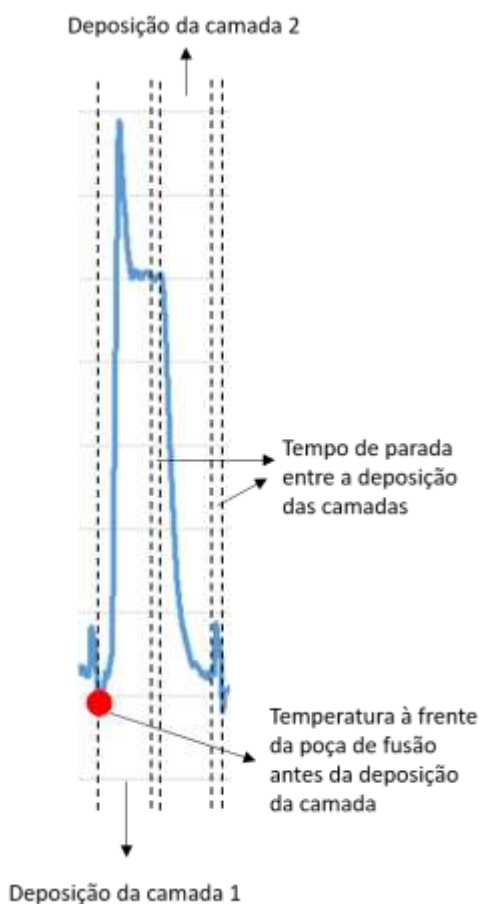


Figura 112 – Ciclo térmico da deposição de duas camadas sequenciais.

Para as pré-formas comparativas sem gerenciamento térmico (com resfriamento apenas natural sem paradas entre passes/camadas), foi observado que as temperaturas medidas se apresentaram consideravelmente mais altas quando avaliadas frente aos valores obtidos quando houve aplicação de gerenciamento térmico ativo (RAQI) e de resfriamento apenas natural com paradas entre passes/camadas. As Figuras 114, 115 e 116 apresentam respectivamente este comportamento para as deposições com aporte térmico baixo (condição fria), intermediário e alto (condição quente).

Nas ocasiões onde não há resfriamento forçado pelo RAQI, as temperaturas alcançaram valores mais elevados em função do acúmulo de calor e com uma tendência de crescimento contínuo até uma região de equilíbrio térmico. No final da deposição, possivelmente como resultado da perda de calor pelas paredes mais altas, foi observada inclusive uma redução da temperatura, porém mantendo valores altos, acima daqueles observados para as situações onde houve gerenciamento térmico ativo.

Ainda nas Figuras 114, 115 e 116, foi observado um perfil de proximidade entre as duas curvas da temperatura entre as deposições com aplicação de resfriamento apenas natural com

paradas entre passes/camadas e com RAQI. Esperava-se este comportamento com valores mais baixos, porém o resfriamento natural compromete o processo em termos de produtividade uma vez que requer longos tempos de parada ao final da deposição de cada camada.

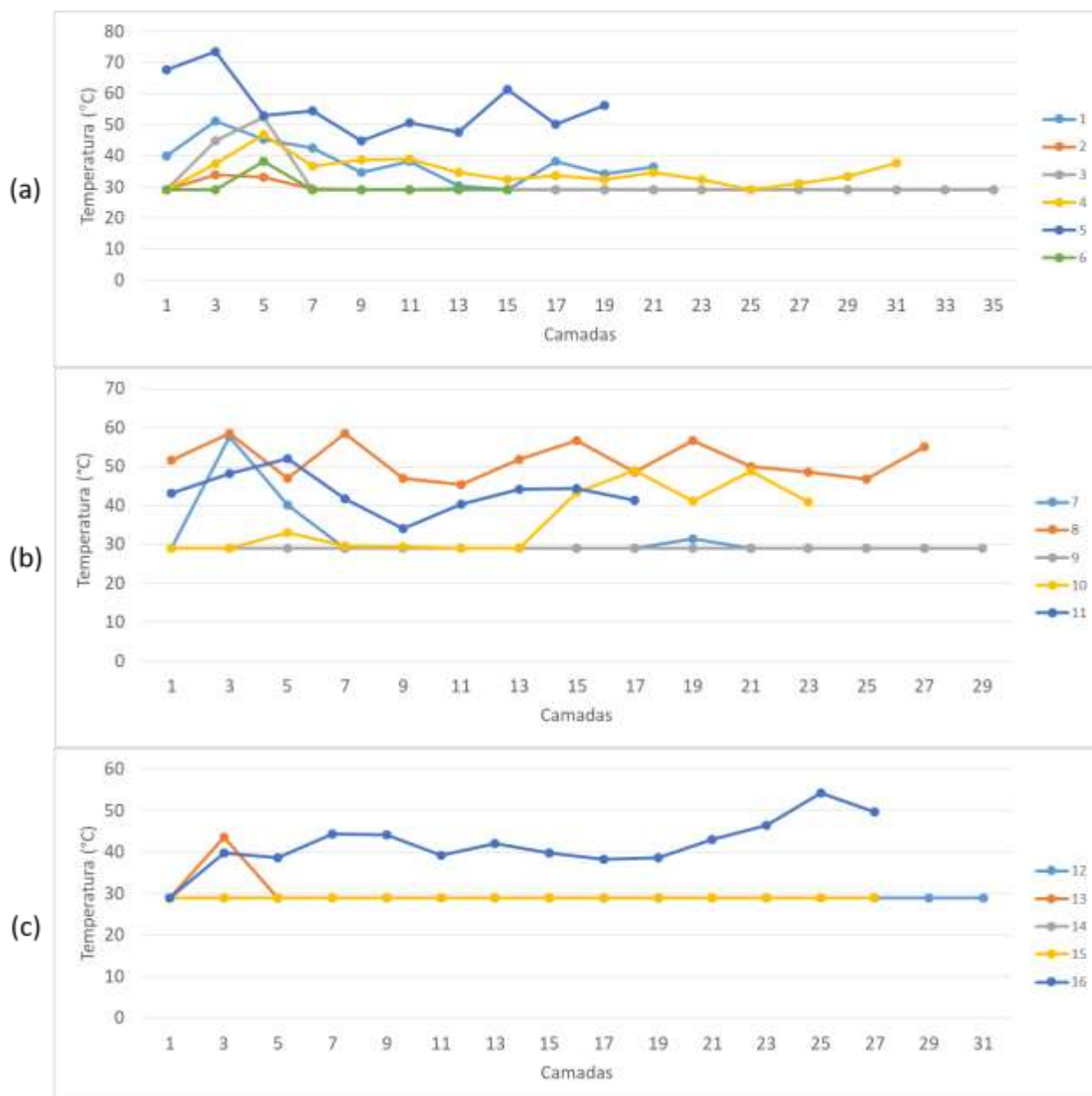


Figura 113 – Gráfico da menor temperatura à frente da poça de fusão antes da deposição de cada camada para as pré formas fabricadas com gerenciamento térmico RAQI: (a) pré-formas de 1 à 6 (b) pré-formas de 7 à 11 (c) pré-formas de 12 à 16.



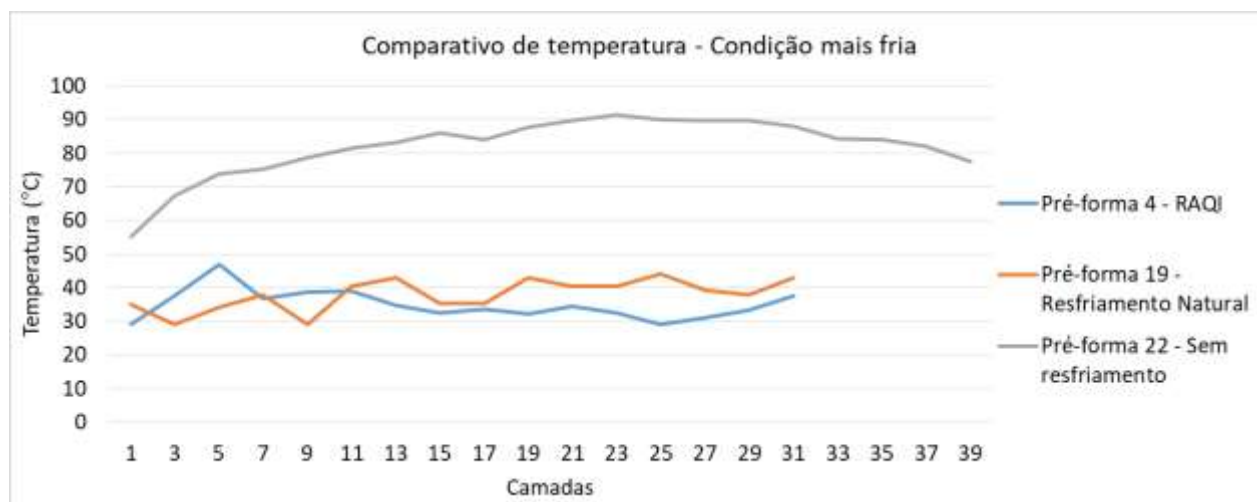


Figura 114 – Temperatura à frente da poça de fusão observada para a condição mais fria.

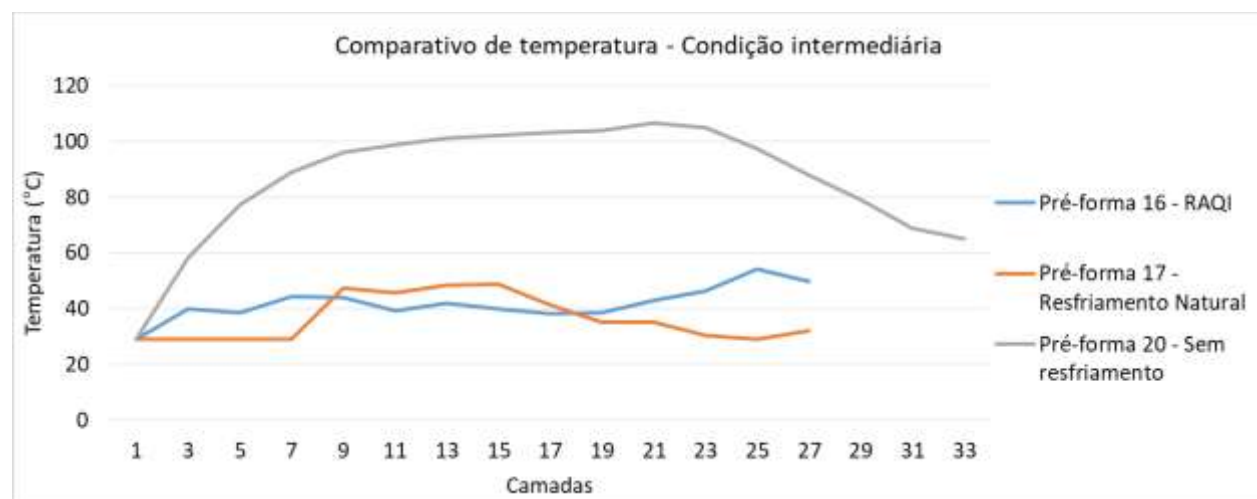


Figura 115 – Temperatura à frente da poça de fusão observada para a condição intermediária.

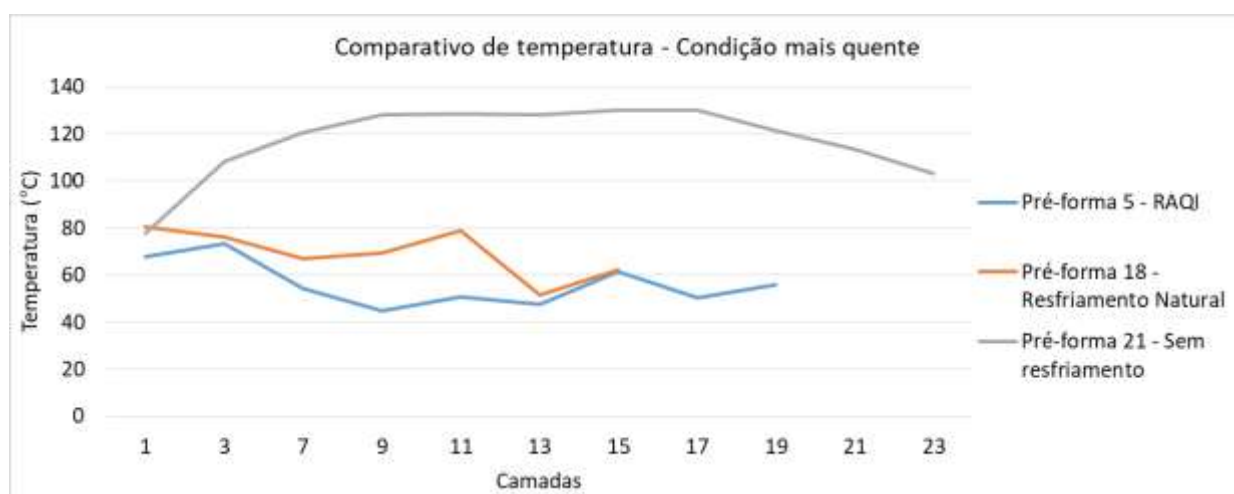


Figura 116 - Temperatura à frente da poça de fusão observada para a condição mais quente.



Para representar a temperatura geral media a 30 mm à frente do arco elétrico e antes da deposição de cada camada (duas a duas) para cada pré-forma, foi utilizado o valor identificado no terceiro quartil (25 %) do histograma da medição de temperatura de todo o processo de fabricação da pré-forma, conforme a literatura corrente (da SILVA, 2019), como medida representativa da temperatura de interpasse. A ilustração da Fig. 117 apresenta acima o histograma obtido para o caso da pré-forma 11 e abaixo o gráfico Box & Whisker com os valores de temperatura mínima, máxima e nos quartis 25 % e 75 % para a mesma peça.

O valor do primeiro quartil (25 %) para cada pré-forma é apresentado na Tab. 25. Com estes dados, foi realizado um ajuste estatístico para avaliar o efeito da variação de cada um dos parâmetros sobre esta resposta térmica, sempre com o objetivo de identificar qual condição apresentou um menor valor de temperatura, levando ao menor acúmulo de calor. O ajuste foi feito pelo *software* estatístico com nível de significância de 10 % e obteve um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de aproximadamente 78 %.

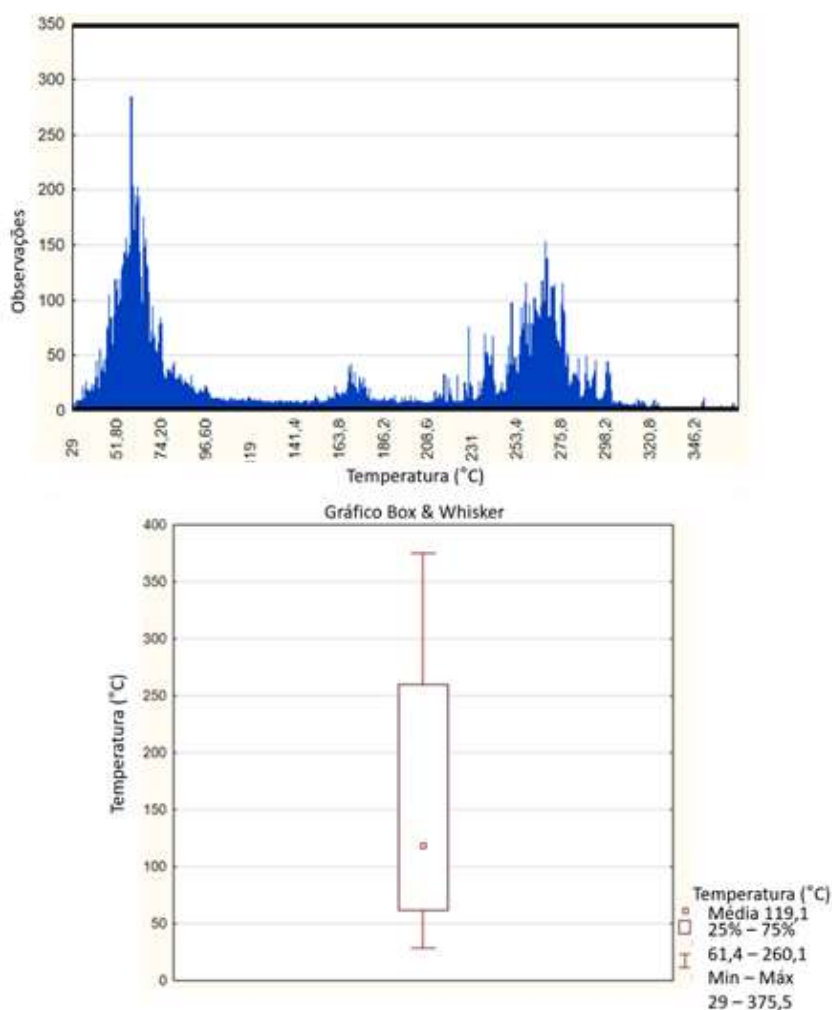


Figura 117 – Histograma para os valores de temperatura medidos em toda a deposição (acima) e gráfico Box & Whisker identificando os quartis (abaixo) para o caso da pré-forma 11.

Tabela 25 – Valor do primeiro quartil referente ao histograma dos dados de temperatura na deposição das pré-formas.

Corrida	Velocidade de alimentação (mm/min)	Velocidade de deposição (mm/min)	LEWD (mm)	Temperatura no primeiro quartil (25 %) (°C)
16	7500	800	20	38,2
7	9000	1100	30	29,8
3	6000	1100	30	31,2
2	6000	500	10	34,9
13	7500	800	32,9	55,9
14	7500	800	7,1	30,2
6	9000	500	10	32,0
9	5569,2	800	20	51,6
12	7500	1186,2	20	29,0
10	9430,8	800	20	35,9
5	9000	500	30	43,3
1	6000	500	30	29,0
8	9000	1100	10	30,1
11	7500	413,8	20	29,0
4	6000	1100	10	29,0
15	7500	800	20	42,0

De acordo com o gráfico de Pareto da Figura 118, os parâmetros LEWD e  $V_A$  apresentaram influência quadrática e linear no comportamento da temperatura, enquanto que a interação entre LEWD e  $V_D$  influenciou de forma linear.

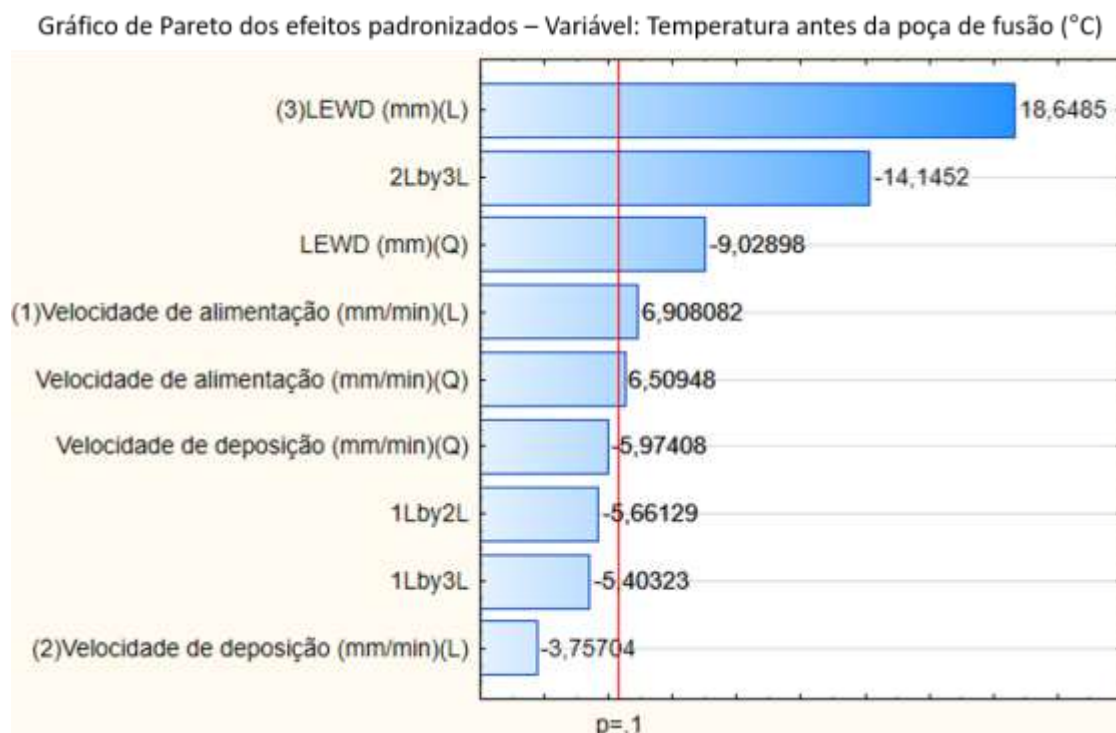


Figura 118 - Gráfico de Pareto apresentando o efeito dos parâmetros em análise sobre o valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para cada pré-forma.

A superfície de resposta presente na Fig. 119a ilustra o comportamento desta temperatura com a variação da LEWD e da velocidade de alimentação. Pelo perfil de resposta equivalente, na Fig. 119b, observa-se mais claramente que o a redução do parâmetro LEWD resulta em menores temperaturas, o que vai de encontro com o esperado uma vez que o nível de água mais próximo da poça fundida ocasiona em um maior resfriamento, demonstrando a eficácia do gerenciamento térmico ativo utilizado.

A Figura 120a apresenta a variação da  $V_A$  e  $V_D$  sobre a mesma variável de resposta. Pela Fig. 120b, onde está o perfil de resposta equivalente, foi notado que o aumento da  $V_A$  leva à maiores índices de temperatura, o que consequentemente impactou em maior acúmulo de calor. A maior velocidade de alimentação está diretamente relacionada com a maior corrente no processo, o que leva à maiores valores de potência do arco e consequentemente em mais fluxo energético potencialmente imposto durante a deposição.

A Figura 121a relaciona a mesma temperatura com os parâmetros LEWD e  $V_D$ . Era esperada uma menor temperatura para altas velocidades de deposição, já que isso poderia levar a um menor calor imposto. Contudo, outros fatores, como a sobreposição da poça (que pode bloquear o fluxo de calor do arco para a camada e assim restringir a alcance de maiores temperaturas no caso à frente do arco) podem ter atuado e mascarado um efeito mais óbvio. Entretanto, a  $V_D$  isoladamente

não apresentou influência no ajuste, enquanto a do LEWD foi quadrática e linear. Esta influência majoritária da LEWD pode ser observada pelo perfil de resposta na Fig. 121b.

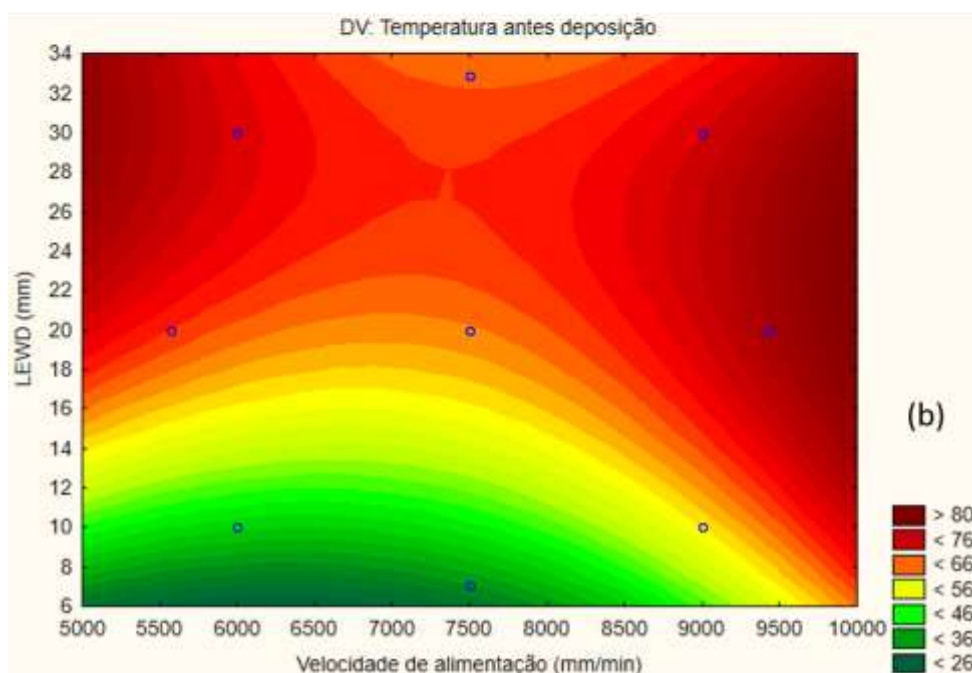
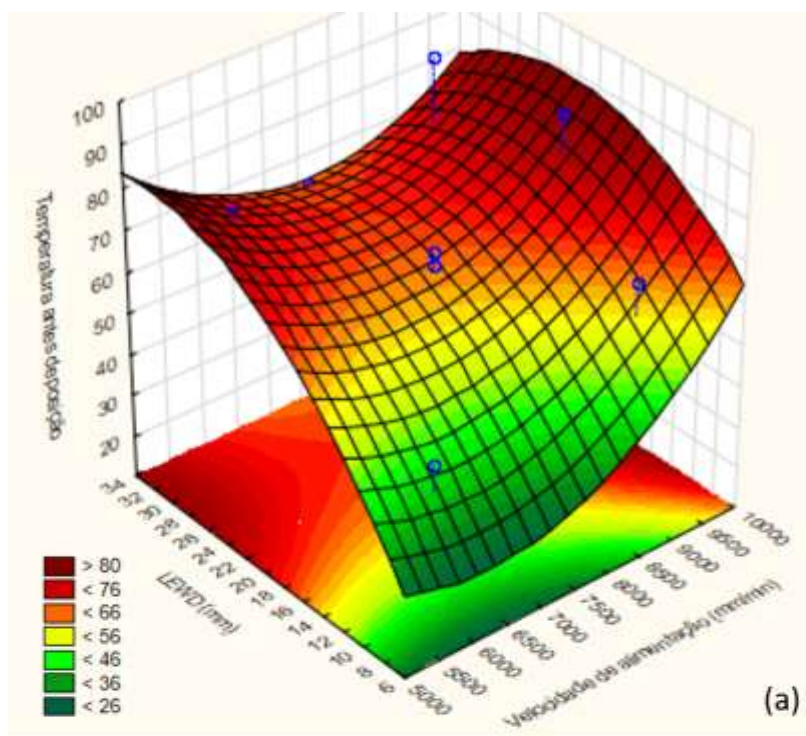


Figura 119 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para a variação de LEWD e  $V_A$ .

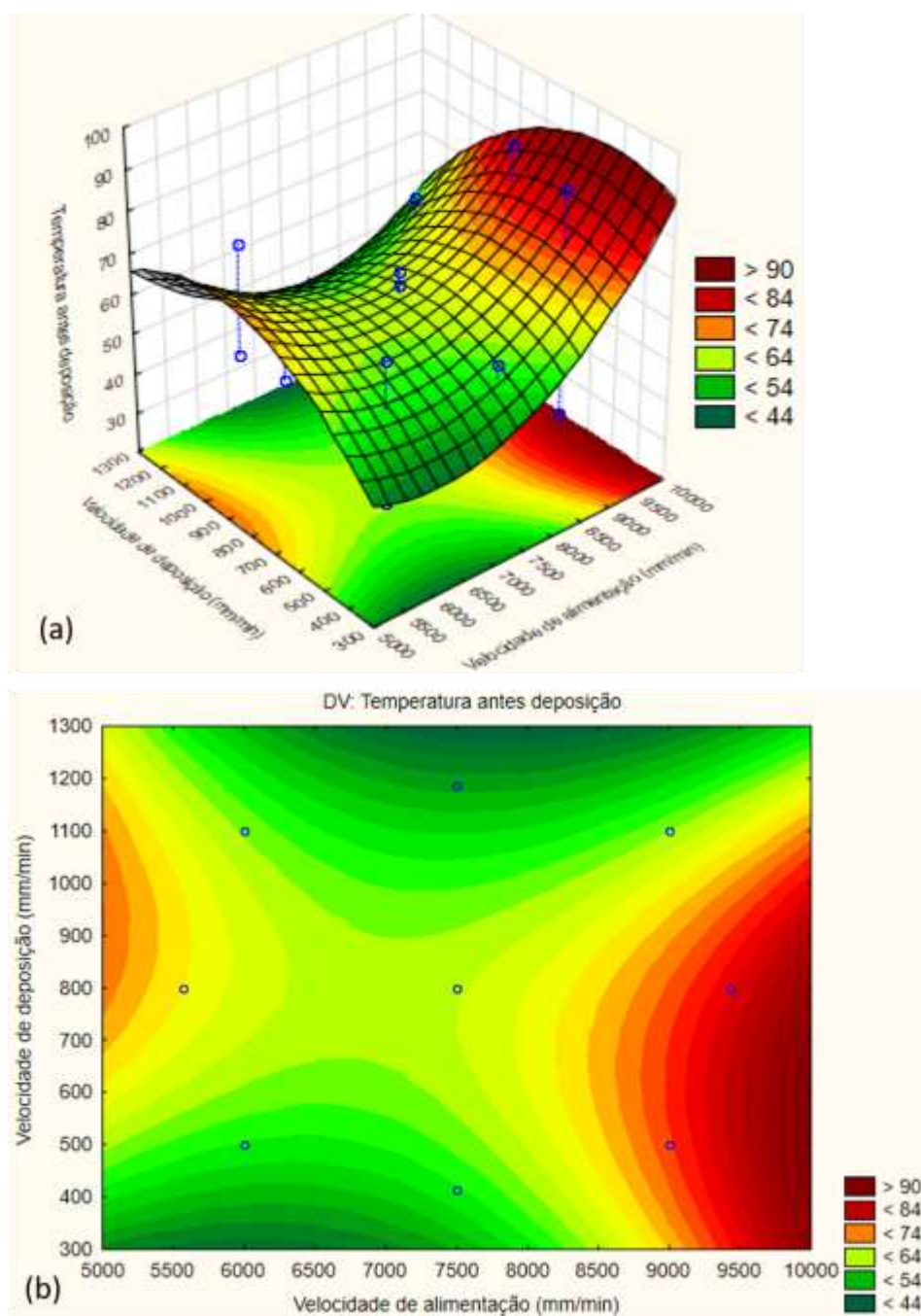


Figura 120 - (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para a variação de  $V_A$  e  $V_D$ .



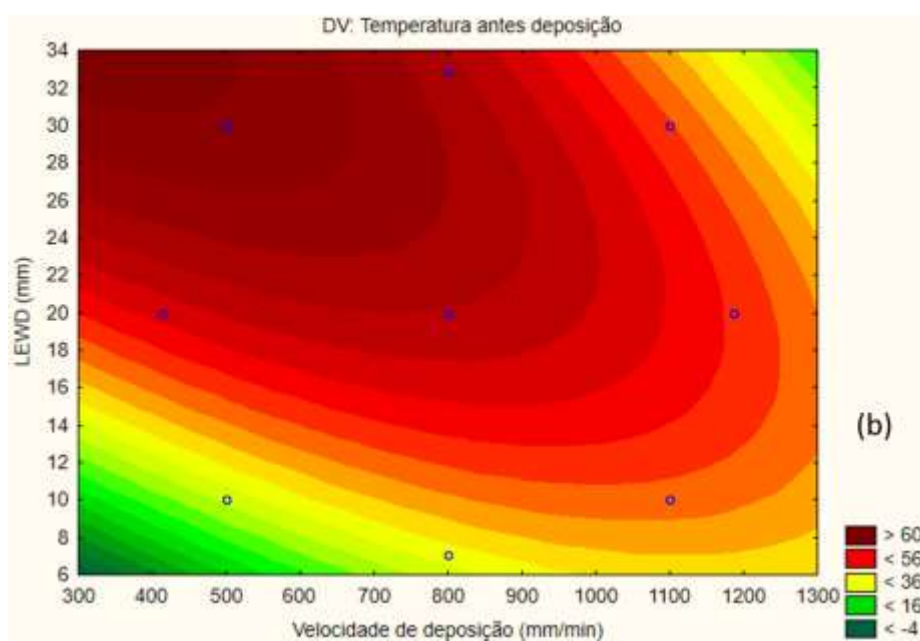
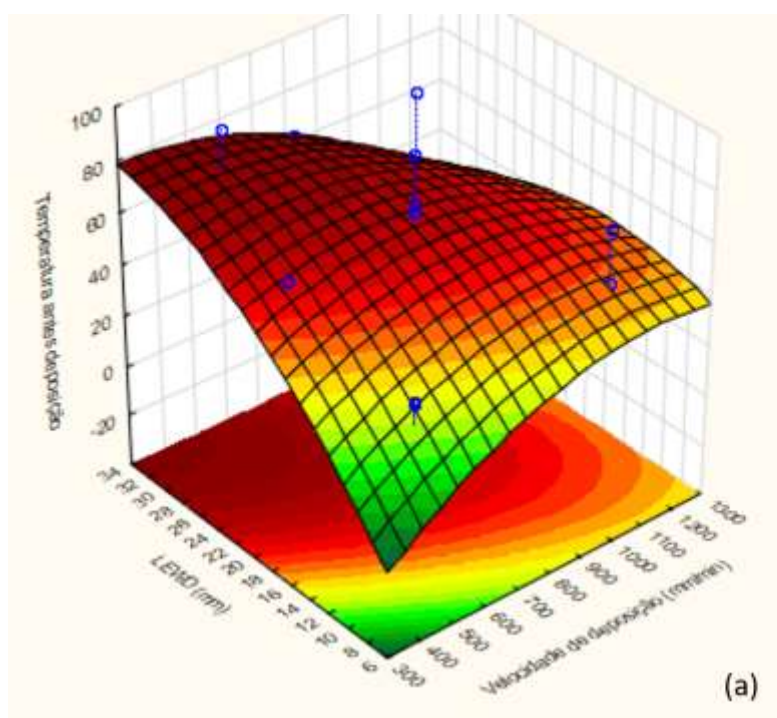


Figura 121 – (a) Superfície de resposta e (b) perfil de resposta do valor da temperatura a 30 mm à frente da poça de fusão no primeiro quartil (25 %) para a variação de LEWD e  $V_D$ .

# CAPÍTULO VI

## 6. CONCLUSÕES

Com a finalização do presente trabalho, constatou-se que as duas técnicas utilizadas apresentaram resultados coerentes para a avaliação dos desvios geométricos de ondulação e também na estimativa do aproveitamento do material depositado. Ambas podem ser utilizadas em um contexto onde busca-se preservar a integridade da peça e/ou reconstruir virtualmente o perfil, superfície ou volume.

Quanto maior foi o acúmulo de calor nas peças piores foram os resultados geométricos das mesmas. As regiões de extremidade apresentaram maior aporte térmico e a pré-forma sofreu alargamento e redução na altura.

O resfriamento ativo pela técnica RAQI (Resfriamento Ativo por Quase-Imersão) controlou mais a largura das peças em comparação a técnica com o resfriamento natural e sem resfriamento.

A maior ondulação foi verificada maior em situações onde o acúmulo de calor foi expressivo, logo foi menor na região central das pré-formas. Situações onde LEWD se apresentou muito baixo, a ondulação foi afetada negativamente.

Em termos de aproveitamento de material, este apresentou valores uniformes ao longo de toda a peça. Quanto mais próximo de  $V_A = 7500$  mm/min,  $V_D = 800$  mm/min e  $LEWD = 20$  mm melhores foram os valores deste parâmetro.

O processo de deposição utilizando a técnica RAQI não induz à formação expressiva de poros. Apenas o parâmetro LEWD apresentou influência no nível de volume de vazios. Quanto maior, menos poros foram percebidos.

A técnica RAQI manteve a temperatura medida 30 mm à frente do arco (antes da deposição) próxima do constante ao longo do processo, indicando redução do calor acumulado. Em alguns casos a dissipação de calor é até mais significativa que a imposição.

Quando não houve resfriamento, esta temperatura é crescente, indicando acúmulo de calor. O resfriamento natural apesar de apresentar um ciclo térmico semelhante ao RAQI compromete a produtividade.

Apesar da não linearidade observada em algumas análises, a melhor condição sugerida para deposição, onde menos calor é imposto, foi na faixa de  $6000$  mm/min  $< V_A < 7000$  mm/min,  $800$  mm/min  $< V_D < 1100$  mm/min e  $10$  mm  $< LEWD < 13$  mm.

# CAPÍTULO VII

## 7. TRABALHOS FUTUROS

Tratando-se de um tema com potencial de aplicação, destacam-se algumas possibilidades de estudos complementares levantadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho:

- Aprimorar a funcionalidade do *software* de escaneamento possibilitando a análise geométrica do volume completo da peça através da reconstrução e acoplamento das superfícies laterais;
- Utilizar um filtro ótico do tipo passa banda para permitir a passagem apenas do comprimento de onda do *laser* para a câmera e assim tornar o processo de escaneamento mais prático;
- Determinar as possíveis fontes de erro do tipo B que implicam em incertezas para os dois sistemas de medição por imagem utilizados: via escaneamento à *laser* e via reconstrução de seção transversal;
- Avaliar o acúmulo de calor global e de cada camada depositada através da determinação e medição da temperatura de interpasse do processo;
- Comparar o nível de porosidades entre as posições centrais e de extremidade da pré-forma e também ao longo do eixo z (altura), verificando o teor de poros, por exemplo, na base, meio e no topo da peça;
- Definir um envelope de operação para atingir características geométricas específicas (largura e espessura da camada) de acordo com os parâmetros de deposição;
- Avaliar o efeito da velocidade de deposição, velocidade de alimentação e LEWD nas propriedades mecânicas das pré-formas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D Experience Marketplace. (2018). *3D Experience Marketplace*. Fonte: 3D Experience Marketplace. disponível em: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/directed-energy-deposition>

3DSCIENCEVALLEY. (29 de dezembro de 2019). *Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing – Joule Printing™ Vs. Wire DED*. Fonte: 3D Science Valley Insight into the infinite opportunities in 3D. disponível em: <http://en.51shape.com/?p=2270>

Acheson, R. (1990). *US Patente N° 4 952 769 1990*.

Alberti, E. A., Bueno, B. M., & D'Oliveira, A. S. (2016). Additive manufacturing using plasma transferred arc. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7697-7>

Alfaro, S. C., & Franco, F. D. (2010). Exploring Infrared Sensing for Real Time Welding Defects Monitoring in GTAW. *Sensors*, 5962-5974. <https://doi.org/10.3390/s100605962>

ASTM. (2009). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. ASTM.

Baker, R. (1925). *US Patente N° 1 533 300 1925*.

BIPM. (2018). *26ª reunião da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM)*. Paris.

Boulos, P., & de Camargo, I. (1975). *Geometria analítica um tratamento vetorial*. São Paulo: MAKRON.

Cansizoglu, O., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., & Mahale, T. (2008). Properties of Ti-6Al-4V non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting. *Materials Science Engineering*, 468-474. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.002>

Li, F., Chen, S., Shi, J., Zhao, Y., Tian H, (2018). Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. *Appl. Sci.* <https://doi.org/10.3390/app8020207>

Coleman, D. E., & Montgomery, D. C. (1993). A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*. <https://doi.org/10.2307/1269285>

Cong, B., Ding, J., & Williams, S. (2014). Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1593–1606. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6346-x>

Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 672-686. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>

da Silva, L. J. (2019). *NEAR-IMMERSION ACTIVE COOLING FOR WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING: FROM CONCEPT TO APPLICATION*. Uberlândia.

da Silva, L. J., Souza, D. M., Araújo, D. B., Saad, N. d., Reis, R. P., & Scotti, A. (2018). Gerenciamento Térmico via Resfriamento Ativo por Quase-imersão Aplicado à Manufatura Aditiva por Fusão-Deposição a Arco. *Anais XLIV Congresso Nacional de Soldagem*.

Denlinger, E. R. (s.d.). Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys. *J. Mater. Process. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.030>

Derekar, K., Lawrence, J., Melton, G., Addison, A., Zhang, X., & Xu, L. (2018). Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium. *The 71st IIW Annual Assembly and International Conference*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926905001>

Digital Alloys. (13 de Dezembro de 2018). *Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing – Part 3 - Process Steps in the Metal Additive Manufacturing Workflow*. Fonte: Digital Alloys. Disponível em: <https://www.digitalalloys.com/blog/process-steps-metal-additive-manufacturing-workflow/>

Digital Alloys. (31 de Janeiro de 2019). *Digital Alloys' Guide to Metal Additive Manufacturing – Part 5 - Economics of Metal Additive Manufacturing*. Fonte: Digital Alloys. Disponível em: <https://www.digitalalloys.com/blog/economics-metal-additive-manufacturing/>

Dinda , G. P., Dasgupta, A. K., & Mazumder, J. (2009). Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microestrutural evaluation and thermal stability. *Materials Science and Engineering A*, 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.009>

Ding, D. H., Pan, Z. X., Cuiuri, D., Li, H. J., & Larkin, N. (2016). Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *Journal of Clean Production*, 942-952. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.036>

Felice, I. O., Souza, D. M., da Silva, L. J., de Araújo, D. B., & Reis, R. P. (2019). Avaliação Preliminar de Método de Escaneamento a Laser para Análise Geométrica de Pré-formas Fabricadas por Manufatura Aditiva por Fusão-Deposição a Arco. *Anais 29º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica*. <https://ssl4799.websitesequero.com/swqe5/PROCEEDINGS/>

Frazier, W. E. (08 de Abril de 2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, p. 12. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

Fronius. (2015). *CMT Advanced*. Disponível em: <https://www.fronius.com/>

Geng, H., Li, J., Xiong, J., & Lin, X. (2017). Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 472–483. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1259031>

Hagqvist, P., Sikström, F., & Christianss, A.-K. (02 de 2013). Emissivity estimation for high temperature radiation pyrometry on Ti–6Al–4V. *Measurement*, pp. 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10.019>

Haselhuhn, A. S., Buhr, M. W., Wijnen, B., Sanders, P. G., & Pearce, J. M. (2016). Materials Science & Engineering A Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing. *Mater. Sci. Eng. A* 673, pp. 511 -523. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.099>

Henckell, P., Günther, K., Ali, Y., Bergmann, J. P., Scholz, J., & Forêt, P. (2017). The influence of gas cooling in context of wire arc additive manufacturing a novel strategy of affecting grain structure and size. *146 th Annual Meeting Exhibition Supplemental Proceedings*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51493-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51493-2_15)

International, A. (2012). *ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken, PA, USA.

ISO. (2015). *ISO/CD 25178-600 - Geometrical product specifications (GPS)—surface texture: areal—part 600: metrological characteristics for areal-topography measuring methods*.

Jamshidinia, M., & Kovacevic, R. (2015). The influence of heat accumulation on the surface roughness in powder-bed additive manufacturing. *Surface Topography Metro. Prop.* <https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/1/014003>

Li, Z., Liu, C., Xu, T., Ji, L., Wang, D., Lu, J., & Ma, S. (2018). Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy. *Mater. Sci. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.022>

Lu, X., Zhou, Y. F., Xing, X. L., Shao, L. Y., Yan, Q. X., & Gao, S. Y. (2017). Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2145-2154. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0636-z>

LumaSense. (2019). *Infrared Thermometer Handbook*.

Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y., & Loh, H. T. (01 de 04 de 2004). Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes. *Rapid Prototyping Journal*, p. 13. <https://doi.org/10.1108/13552540410526999>

Martina, F., Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrov, P., & Wang, F. (2012). Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive. *Journal of Material Processes Technology*, 1377-1386. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>

METROLOGY, J. C. (2018). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.

Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. (2018). Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique. *Additive Manufacturing*, 479-486. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.007>

Montgomery, D. C. (1997). *Introduction to statistical quality control*. New York.

Ortega, A. G., Galvan, L. C., Deschaux-Beaume, F., Mezrag, B., & Rouquette, S. (2018). Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process. *Science and Technology of Welding and Joining*, 316-332. <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1388995>

Ramirez, D. A., Murr, L. E., Li, S. J., Tian, Y. X., Martinez, E., Martinez, J. L., . . . Wicker, R. B. (2011). Open-cellular copper structures fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Materials Science Engineering*, 5379-5386. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.053>

Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*, 1-42. <https://doi.org/10.3390/ma12071121>

Ryan, E. M., Sabin, T. J., Watts, J. F., & Whiting, M. J. (2018). The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. *J. Mater. Process. Tech.* 262, pp. 577-584. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.030>

Souza, D. M. (2017). *Estudo de diferentes estratégias de resfriamento de paredes de alumínio fabricadas por manufatura aditiva a arco elétrico*. Uberlândia.

Spierings, A. B., & Schneider, M. (2011). Comparison of density measurement techniques for additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyping Journal*. <https://doi.org/10.1108/13552541111156504>

Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Chandrasekhar, U., & Somashekara, M. A. (2013). A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. <https://doi.org/10.1177/0954405413482122>

Tanaka, W. (28 de maio de 2018). *Cálculo de incerteza de medição – Parte 2*. Disponível em: <https://softwaredecalibracao.com.br/blog/calculo-de-incerteza-de-medicao-parte-2/>

Thomsen , P., Malmström , J., Emanuelsson , L., Rene , M., & Snis, A. (2009). Electron beam-melted, free-form-fabricated titanium alloy implants: material surface characterization and early bone response in rabbits. *Journal of Biomedical Materials*, 35-44. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31250>

Townsend, A., Blunt, L., & Bills, P. (2016). Investigating the capability of microfocus x-ray computed tomography for areal surface analysis of additively manufactured parts (in final stage of review). Dimensional accuracy and surface finish in additive manufacturing. *ASPE 2016 summer topical meeting*. Disponível em: <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/29023/>

Townsend, A., Senin, N., Blunt, L., Leach, R. K., & Taylor, J. S. (2016). Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precision Engineering*, 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001>

Vayssettea, B., Saintiera, N., Bruggera, C., Elmaya, M., & Pessard, E. (2018). Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life. *Procedia Engineering*, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.010>

Vyas, C., Poologasundarampillai, G., Hoyland, J., & Bartolo, P. (31 de julho de 2017). 3D printing of biocomposites for osteochondral tissue engineering. *Biomedical Composites (Second Edition)*, pp. 261-302. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100752-5.00013-5>

Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., & Antonysamy, A. A. (2013). Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. *Metall. Trans*, 968-977. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>

Wang, H., Jiang, W., Ouyang, J., & Kovacevic, R. (2004). Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.058>

Wang, X., Wang, A., & Li, Y. (2019). An online surface height measurement method for GTAW-based additive manufacturing. *Weld World*. 64, 11–20 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00813-1>

Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*, 641-647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>

Wu, B., Ding, D., Pan , Z., Cuiuri , c., Li , H., Han , J., & Fei, Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in wire arc additive

manufacturing of Ti 6 Al 4 V . *Journal of Materials Processing Technology*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>

Wu, B., Pan , Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., & Fei , Z. (2018). The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *J. Mater. Process. Tech.* <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024>

Xiong, J., Li, Y., Li, R., & Yin, Z. (2018). Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer singlepass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Tech.*, 128-136.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>

Xiong, J., Zhang, G., & Zhang, W. (2015). Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 1767-1776.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7112-4>

Zhao, H. e. (2011). A dynamic 3D analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 488-495.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.002>

Zhao, H. e. (2012). Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.012>