

DANIELLE MONTEIRO SOUZA

**EFEITO DO RESFRIAMENTO ATIVO POR
QUASE-IMERSÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE PRÉ-FORMAS DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2021

DANIELLE MONTEIRO SOUZA

**EFEITO DO RESFRIAMENTO ATIVO POR
QUASE-IMERSÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
PRÉ-FORMAS DE ALUMÍNIO FABRICADAS POR
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
Mecânica – FEMEC-UFU, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

VERSÃO FINAL

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

Uberlândia - MG

2021

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

S729e
2021

Souza, Danielle Monteiro, 1993-
Efeito do resfriamento ativo por quase-imersão nas propriedades mecânicas de pré-formas de alumínio fabricadas por manufatura aditiva por deposição a arco [recurso eletrônico] / Danielle Monteiro Souza. - 2021.

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.2021.5523>
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

Glória Aparecida – CRB-6/2047
Bibliotecária



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, nº 583, COPEM				
Data:	30/04/2021	Hora de início:	16:00	Hora de encerramento:	18:15
Matrícula do Discente:	11822EMC002				
Nome do Discente:	Danielle Monteiro Souza				
Título do Trabalho:	Efeito do Resfriamento Ativo por Quase-Imersão nas Propriedades Mecânicas de Pré-Formas de Al Fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco				
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 - Desenvolvimento de Novas Tecnologias em Fabricação por Processos a Arco Elétrico				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; José Antônio Esmerio Mazzaferro - UFRGS; e Ruham Pablo Reis - FEMEC/UFU, orientador da candidata. Ressalta-se que os Prof. Ruham Pablo Reis, Rosemar Batista da Silva e a Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, e o Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro desde a cidade de Porto Alegre/RS, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Ruham Pablo Reis, apresentou a Comissão Examinadora e a candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da 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):

Aprovada.

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 30/04/2021, às 18:17, 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 **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2021, às 18:21, 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 **José Antonio Esmerio Mazzaferro, Usuário Externo**, em 30/04/2021, às 18:21, 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, informando o código verificador **2732868** e o código CRC **D5E21FFF**.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados ao Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Uberlândia pela qualidade de ensino e pesquisa, pelos profissionais e recursos disponibilizados. Ressalto o apoio dos laboratórios LAPROSOLDA e Laboratório de Tribologia e Materiais e também do Laboratório de Materiais de Construção Civil-LABMAT da Faculdade de Engenharia Civil, bem como dos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG.

De maneira especial sou muito grata ao meu orientador Prof. Dr. Ruham Reis, cujo dom na docência quando somado ao respeito e dedicação à pesquisa brasileira o torna um profissional singular. Ruham me orientou em cada passo deste trabalho se mostrando um líder nato ao tratar com prontidão, paciência e competência todos os meus questionamentos.

Direciono também meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Leandro Silva que se fez presente em todas as fases desta pesquisa me suportando e contribuindo. Destaco a importante participação dos colegas Dr. Diandro Fernandes, Prof. Dr. Douglas Araújo, Profa. Dra. Nubia Santos, Me. Igor Felice e Dr. Daniel Dominices.

Concluir este trabalho só foi possível em virtude de todo apoio recebido dos meus pais Eliton e Vilma, que além de educadores são os grandes incentivadores de meu crescimento profissional.

*“Nós todos não podemos ser bem sucedidos
quando metade de nós é retida.”
(Malala Yousafzai)*

RESUMO

SOUZA, D. M. **Efeito do Resfriamento Ativo por Quase-Imersão nas Propriedades Mecânicas de Pré-Formas de Alumínio Fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.** 2021. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2021.

A Manufatura Aditiva (MA) vem ganhando cada vez mais espaço no cenário produtivo por sua alta versatilidade principalmente na construção de geometrias complexas e personalizadas e na redução do desperdício de material, crescendo em paralelo a necessidade de se investigar e determinar a interação de materiais e parâmetros do processo. Em se tratando de metais uma das principais preocupações relacionadas a estas necessidades são as consequências do acúmulo de calor nas pré-formas durante a deposição, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a produtividade e qualidade mecânica de paredes de alumínio AWS ER5356 produzidas por MA por deposição a arco (MADA), no caso com o processo CMT, quando submetidas a uma tecnologia de gerenciamento térmico recentemente desenvolvida denominada Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (Near Immersion Active Cooling - NIAC). São avaliadas as influências da velocidade de deposição (V_d), velocidade de alimentação (V_a) de material e da distância do nível de resfriamento em relação ao nível de deposição (h) nos resultados térmicos e mecânicos. A fim de comparação, foram produzidas pré-formas submetidas ao NIAC, a um resfriamento natural (com longas paradas de deposição/energia entre as camadas) e sem contar com nenhum tipo de resfriamento durante a deposição (sem paradas de deposição/energia entre as camadas). Diante das dificuldades de se levantar as propriedades em ensaio de tração, tanto na direção de comprimento quanto da altura das pré-formas, foram utilizados corpos de prova em miniatura e empregada medição de deformação por imagem. Os resultados mostraram que termicamente a técnica NIAC e o resfriamento natural se destacam positivamente na dissipação do calor imposto, sendo as variáveis V_a e h as mais influentes em primeiro grau nos resultados da medida de temperatura de interpasse. No que tange aos resultados de qualidade mecânica, uma análise micrográfica mostra refino de grão na zona da linha de fusão entre as camadas, porém todas as amostras avaliadas apresentam também regiões com grãos maiores, o que pode estar relacionado com os resultados muito similares de deformação total e limite de resistência à tração e microdureza ao se comparar as pré-formas obtidas com as três abordagens de resfriamento, que em geral também não apresentaram fortes influências de alguma das variáveis de interesse. Foi observado, porém, que a técnica de gerenciamento térmico NIAC apresenta um limite de aplicação, visto que um baixo nível de h pode prejudicar tanto a deformação total quanto o limite de resistência a tração obtidos. Assim, é possível afirmar que a técnica NIAC é eficiente na redução do acúmulo de calor durante a deposição sem comprometer a qualidade mecânica dos componentes produzidos e pode ser até 3,5 vezes mais produtiva em termos do tempo de produção na etapa de MA.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), AWS ER5356, Propriedades Mecânicas, Corpos de Prova em Miniatura.

ABSTRACT

SOUZA, D. M. **Effect of Near-Immersion Active Cooling on Mechanical Properties of Aluminum Preforms Manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing**. 2021. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2021.

Additive Manufacturing (AM) has been gaining ground in the production scenario due to its high versatility, mainly in the construction of complex and personalized geometries and in the reduction of material waste, growing in parallel the need to investigate and determine the interaction of materials and process parameters. Considering that one of the main related concerns is the consequences of heat accumulation in the preforms stage during material deposition, the present work has the general objective of evaluating the productivity and mechanical quality of AWS ER5356 aluminum walls produced by wire arc additive manufacturing (WAAM), in this case with the Cold Metal Transfer (CMT) process, when subjected to a recently developed thermal management technology called Near-Immersion Active Cooling (NIAC). The influences of the deposition speed (V_d), material feeding speed (V_a) and the layer edge to water distance (h) on the thermal and mechanical results are evaluated. For comparison, preforms were produced submitted to NIAC, to a natural cooling (with long stops of deposition/energy between the layers) and without any type of cooling during the deposition (without stops). In view of the challenges related to detecting mechanical properties in tensile tests, both in the length and height directions the preforms, miniature specimens were used and deformation measurement by image was applied. The results showed that thermally the NIAC technique and natural cooling stand out positively in the dissipation of the imposed heat, with variables V_a and h being the most influential in the results of the measure of interpass temperature. Regarding the results of mechanical quality, a micrographic analysis shows grain refinement in the melting zone line between the layers, but all samples evaluated also had regions with larger grains. It may be related to the very similar deformation, tensile strength and microhardness results when comparing the preforms obtained by the three cooling approaches, which in general also did not show strong influences of any of the variables of interest. However, it was observed that the NIAC technique for thermal management has an application limit, since a high level of h can degrade both the total deformation and the tensile strength obtained. Thus, it is possible to affirm that the NIAC technique is efficient in reducing the heat accumulation without jeopardizing the mechanical quality of the components produced and can be up to 3.5 times more productive in terms of production time at the AM stage.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM - CMT), AWS ER5356, Mechanical Properties, Miniature Tensile Specimens.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do funcionamento do NIAC	19
Figura 2 – Classificação de processos MA em metais	25
Figura 3 – Esquema de Funcionamento de <i>Powder Bed Fusion</i>	26
Figura 4 – Deposição por energia direcionada utilizando feixe de elétrons	26
Figura 5 – Ramificação de tecnologias de deposição por energia direcionada na MA . .	27
Figura 6 – Comparação entre processos de deposição por energia direcionada na MA de componentes aeroespaciais	27
Figura 7 – Custos que envolvem processos de deposição por energia direcionada na MA de componentes aeroespaciais	28
Figura 8 – Acúmulo de calor ao longo da deposição da liga Ti6Al4V por WAAM . . .	31
Figura 9 – Comparação entre diferentes tempos de espera durante deposição de aço ER309LSi	33
Figura 10 – Temperatura de interpasse em função do tempo de espera e do número de camadas para WAAM da liga Al5356	33
Figura 11 – Experimentos realizados para prova de viabilidade do conceito NIAC	35
Figura 12 – Vista lateral de pré-forma construída por WAAM com respectiva transferência de calor com o NIAC	36
Figura 13 – Resultados de câmara térmica para resfriamento natural, passivo e ativo NIAC	36
Figura 14 – Nível de porosidade para três abordagens de resfriamento	37
Figura 15 – Seção transversal de pré-formas produzidas por CMT Advanced com aplicação do NIAC	38
Figura 16 – Diferentes abordagens para medir a temperatura de interpasse na MA	39
Figura 17 – Configuração esquemática para DIC	40
Figura 18 – Procedimento experimental para aplicação de DIC em corpos de prova em miniatura	41
Figura 19 – Resultados comparativos de propriedades mecânicas	42
Figura 20 – Possibilidades de planejamento experimental	45
Figura 21 – Cubo PCC com valores da pesquisa	47
Figura 22 – Aparato experimental para deposição com NIAC: (1) sistema de movimentação, (2) tanque de trabalho, (3) tanque de água pressurizada, (4) sistema de aquisição de dados, (5) pirômetro, (6) tocha CMT, (7) sensor de nível do tipo flutuador magnético, (8) substrato.	49
Figura 23 – Definição do número de camadas das pré-formas (mm)	50

Figura 24 – Sistema hidráulico e pneumático para deposição com NIAC: (1) tanque de água pressurizada, (2) tanque de trabalho, (3) sensor de nível do tipo flutuador magnético, (4) válvulas e mangueiras, (5) controlador CNC.	50
Figura 25 – Posição relativa do pirômetro	52
Figura 26 – Seção transversal para análise de micrografia	53
Figura 27 – Ataque eletrolítico	54
Figura 28 – Eliminação das bordas	55
Figura 29 – Geometria de corpos de prova em miniatura	56
Figura 30 – Etapas de usinagem dos corpos de prova	56
Figura 31 – Aparato experimental para ensaios de tração: (1) corpo e prova em miniatura, (2) máquina de tração Shimadzu, (3) celular equipado de câmera, (4) luz LED	58
Figura 32 – Evolução por imagem da deformação em um CP	58
Figura 33 – Determinação da temperatura de interpasse para a pré-forma 18	59
Figura 34 – Ciclo térmico para pré-forma do ponto central com NIAC (corrida 16) . . .	61
Figura 35 – Ciclo térmico em detalhe da Figura 34	61
Figura 36 – Dados de temperatura do pirômetro à frente e atrás da poça de fusão (duas camadas) para pré-formas de pontos centrais (corridas 15, 17 e 20)	62
Figura 37 – Distribuição de temperatura comparativa entre as estratégias de resfriamento	62
Figura 38 – Valor predito versus resíduos para temperaturas de interpasse	64
Figura 39 – Superfície de resposta de temperatura de interpasse com variação de V_a e V_d em $h=20$ mm	64
Figura 40 – Superfície de resposta de temperatura de interpasse com variação de V_d e h em $V_a=7500$ mm/min	65
Figura 41 – Superfície de resposta de temperatura de interpasse variação de V_a e h em $V_d=800$ mm/min	65
Figura 42 – Micrografias comparativas	67
Figura 43 – Comparação de duas regiões de pré-formas	68
Figura 44 – Resultado de ensaio de tração preliminar	69
Figura 45 – Resultados de curva Tensão x Deslocamento para pré-forma 15 - Ponto Central NIAC	70
Figura 46 – Corpos de prova ensaiados	71
Figura 47 – Resultados de deformação comparativos entre as diferentes estratégias de resfriamento	71
Figura 48 – Deformação para corpos de prova de pré-formas NIAC	72
Figura 49 – Resultados de Limite de Resistência à Tração para pré-formas do Planejamento Composto Central NIAC	75
Figura 50 – Resultados de Limite de Resistência à Tração comparativos entre as diferentes estratégias de resfriamento	76
Figura 51 – Comparativo de tempo médio gasto por camada	77

Figura 52 – Linhas de tendência para tempo de espera entre passes - Resfriamento Natural	78
Figura 53 – Macrografias comparativas	78
Figura 54 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 1	88
Figura 55 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 2	88
Figura 56 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 3	89
Figura 57 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 4	89
Figura 58 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 5	89
Figura 59 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 6	90
Figura 60 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 7	90
Figura 61 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 8	90
Figura 62 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 9	91
Figura 63 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 10	91
Figura 64 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 11	91
Figura 65 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 12	92
Figura 66 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 13	92
Figura 67 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 14	92
Figura 68 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 15	93
Figura 69 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 16	93
Figura 70 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 17	93
Figura 71 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 18	94
Figura 72 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 19	94
Figura 73 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 20	94
Figura 74 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 21	95
Figura 75 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 22	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis e níveis de interesse	46
Tabela 2 – Corridas geradas pelo Planejamento Composto Central	47
Tabela 3 – Corridas geradas para comparação com a técnica NIAC	48
Tabela 4 – Lista de parâmetros de deposição	51
Tabela 6 – Composição química do arame AWS ER 5356	51
Tabela 8 – Escolha de amostras para análise de micrografia	53
Tabela 9 – Metodologias para medir distância entre retas paralelas	58
Tabela 10 – Resultados de Temperatura de Interpasse - Planejamento Composto Central	63
Tabela 11 – Resultados de Tamanho de Grão	66
Tabela 12 – Resultados de Deformação	73
Tabela 13 – Resultados de Limite de Resistência à Tração	74
Tabela 14 – Propriedades mecânicas comparativas para a Liga AWS ER5356	76
Tabela 15 – Resultados de Microdureza	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto Assistido por Computador)
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i> (Transferência Fria de Metal)
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
DED	<i>Directed Energy Deposition</i> (Deposição por Energia Direcionada)
DIC	<i>Digital Image Correlation</i> (Correlação Digital por Imagem)
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Planejamento de Experimentos)
EBPBF	Fusão por Feixe de Elétrons
GMA	<i>Gas Metal Arc</i>
GTA	<i>Gas Tungsten Arc</i>
LMD	Deposição de Metal a Laser
LPBF	Fusão de Leito de Pó a Laser
MA	Manufatura Aditiva
MS	Manufatura Subtrativa
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
NIAC	<i>Near-Immersion Active Cooling</i> (Resfriamento Ativo por Quase-Imersão)
PA	<i>Plasma Arc</i> (Arco Plasma)
PCC	Planejamento Composto Central
PLA	Plástico de Poliacido Láctico
PTA	<i>Plasma Transferred Arc</i> (Plasma com Arco Transferido)
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> (Fusão Seletiva a Laser)
Va	Velocidade de alimentação
Vd	Velocidade de deposição
WAAM	Wire + Arc Additive Manufacturing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização	17
1.2	Motivação	18
1.3	Justificativa	19
1.4	Objetivos	20
1.5	Estrutura da Dissertação	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Introdução	22
2.2	Manufatura Aditiva em Metais	24
2.3	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco	28
2.3.1	<i>Manufatura Aditiva de Alumínio</i>	29
2.3.2	<i>O acúmulo de Calor em WAAM</i>	30
2.3.3	<i>Técnicas de gerenciamento térmico para WAAM</i>	31
2.3.4	<i>O resfriamento ativo NIAC (Near-Immersion Active Cooling)</i>	35
2.3.5	<i>Técnicas de medição de temperatura na MA</i>	38
2.4	Técnicas de Rastreamento Digital de Imagens	39
2.5	Planejamento de Experimentos na Manufatura Aditiva	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	Fabricação das pré-formas	44
3.1.1	<i>Planejamento dos Experimentos</i>	44
3.1.2	<i>Materiais e Equipamentos</i>	48
3.1.3	<i>Execução da Deposição</i>	48
3.2	Análise Térmica	51
3.3	Micrografia	53
3.4	Propriedades Mecânicas	55
3.4.1	<i>Deformação e limite de resistência à tração</i>	55
3.4.2	<i>Microdureza</i>	59
3.5	Produtividade	59
4	RESULTADOS	60
4.1	Análise Térmica	60

4.2	Micrografias	66
4.3	Propriedades Mecânicas	69
4.3.1	<i>Deformação e Limite de Resistência à Tração</i>	69
4.3.2	<i>Microdureza</i>	76
4.4	Produtividade	77
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	79
5.1	Conclusões	79
5.2	Perspectivas Futuras	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A CURVAS TENSÃO X DESLOCAMENTO	88

INTRODUÇÃO

Neste capítulo o tema desta dissertação é apresentado em contextualização com os principais acontecimentos que envolvem a manufatura aditiva de metais. Em seguida, são apresentadas as motivações e justificativas que levaram aos objetivos gerais e específicos deste trabalho, também aqui introduzidos. Por fim, a estrutura da dissertação é exposta.

1.1 Contextualização

A Manufatura Aditiva (MA) vem ganhando espaço no cenário dos processos de fabricação. Uma das razões é a alta versatilidade na construção de geometrias complexas quando comparada, por exemplo, à manufatura subtrativa comumente empregada em processos de fabricação, por exemplo, o torneamento e fresamento. As vantagens incluem a redução de desperdício de material e consumo de energia (HUANG *et al.*, 2015). Em particular, adicionar materiais camada por camada para criar objetos reduz bastante os resíduos. Na fabricação aeroespacial tradicional, por exemplo, as peças de titânio normalmente na liga Ti6Al4V, são usinadas em tamanho reduzido a partir de grandes blocos de titânio, que dependendo da aplicação, podem gerar mais de 90% em resíduos que não podem ser reutilizados prontamente (HUANG *et al.*, 2015). A MA promete a fabricação monolítica de muitas peças tradicionalmente montadas que proporciona uma importante redução de peso devido à remoção dos elementos de fixação, o que também pode ser uma grande vantagem em aplicações de estruturas leves, como os setores aeroespacial e automotivo (ROBINSON; SCOTT, 2014). Outra importante característica, é que a MA pode acelerar a entrega de produtos tanto no cenário industrial quanto acadêmico pela capacidade de desenvolver rápidos projetos, prototipagem e testes (DUTTA; FROES, 2015). Segundo Bandyopadhyay e Bose (2019), a MA permite que as pessoas contribuam para o processo de projeto em praticamente qualquer local e rompe as barreiras da engenharia localizada emergindo em escala global. Desta forma, é possível compartilhar rapidamente a solução de um problema ou otimização de um processo com diferentes instituições do mundo.

Na atualidade a MA pode ser aplicada em uma grande diversidade de materiais. Apesar de muito popular com os plásticos, ela também é capaz de manufaturar cerâmicos, compósitos, metálicos e outros. Para se trabalhar com essa heterogeneidade, muitos processos dentro da MA são criados em busca de atender a diferentes necessidades, incluindo materiais, dimensões e qualidade superficial, dentre outros. Em se tratando de metais, que é a abordagem deste trabalho, segundo Thomas-Seale *et al.* (2018), há dois processos na MA que se destacam: a fusão em leito de pó, do inglês *Powder Bed Fusion* (PBF) e a deposição por energia direcionada, originalmente *Directed Energy Deposition* (DED). As tecnologias PBF fundem seletivamente a matéria-prima (pó) na área de construção usando energia térmica (feixe laser ou feixe de elétrons), enquanto o DED usa uma fonte de energia térmica focada/direcionada (feixe laser, feixe de elétrons ou arco elétrico) para fundir materiais (pó ou arame) enquanto são depositados (ASTM, 2015). Por conta do custo de investimento em maquinário, disponibilidade e custo de matéria prima, os processos PBF apesar de serem muito mais vantajosos em qualidade superficial e complexidade perdem espaço para tecnologias DED, como por exemplo, para a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM) (Manufatura Aditiva por Deposição a Arco). Dentre suas características, destacam-se alta taxa de deposição e um acabamento superficial de qualidade inferior, quando comparada com outros processos de MA.

1.2 Motivação

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (WAAM) utiliza arco elétrico como fonte de energia e arame metálico como matéria-prima, semelhante aos processos de soldagem com proteção a gás. Isto faz com que a implementação seja facilitada tanto no setor industrial quanto em ambientes acadêmicos, uma das razões pelas quais é adotado neste trabalho.

Dentre os desafios inerentes à introdução de tal rota de fabricação na indústria, pode se dizer que o superaquecimento das regiões de deposição de material é o principal adversário da manufatura aditiva, principalmente com processos de deposição com energia direcionada, o que é o caso dos processos de MA por deposição a arco. No caso do processo WAAM, o acúmulo de calor se torna crítico à medida que a altura depositada aumenta, especialmente na fabricação de componentes de parede fina, possivelmente devido à maior restrição à dissipação de calor. Isto irá causar, por exemplo, perdas na qualidade da superfície (YANG; HE; ZHANG, 2016), uma vez que o calor se acumula e a poça/parede não se sustenta de forma adequada. Na tentativa de mitigar esta desvantagem, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para reduzir estes e outros efeitos deletérios que surgem da energia térmica excessiva.

Apesar de existirem abordagens para mitigar o acúmulo de calor, cada uma com sua vantagem e limitação, o grande desafio é fazê-lo sem reduzir a produtividade e independentemente da geometria da pré-forma. Nesse sentido, o presente trabalho baseia-se na exploração de uma abordagem de gerenciamento térmico denominada de *Near-Immersion Active Cooling* (NIAC),

ou Resfriamento Ativo por Quase-Imersão, recentemente desenvolvida por Silva *et al.* (2020). Nessa abordagem, a pré-forma é depositada dentro de uma cuba, onde o nível de água sobe na medida em que as camadas são depositadas. A Figura 1 ilustra de forma simplificada o NIAC.



Figura 1 – Representação esquemática do funcionamento do NIAC

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

Vale destacar que Silva *et al.* (2020) demonstraram o potencial do NIAC para mitigar a anisotropia das peças, mas isso foi feito com parâmetros de deposição limitados e somente com uma condição de deposição e com apenas um nível “h” (parâmetro de controle de atuação) do NIAC (como indicado na Figura 1).

1.3 Justificativa

Huang *et al.* (2015) afirmam que em MA são necessárias pesquisas para entender como os parâmetros do processo afetam as propriedades do material e o desempenho da peça, incluindo resistência, ductilidade, tenacidade, tensão residual, precisão geométrica e estabilidade, bem como coordenar o fluxo de material com controle de movimento da máquina e a taxa de deposição de material. Huang *et al.* (2015) também ressaltam que é necessário preparar um banco de dados das propriedades mecânicas das peças fabricadas por MA e determinar a interação entre os materiais e os parâmetros do processo para garantir a qualidade do produto final. Por exemplo, na metalurgia leva-se cerca de 10 anos para desenvolver uma nova liga, incluindo a determinação de várias propriedades críticas e na MA o rigor não deve ser diferente. Dutta e Froes (2015) afirmam que para se obter melhorias em propriedades mecânicas são necessários mais subprocessos dentro da MA. O NIAC entra, portanto, como exemplo de um processo secundário dentro da MA suprimindo parte desta necessidade e contribuindo para que este processo de fabricação se torne cada vez mais completo e funcional.

Porém, para peças fabricadas por manufatura aditiva essa verificação de propriedades mecânicas nem sempre é trivial, pois levaria muito tempo para construir pré-formas grandes o suficiente para amostras padrão, que em seguida passariam por testes mecânicos clássicos. Além

disso, o tamanho tradicional dos corpos de prova, pode levar a altos custos de produção e muitas vezes ter sua construção limitada pelos envelopes de construção de equipamentos de manufatura aditiva. Uma solução encontrada por Lu *et al.* (2017), foi a miniaturização de corpos de prova. Com dimensões de 8 mm de comprimento de pescoço, surgem alguns desafios quanto à forma de tomada de propriedades durante o ensaio mecânico, como de tração, por exemplo. Neste sentido, a necessidade leva a alternativa de análise de imagens como um método de se obter respostas de deformação mecânica e outras propriedades relacionadas.

1.4 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade mecânica de paredes de alumínio da liga AWS ER5356 produzidas por manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM-CMT) e submetidas a um método de resfriamento ativo, no caso o NIAC, visando aplicação para estruturas leves.

Os objetivos específicos serão em termos de avaliar experimentalmente a influência dos seguintes fatores nas propriedades mecânicas (parâmetros de resistência, dureza e deformação a partir de ensaio de tração) de pré-formas (paredes) e a relação com o histórico térmico da deposição, além da quantificação de um índice de produtividade (tempo de deposição) para uma larga faixa operacional:

- Velocidade de alimentação (V_a);
- Velocidade de deposição (V_d);
- Distância do nível do líquido de resfriamento (lâmina d'água) em relação ao nível de deposição (h);

Destaca-se dentro desses objetivos específicos o desenvolvimento e validação de uma metodologia para a determinação de deformação (e propriedades mecânicas relacionadas) em corpos de prova em miniatura.

1.5 Estrutura da Dissertação

- Capítulo 2 – A Manufatura Aditiva é apresentada com suas características, classificações, vantagens e limitações. Os principais processos envolvidos na impressão de metais são comparados bem como o uso do alumínio na MA é destacado. Faz-se referência ao o acúmulo de calor durante a deposição como principal limitação e suas consequências são levantadas;

- Capítulo 3 – É apresentada toda a metodologia do trabalho: planejamento experimental, materiais, equipamentos, aparato experimental, parâmetros de deposição, e outros.
- Capítulo 4 – Os principais efeitos que envolvem a variação de parâmetros durante a deposição de alumínio na WAAM são demonstrados em forma de resultados térmicos, de qualidade mecânica e de produtividade;
- Capítulo 5 – Este capítulo resume os principais aspectos abordados por este trabalho através das principais conclusões sobre os métodos e abordagens apresentadas e quais são as próximas propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão enunciados os principais estudos relacionados à produção de metais através da manufatura aditiva a arco elétrico. Serão introduzidas as características de um produto manufaturado por MA e em seguida serão discutidos os processos e limitações da impressão de metais, uma vez que este trabalho é focado na manufatura do alumínio. É importante também entender como o acúmulo de calor pode influenciar o produto final de peças produzidas por MA e como estratégias de resfriamento vêm sendo desenvolvidas. Este capítulo também conta com a abordagem de técnicas de correlação de imagens digitais (*Digital Image Correlation* (Correlação Digital por Imagem) (DIC)) e de planejamento de experimentos, que são importantes elementos chaves deste trabalho.

2.1 Introdução

Comumente conhecida como "impressão 3D", a MA constrói camada por camada, a partir de modelos de projeto auxiliado por computador (*Computer Aided Design* (Projeto Assistido por Computador) (CAD)) objetos tridimensionais físicos usando materiais metálicos, plásticos, cerâmicos, compostos ou biológicos. A MA de plásticos vem ganhando espaço e se popularizando nos últimos anos em função do baixíssimo investimento necessário para aquisição de impressoras de fabricação por filamento fundido (entre os mais comuns estão o Plástico de Poliácido Láctico (PLA)) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)). Já existem diversos modelos de equipamentos para tal no mercado com os mais variados preços, permitindo que desde o pequeno empreendedor até as grandes empresas tenham acesso a essa tecnologia.

Indo na contramão de processos de fabricação convencionais, que são baseados na remoção de material e por isso constituem a Manufatura Subtrativa (MS), a MA é vantajosa em diversos pontos. Para determinar se a MA ou MS em um tipo de produto são adequados à finalidade é preciso avaliar o volume de produção, personalização e complexidade do produto

final. Em geral, segundo Pereira, Kennedy e Potgieter (2019) grandes volumes de produção são mais adequados para a fabricação utilizando métodos tradicionais, no entanto, quanto maior a complexidade ou a personalização necessária, a MA se torna mais adequada. Diferenças, vantagens e desvantagens encontradas na MA em relação à MS se dão no âmbito econômico, ambiental e qualidade final dos produtos. A clara vantagem da MA em relação à MS em termos de impacto ambiental é o desperdício reduzido de materiais e recursos, que vem de encontro ao sistema de produção enxuto *Lean Manufacturing*, reduzindo em conjunto os custos com matéria prima. Esta redução se faz ainda mais importante quando se trata de commodities caras e sofisticadas. Por exemplo, os materiais utilizados na indústria aeroespacial precisam conciliar boas propriedades mecânicas com peso reduzido, necessitando de altos investimentos no uso de titânio para confecção de diversos componentes. Segundo Dutta e Froes (2015), no passado, a melhoria da usinabilidade das ligas de titânio era vista como uma melhoria promissora do processo, a fim de produzir peças de titânio mais baratas. Hoje em dia, porém, os processos de MA para estas ligas se tornaram um grande interesse econômico.

Combinar tecnologias de manufatura aditivas e subtrativas está ganhando atenção significativa por além de não tirar as vantagens de técnicas independentes minimiza suas limitações (PARIS; MANDIL *et al.*, 2018). Por exemplo, deposição de metais através de laser foi integrada à usinagem CNC como um processo híbrido por (LIOU *et al.*, 2007). O objetivo foi montar um sistema híbrido para construir uma peça na menor quantidade de tempo possível, encontrando o mínimo de trocas entre ferramentas de deposição e remoção de material. Foram economizados de 50 a 60 % do tempo de construção com resultados bem similares aos obtidos com usinagem puramente dita.

Outra importante característica da MA é que projetos simples e complexos podem ser carregados em nuvem a partir de um modelo CAD e impressos em poucas horas, garantindo que uma inovação originada em qualquer parte do mundo possa ser compartilhada com todos os países. Particularmente, durante o início da pandemia Covid-19 em abril de 2020, diversas aplicações foram desenvolvidas através da MA e compartilhadas na internet na tentativa de mitigar contaminações e reduzir número de óbitos em todo o mundo. Nos Estados Unidos, por exemplo, foi desenvolvido um novo conceito de máscara de proteção. Um suporte de fácil montagem e reutilizável produzido por MA consiste em duas cestas plásticas idênticas entre as quais qualquer material de filtro (lenço de papel, algodão, etc.) pode ser inserido (SHER, 2020a). Um adaptador foi criado também em MA para que um único ventilador pudesse ser usado por dois pacientes não críticos até que ventiladores individuais estivessem disponíveis (SHER, 2020b).

A MA possui sérias limitações, entre elas, a produção em massa, dificuldade em certificação de novos processos e materiais, alto investimento em equipamentos dependendo do material em questão e necessidade de pós processamento dos produtos (acabamento, tolerância dimensional, etc.). Ainda considerando todas as limitações e os diversos tipos de material e

tecnologias existentes, é possível encontrar aplicações em diversas áreas da indústria, incluindo automotiva, aeroespacial, biomédica, energia, bens de consumo, engenharia de alimentos e muitos outros (HUANG *et al.*, 2015). Se torna cada vez mais nítida a importância e necessidade de se estudar e pesquisar sobre a MA, seus processos, tecnologias e materiais.

2.2 Manufatura Aditiva em Metais

Trabalhar com a MA de metais tem se tornado cada vez mais promissor. Por exemplo, alguns componentes aeroespaciais têm geometrias complexas e geralmente são feitos de materiais avançados, como ligas de titânio, superligas de níquel, aços especiais, entre outros. Estes materiais podem ser difíceis, dispendiosos e demorados de se fabricar utilizando processos convencionais de fabricação, como o torneamento ou fresamento, por exemplo. Por isso, as tecnologias MA são altamente adequadas para aplicações como as direcionadas à indústria aeroespacial, uma vez que elimina ou reduz as etapas de usinagem economizando tempo e matéria prima (HUANG *et al.*, 2015).

Os processos de MA para peças metálicas podem ser classificados em relação às tecnologias usadas ou com base no estado da matéria prima utilizada. Quanto às tecnologias existem quatro sub-classificações: fusão em leito de pó, jato aglutinante, laminação e deposição com energia direcionada (ASTM, 2012). Nesse sentido, na Figura 2 são apresentadas esquematicamente as tecnologias de MA para metais e suas respectivas ramificações.

A fusão em leito de pó, muito comumente conhecida como *Powder Bed Fusion* (PBF) é uma tecnologia que envolve a fundição do material em pó (polímeros, cerâmicas, metais, dentre outros) através do uso de feixe laser ou feixe de elétrons. O feixe laser está acoplado a uma plataforma que se movimenta em duas direções e o material fica armazenado em um tanque e é transferido em cada camada por um rolo ou lâmina. Uma vez que o laser é direcionado ao material, ele se funde e o tanque é movimentado para baixo para dar início a outra camada de material, conforme ilustrado na Figura 3. Quanto à Manufatura Aditiva por jato aglutinante, ela é um processo também baseado em pó. É composto por uma plataforma que se movimenta na direção z, um cabeçote que despeja um líquido aglutinante e um rolo para espalhar o pó. Quando entra em contato com o material aglutinante, o material se solidifica e com a movimentação da plataforma em cada camada a peça final é concluída (COELHO, 2018). A laminação, *Sheet Lamination*, é uma tecnologia que utiliza lâminas de materiais empilhadas que podem ser unidas por adesivos, quimicamente, por brasagem ou soldagem ultrassônica. Um laser corta as regiões necessárias, as bordas são direcionadas ao sistema de refugo e uma nova camada se inicia até que a peça esteja finalizada (ARAÚJO, 2018). A deposição com energia direcionada, originalmente *Directed Energy Deposition* (Deposição por Energia Direcionada) (DED) recebe este nome por necessariamente possuir uma fonte de energia direcionada diretamente para a matéria prima, seja ela metais, cerâmicos ou polímeros. Tecnologias DED podem possuir como fonte de energia feixe

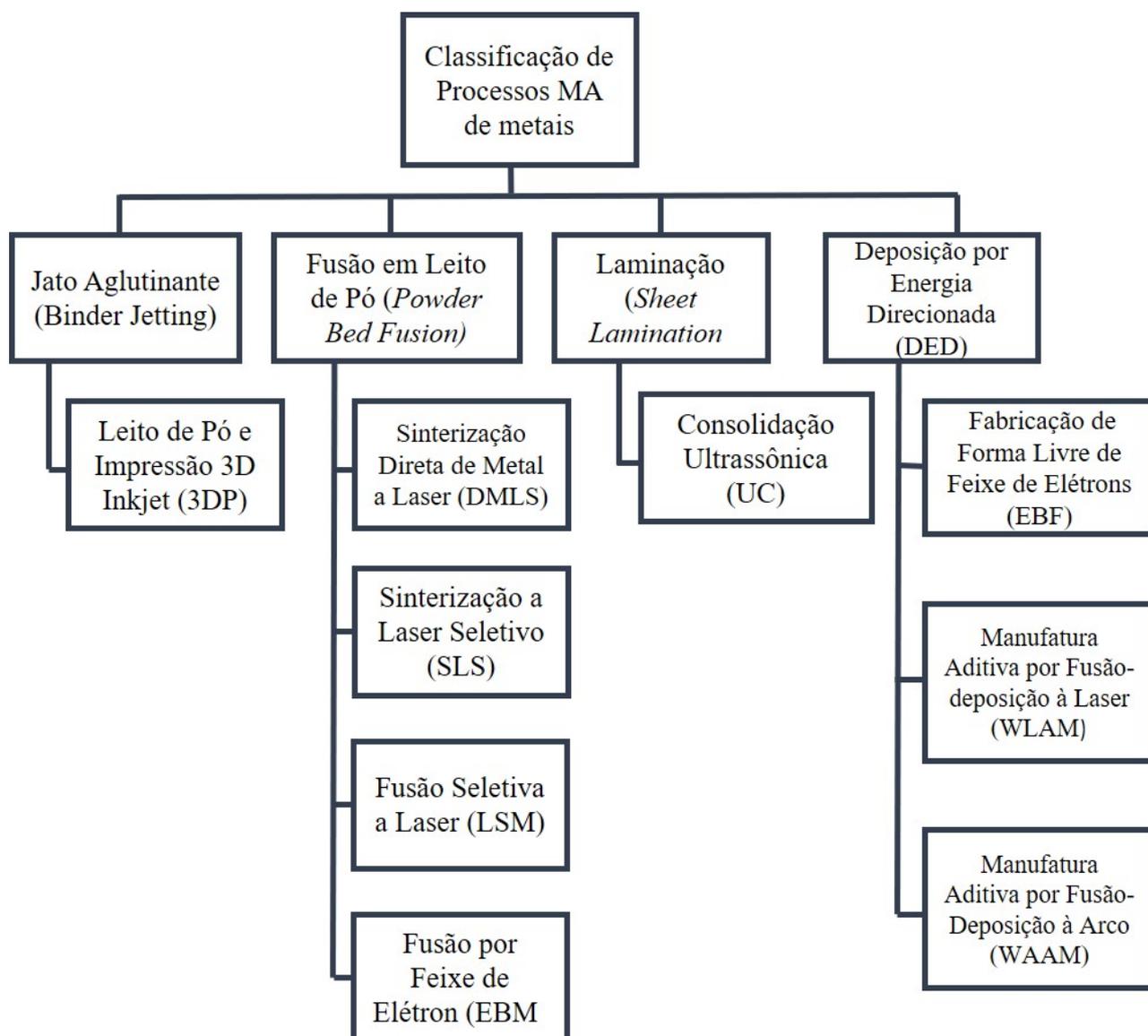
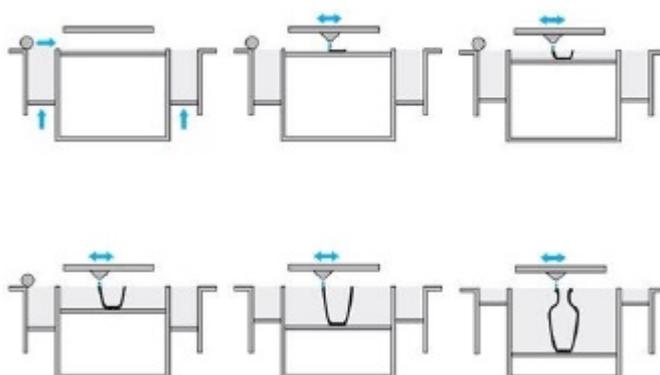


Figura 2 – Classificação de processos MA em metais

Fonte: Adaptada de Li *et al.* (2019).

de elétrons, laser, plasma ou arco elétrico. A matéria prima (arame ou pó) é fundida à medida que a fonte de calor atua e em seguida é gotejada ou pulverizada em uma poça de fusão que se solidifica com o controle do movimento da fonte e da alimentação do material (HUCKSTEPP, 2019) (ASTM, 2016). Observa-se do esquema na Figura 4 o aparato de uma deposição por feixe de elétrons utilizando a matéria prima em forma de arame. Dentre estes processos os dois mais promissores para a MA são a fusão em leito de pó e a deposição com energia direcionada (THOMAS-SEALE *et al.*, 2018). A Figura 5 é incluída a fim de melhor entender a gama de tecnologias, fontes de fusão, tipo de matéria-prima e tipo de distribuição de material que estes principais processos oferecem na MA de metais. É claro que esta quantidade de tecnologias possui suas características e especificidades, evidenciando vantagens e desvantagens quando comparadas entre si. Para a MA na indústria, há alguns aspectos importantes de serem levados

Figura 3 – Esquema de Funcionamento de *Powder Bed Fusion*

Fonte: Franky (2014).

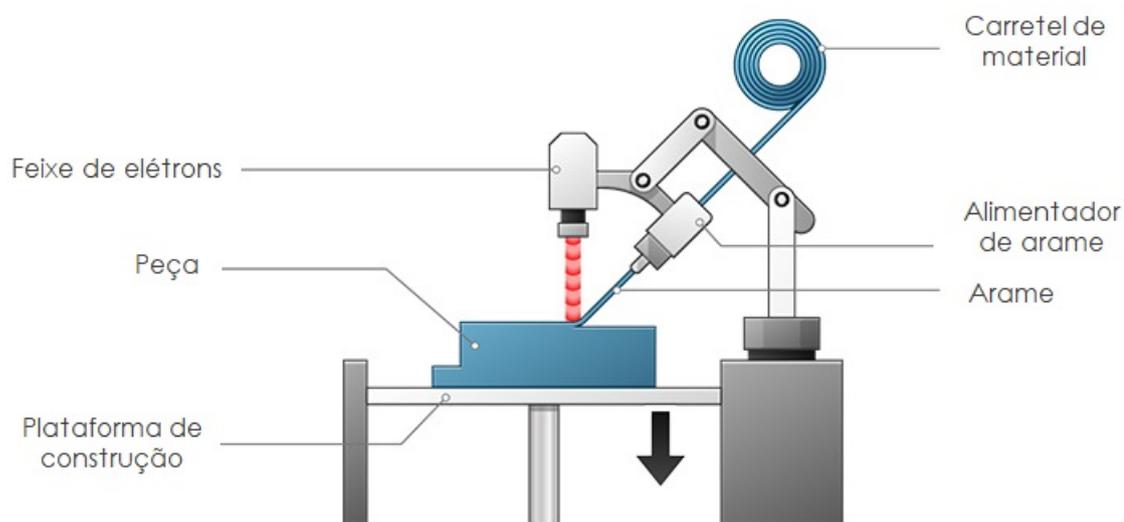


Figura 4 – Deposição por energia direcionada utilizando feixe de elétrons

Fonte: Adaptada de Carlota (2019).

em consideração na adoção de um processo de fabricação. No caso da MA de metais destacam-se a taxa de deposição (velocidade com que a peça é produzida), a complexidade que pode ser atingida, o volume máximo, a necessidade de pós processamento e as propriedades mecânicas finais. Garcia-Colomo *et al.* (2019) desenvolveram um estudo envolvendo quatro tecnologias de MA na fabricação de componentes metálicos empregados na indústria aeroespacial: Fusão por Feixe de Elétrons (EBPBF), Fusão de Leito de Pó a Laser (LPBF), Manufatura Aditiva à Arco Elétrico (WAAM) e Deposição de Metal a Laser (LMD). Eles selecionaram um total de dez parâmetros para serem avaliados em notas de 0 a 10, são eles: complexidade, precisão (exatidão dimensional), acabamento superficial, economias em geral (custos de operação e manutenção de maquinário), gasto de material (em termos financeiros de matéria prima), propriedades mecânicas, necessidade de pós processamento, flexibilidade (o quão flexível pode ser a plataforma de

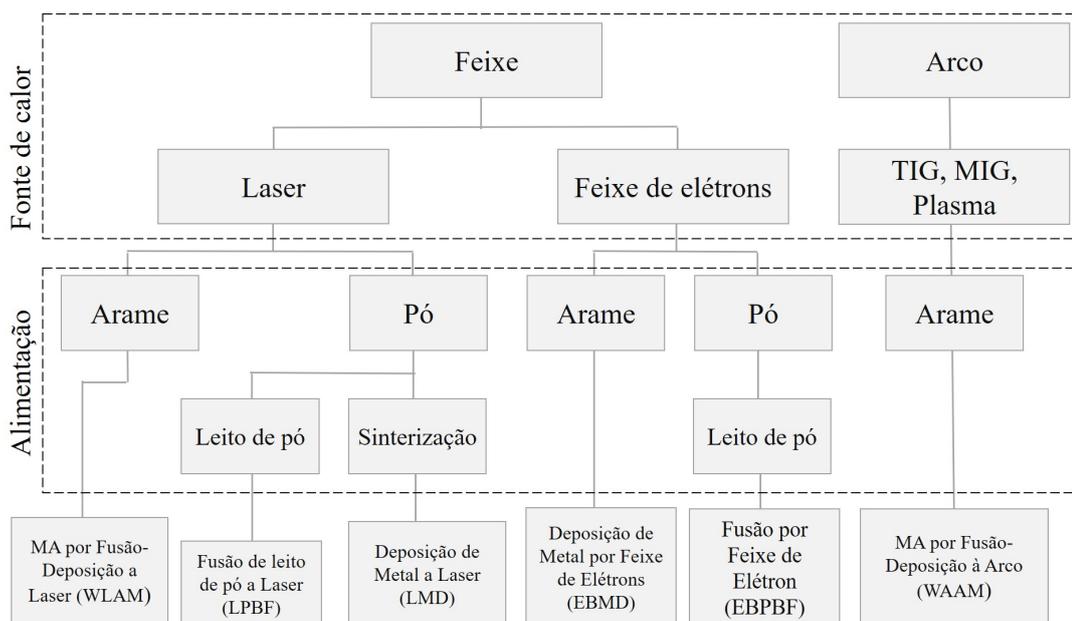


Figura 5 – Ramificação de tecnologias de deposição por energia direcionada na MA

Fonte: Adaptada de Garcia-Colomo *et al.* (2019).

trabalho), máximo volume e taxa de deposição. Os resultados estão dispostos no decágono da Figura 6. Ainda sobre este mesmo estudo, os gastos financeiros relacionados a aquisição de

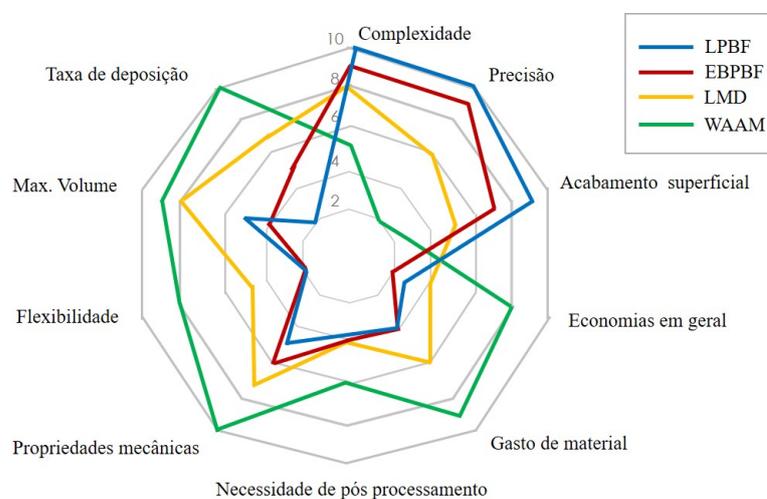


Figura 6 – Comparação entre processos de deposição por energia direcionada na MA de componentes aeroespaciais

Fonte: Adaptada de Garcia-Colomo *et al.* (2019).

equipamentos, matéria prima, operação e manutenção estão expostos na Figura 7. As linhas de nível são proporcionais aos custos. Como os diversos parâmetros analisados limitam suas capacidades, cada um destes processos é mais adequado a determinadas aplicações. É preciso avaliar a médio e longo prazo os objetivos de qualidade, produtividade e de investimentos para que o melhor processo de MA seja empregado.

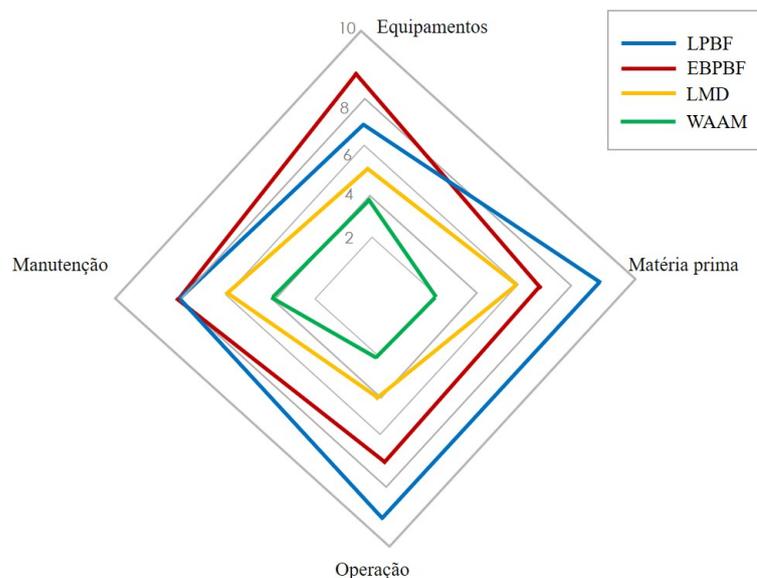


Figura 7 – Custos que envolvem processos de deposição por energia direcionada na MA de componentes aeroespaciais

Fonte: Adaptada de Garcia-Colomo *et al.* (2019).

2.3 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (WAAM), que tipicamente utiliza arame como material de deposição, conforme apresentado na Figura 6 destaca-se em vários parâmetros e seu conceito refere-se à combinação de um arco elétrico como fonte de calor e um arame como matéria-prima. A WAAM atualmente usa equipamentos de soldagem padrão, prontos para uso: fonte de energia para soldagem, tochas e sistemas de alimentação de arame metálico. O movimento pode ser fornecido por sistemas robóticos ou pórticos controlados por computador (WILLIAMS *et al.*, 2016). Esta adaptação se torna uma grande vantagem quando se trata de aparatos experimentais acadêmicos, uma vez que não é necessária aquisição de equipamentos exclusivamente para pesquisas em MA, podendo serem utilizados fontes e robôs de soldagem.

Para Williams *et al.* (2016), na WAAM de materiais como várias ligas de alumínio ou aços que não possuem uma exigência rigorosa para proteção de gás, o tamanho máximo da peça é determinado exclusivamente pela capacidade do robô ou do sistema pórtico. Já para outros materiais que exigem proteção como titânio, o tamanho é limitado pelo envelope interno da câmara usada para criar a atmosfera inerte. Williams *et al.* (2016) também relataram que taxas de deposição são suficientemente altas para deposição de peças em grande escala. Com taxas que variam de 1 kg/h a 4 kg/h para alumínio e aço, respectivamente, a maioria das peças pode ser fabricada dentro de um dia útil. Segundo DebRoy *et al.* (2018), os processos à base de pó são mais caros e, principalmente para os processos em leito de pó, o tempo de produção é muito longo para componentes grandes.

É possível também notar na Figura 6 o quanto a WAAM se destoa das demais tecnologias

quanto à produtividade. Altas taxas de deposição são extremamente importantes em um ambiente industrial, principalmente ao considerar que um atraso de poucos minutos pode comprometer toda linha de produção e acarretar em grande prejuízo financeiro. Já em uma comparação de custos operacionais, de equipamentos, matéria prima e de manutenção foi mostrada na Figura 7 uma clara viabilidade financeira da tecnologia.

Os processos em arco elétrico adequados para WAAM, de acordo com a norma ASTM F3187-16 (ASTM, 2016), são aqueles baseados nos processos de soldagem com proteção de gás: *Gas Tungsten Arc* (GTA), *Plasma Arc* (Arco Plasma) (PA), *Plasma Transferred Arc* (Plasma com Arco Transferido) (PTA) e *Gas Metal Arc* (GMA) e seus processos derivados.

2.3.1 Manufatura Aditiva de Alumínio

Em um estudo realizado por SmarTech (2018), espera-se que a utilização de ligas de alumínio na MA se torne cada vez mais significativa por oferecerem desempenho adequado e por não serem tão caras, podendo mudar o mercado de superligas de Ti e Ni. Propriedades como reciclabilidade, boa condutividade térmica e elétrica, boa formabilidade, resistência à corrosão e baixa densidade tornaram o alumínio um metal muito utilizado atualmente em diversas indústrias, principalmente aquelas que priorizam materiais leves. As condições de processamento são igualmente importantes e desempenham papel crucial nas propriedades finais do material e de um componente. Yang, Wang e Zhang (2017) relataram que em relação ao uso de ligas de alumínio na MA a laser, ainda há um forte foco na investigação de métodos à base de pó, como o *Selective Laser Melting* (Fusão Seletiva a Laser) (SLM). Porém, devido à disponibilidade limitada de pós adequados de liga de alumínio, a deposição LMD à base de arame tornou-se de interesse crescente devido à maior disponibilidade de ligas de alumínio em arames e custos mais baixos destes consumíveis.

Gu *et al.* (2014) verificaram que o processo WAAM é muito adequado para a produção de peças de alumínio em larga escala. Dentre os processos WAAM, o chamado *Cold Metal Transfer* (Transferência Fria de Metal) (CMT) é apontado como o mais eficiente na deposição de aço e alumínio (MARTINA, 2014) (WILLIAMS *et al.*, 2016) (SILVA, 2019).

O CMT é uma variação de processos GMA e vem se destacando por maior estabilidade nas deposições, menor aporte térmico envolvido e diminuição significativa de respingos (MARTINA, 2014). Esta tecnologia é capaz de reverter repetidamente o sentido de velocidade do arame através de uma tocha especial, ou seja, quando ele toca a poça de fusão (momento do curto-circuito) ele é retraído para que a gota de metal fundido se desprenda de maneira mais fácil e seja englobada pela poça de fusão, sem necessidade de altos níveis de correntes elétricas (FRONIUS, 2017).

A porosidade é um dos principais problemas nas ligas de alumínio, que são muito mais suscetíveis a esse defeito do que todos os outros metais. Isso ocorre porque os níveis

de hidrogênio ultrapassam a concentração limiar para que ocorra a nucleação de bolhas na poça de fusão (GU *et al.*, 2014). Atualmente, a WAAM de alumínio é limitada por defeitos de solidificação gerados pelo excessivo aporte térmico, ocasionando porosidade e trincas que exercem efeitos negativos sobre as propriedades mecânicas.

2.3.2 O acúmulo de Calor em WAAM

Processos de deposição com energia direcionada trazem uma limitação muito significativa: o acúmulo de calor ao longo da deposição. Silva (2019) explica que o acúmulo de calor ocorre devido a uma dissipação de calor insuficiente, fazendo que o balanço energético seja positivo. Ou seja, há mais entrada de calor do que saída. Durante a deposição, uma quantidade crescente de calor é dissipada na atmosfera adjacente por convecção e radiação à medida que uma pré-forma é construída, mas esses meios de transferência de calor são menos eficazes do que a condução direta a um substrato, resultando em uma dissipação lenta e no acúmulo de calor (WU *et al.*, 2018).

Apesar de processos WAAM serem característicos pela ocorrência deste fenômeno devido a seu maior aporte térmico, este também ocorre em tecnologias a laser, feixe de elétrons, baseadas em leito de pó, etc. (JAMSHIDINIA; KOVACEVIC, 2015) (BOCK *et al.*, 2018). Em processos GMA o acúmulo de calor se torna crítico à medida que a altura depositada aumenta, especialmente na fabricação de componentes de parede fina. Ocorrerá um movimento natural do metal líquido a fluir para baixo e a diminuir a qualidade da superfície da peça.

Wu *et al.* (2017) utilizaram um pirômetro infravermelho para medir a temperatura da última camada depositada na parede imediatamente antes de uma nova camada em deposição da liga Ti6Al4V através de WAAM, enquanto a temperatura do substrato foi monitorada por termopares. O gráfico apresentado na Figura 8 apresenta também valores de energia acumulada em kJ calculada através da equação fundamental da calorimetria. É possível perceber que o acúmulo de calor é evidente e pode assumir comportamento significativamente crescente.

Além de perdas em qualidade geométrica e superficial outro grande problema causado pelo enorme aporte térmico envolvido é o aparecimento de tensões residuais. As microestruturas finais são reflexo de todo histórico de temperatura durante a deposição e o aparecimento de tensões residuais pode influenciar negativamente as propriedades mecânicas do componente (limite de resistência a tração, ductilidade, dureza, etc.).

Martina (2014) verificou resultados altamente anisotrópicos na liga Ti6Al4V em partes construídas através de WAAM. Ele afirma que os ciclos térmicos repetidos induzidos pela deposição de cada camada causam variações locais da microestrutura, com inconsistências no tamanho dos grãos. Este fenômeno é indesejável do ponto de vista de projeto e pode limitar a implementação de AM. Na visão de Dutta e Froes (2015) observa-se que ainda existem incertezas muito importantes na literatura sobre a relação entre os parâmetros do processo, histórico térmico,

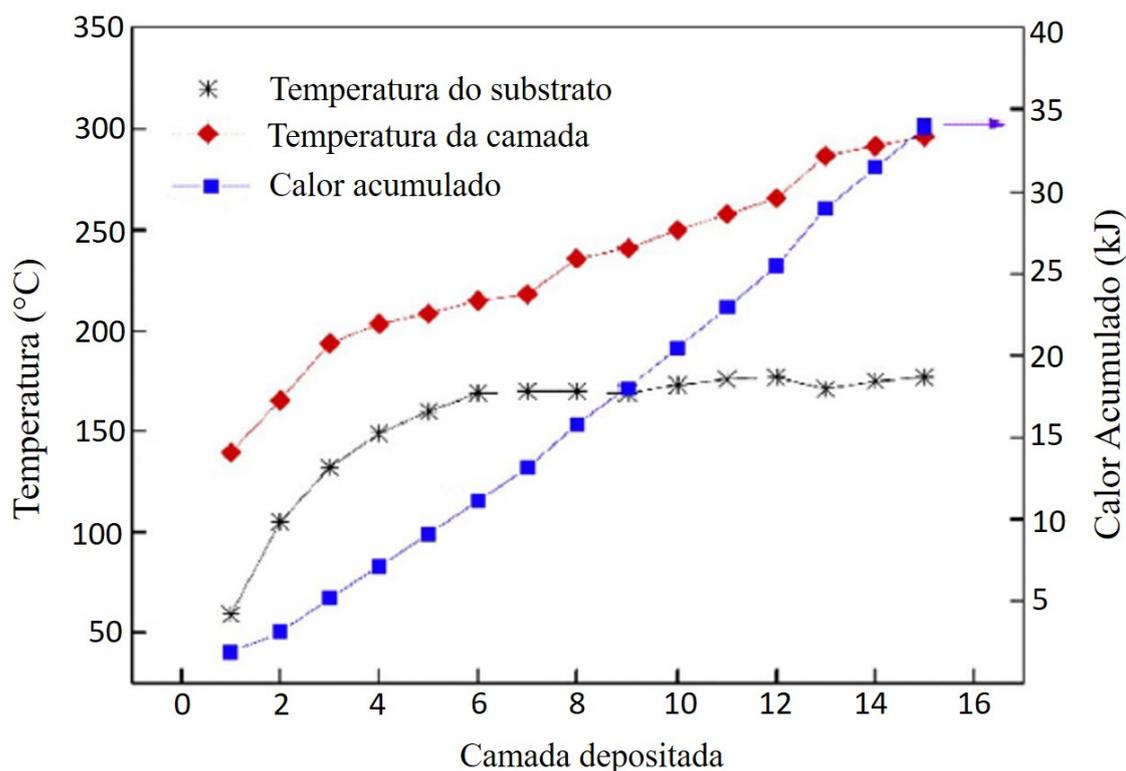


Figura 8 – Acúmulo de calor ao longo da deposição da liga Ti6Al4V por WAAM

Fonte: Adaptada de Wu *et al.* (2017).

solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de muitas técnicas de MA.

2.3.3 Técnicas de gerenciamento térmico para WAAM

Todas as problemáticas que envolvem o acúmulo de calor em tecnologias DED na MA, como redução de produtividade, prejuízo em qualidade mecânica das peças finais, desvios geométricos e aparecimento de tensões residuais fazem surgir constantemente novas tentativas de mitigar estes efeitos deletérios. Silva (2019) elabora uma classificação dessas tentativas com base em diferentes abordagens encontradas na literatura para gerenciamento térmico em MA:

- **Intrínsecas** – Baseadas em mudanças de parâmetros de deposição ou mesmo alternando, modificando ou combinando o processo de deposição com energia direcionada;
- **Naturais** – Adoção de um tempo de espera dedicado ao resfriamento natural. A produtividade é baseada no tempo em que as camadas depositadas são resfriadas até um nível de temperatura desejado (temperatura de interpasse) antes que a deposição da próxima camada seja retomada;
- **Passivas** - O agente de resfriamento indireto atua apenas na plataforma de construção e / ou substrato antes, durante e / ou após o período de construção;

- Ativas – Presença de contato direto, total ou parcial do agente de refrigeração na peça em construção.

Por exemplo, ao variar a energia de deposição, Wang *et al.* (2004) e Xiong e Zhang (2014) reportaram bons resultados, contudo essa abordagem de resfriamento intrínseco não elimina a excessiva concentração de calor durante a deposição. O resfriamento natural com tempo de inatividade entre camadas é talvez a maneira mais intuitiva de se diminuir o gradiente de temperatura das peças depositadas. Foster *et al.* (2017) concluíram que para pó de Inconel 625® e Ti6Al4V, ambos superligas, usando LMD, a adição de tempo de espera de até 40 segundos entre camadas geralmente leva a uma microestrutura mais fina nos dois materiais e afeta as propriedades mecânicas resultantes positivamente. Rocha *et al.* (2020) avaliaram o uso de tempo de espera entre camadas variando de 0 a 300 s na construção de paredes com oito camadas de aço ER309LSi. Na Figura 9 é possível ver os bons resultados em termos de área de Zona de Alta Temperatura (HTZ - definida como acima de 900°C) medida através de uma câmera térmica posicionada de forma centralizada à frente da pré-forma. Os autores ainda afirmam que uma mesma HTZ pode ser obtida com diferentes parâmetros de processo variando o tempo ocioso de intercamada. Desta forma, esta técnica de controle térmico se faz como um controlador para os aspectos dimensionais da camada, bem como para os resultados microestruturais. Köhler, Hensel e Dilger (2020) analisaram a liga Al5356 depositada através de WAAM e também utilizaram a técnica de espera entre passes e monitoraram as temperaturas da região central das camadas superiores através de um pirômetro infravermelho. A Figura 10 expõe a discrepância entre os resultados. Para WAAM de aço-carbono Yang, Wang e Zhang (2017) verificaram que um tempo de espera superior a 5 minutos pouco influi sobre os resultados de qualidade superficial e gradiente de temperatura. Apesar de bons resultados se utilizando a técnica de temperaturas de interpasse, sabe-se que o tempo morto entre camadas torna a deposição demorada podendo prejudicar a viabilidade produtiva do processo. Já um resfriamento passivo pode ser benéfico no início da deposição, no entanto, à medida que as camadas são depositadas a transferência de calor se dará majoritariamente por convecção e radiação atmosférica, como se o resfriamento da plataforma não existisse. Essa abordagem se mostra eficaz nas primeiras camadas e/ou para pré-formas pequenas (LU *et al.*, 2017). Wu *et al.* (2018) desenvolveram um gerenciamento térmico baseado em jato de CO₂ na construção de paredes finas de liga de titânio Ti6Al4V e afirmam que o resfriamento forçado entre as camadas promove a repetibilidade geométrica, melhora as propriedades de deposição e aumenta a eficiência da fabricação através da redução do tempo de permanência entre as camadas depositadas. Os resultados mostram que quanto maior é a temperatura de interpasse, mais largas e achatadas se tornam as paredes, exibindo maior oxidação da superfície. Já Hackenhaar *et al.* (2019) investigaram o efeito do impacto de jato de ar para impedir o acúmulo de calor nas superfícies das peças metálicas feitas por WAAM. Os resultados destacam a eficácia da tentativa e que o jato de ar aumenta a altura da camada depositada e diminui a ondulação da superfície, embora leve a uma indesejada diminuição da

eficiência de deposição.

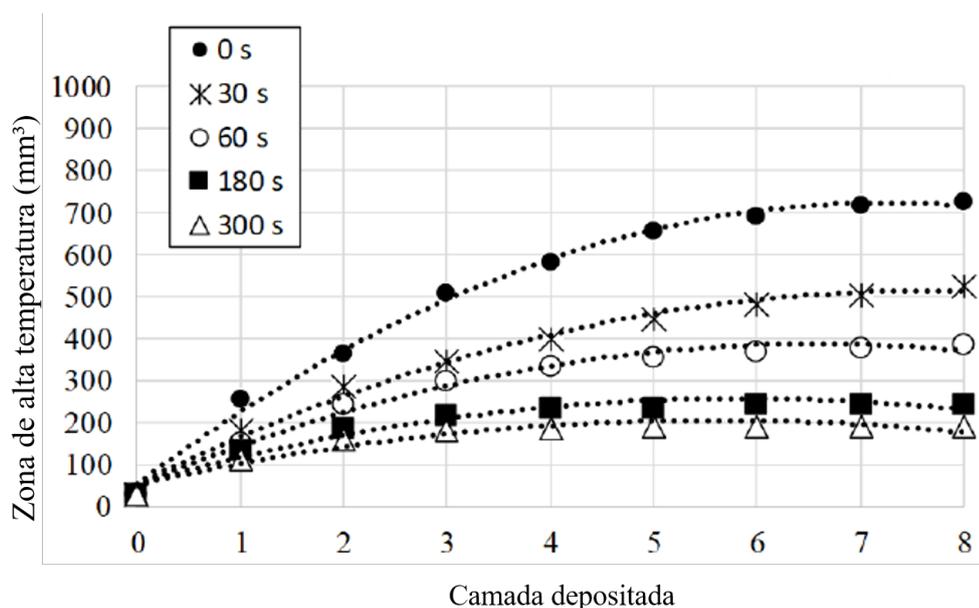


Figura 9 – Comparação entre diferentes tempos de espera durante deposição de aço ER309LSi

Fonte: Adaptada de Rocha *et al.* (2020).

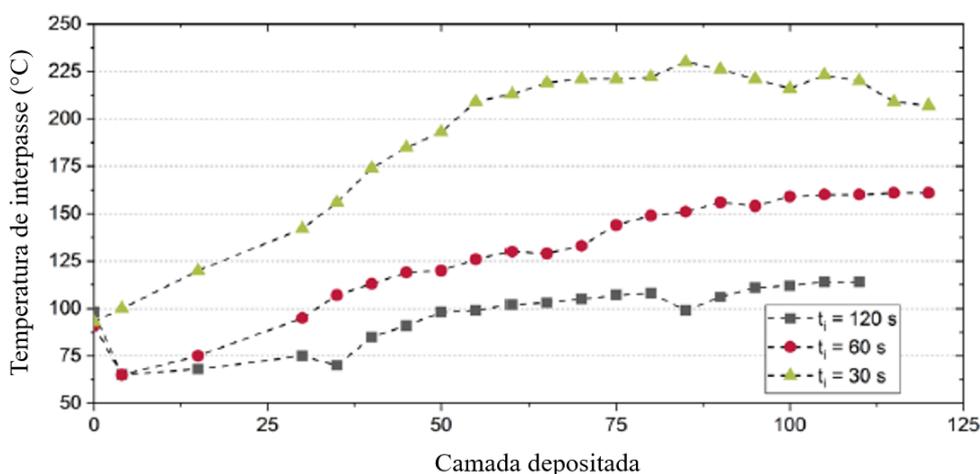


Figura 10 – Temperatura de interpasse em função do tempo de espera e do número de camadas para WAAM da liga Al5356

Fonte: Köhler, Hensel e Dilger (2020).

Silva (2019) fez uma análise de patentes existentes que envolvem o gerenciamento térmico dentro da MA e encontrou soluções de diversas perspectivas:

- US7326377B2 - Bloco acoplado à plataforma de construção capaz de extração ou imposição de calor com fluido de circulação em torno de aletas (ADAMS, 2008);

- US2010242843A1 - Mandril usado como plataforma para resfriar a pré-formas em construção por possuir maior condutividade térmica que a do material de deposição e possuir canais internos para passagem de fluido refrigerante (PERETTI; TRAPP, 2010);
- US20170355019A1 - Elemento de aquecimento para impedir o aquecimento não uniforme da parte construída (KARLEN, 2017);
- US2016271732A1 - Pré-aquecedor, capaz de gerar calor pela passagem de corrente elétrica e indução, que é montado para acompanhar a fonte de energia no caminho de deposição sempre próximo e aquecer o substrato e / ou a camada imediatamente anterior à frente da região de deposição atual para aumentar a molhabilidade do material fundido (DUTTA, 2016);
- US2016096326A1 - Placa com vários elementos de resfriamento e / ou aquecimento para controlar constantemente o gradiente térmico e a distribuição de temperatura gerada na base da peça (NAWARE, 2016);
- US20150021815A1 - Dispositivos de controle de temperatura que podem ser acoplados durante pelo menos uma parte do processo para resultar na microestrutura desejada (ALBRECHT; HSU, 2015);
- CN104959606A - Sistema de controle de temperatura que empregam resfriamento ativo / direto e contínuo pela aplicação de gás de preferência inerte direcionado por um bico de resfriamento em direção à região já solidificada da pré-forma (XIONG Z.Q., 2015);
- EP3069804A2 - Resfriamento ativo / direto e contínuo onde a pré-forma é construída com canais integrados de refrigeração ou aquecimento, que também podem estar na plataforma de construção, neste caso com saídas individualmente seláveis, pelas quais passa um fluido que pode proteger contra corrosão, oxidação e adesão dos respingos de deposição por fusão e fazer lubrificação (FISCHER G., 2015).

Fica claro que a busca por técnicas que mitiguem o aporte térmico já é de longa data e envolve sucessos e limitações. Para Dutta e Froes (2015), existem poucos estudos sobre processos secundários em AM. Mais processos secundários podem ser / devem ser desenvolvidos para alcançar propriedades mecânicas melhores. Neste sentido, Silva (2019) desenvolveu uma nova maneira de gerenciamento térmico durante uma deposição de WAAM, visando mitigar o acúmulo de calor sem comprometer a produção, o desempenho operacional e com baixo impacto ambiental. O *Near-Immersion Active Cooling* (Resfriamento Ativo por Quase-Imersão) (NIAC) foi introduzido como um novo gerenciamento térmico ativo.

2.3.4 O resfriamento ativo NIAC (Near-Immersion Active Cooling)

O conceito NIAC envolve a quase-imersão contínua e controlada da pré-forma de metal construída através WAAM (ou de demais técnicas de energia direcionada) em um tanque com água durante toda deposição de material. Existe sempre uma distância entre o topo da pré-forma e a da lâmina d'água, uma vez que uma vaporização excessiva da água pode perturbar o arco elétrico. Silva *et al.* (2020) comprovaram a viabilidade deste conceito através de comparação de pré-formas de alumínio construídas por WAAM de três maneiras distintas: resfriamento natural (sem nenhuma intervenção), passivo (com a plataforma de trabalho resfriada) e ativo (conceito NIAC), ambos sem tempo de espera entre a deposição das camadas. A Figura 11 ilustra o que foi realizado na criação do conceito NIAC.

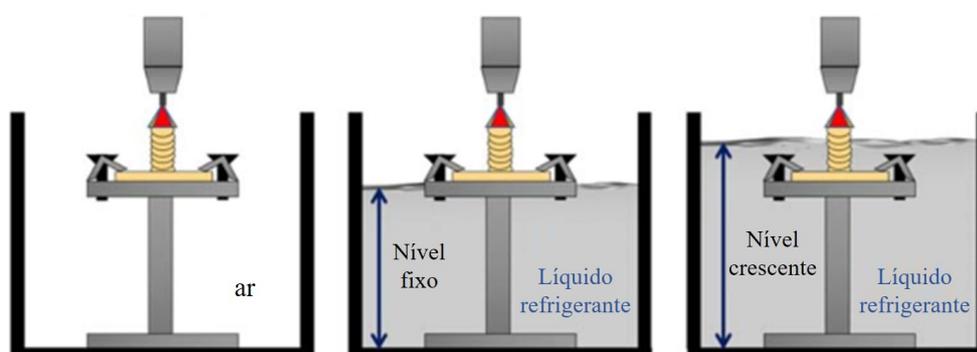


Figura 11 – Experimentos realizados para prova de viabilidade do conceito NIAC

Fonte: Adaptada de Silva *et al.* (2020).

A Figura 12 representa esquematicamente o NIAC e como se dão as trocas de calor: a taxa de resfriamento da parte não imersa da pré-forma envolve apenas radiação e convecção com o ar atmosférico, e a parte imersa conta com convecção e condução de calor com a água. A água (ou qualquer líquido de resfriamento) age constantemente para retirar o calor diretamente da pré-forma, diminuindo significativamente a temperatura de interpasse e o acúmulo de calor na pré-forma à medida que a deposição acontece. Os resultados de uma câmera térmica instalada durante os experimentos mostram na Figura 13 o quanto a técnica NIAC reduz a temperatura média da pré-forma.

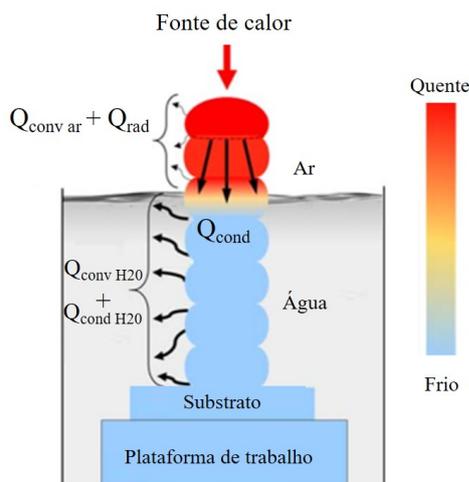


Figura 12 – Vista lateral de pré-forma construída por WAAM com respectiva transferência de calor com o NIAC

Fonte: Adaptada de Silva *et al.* (2020).

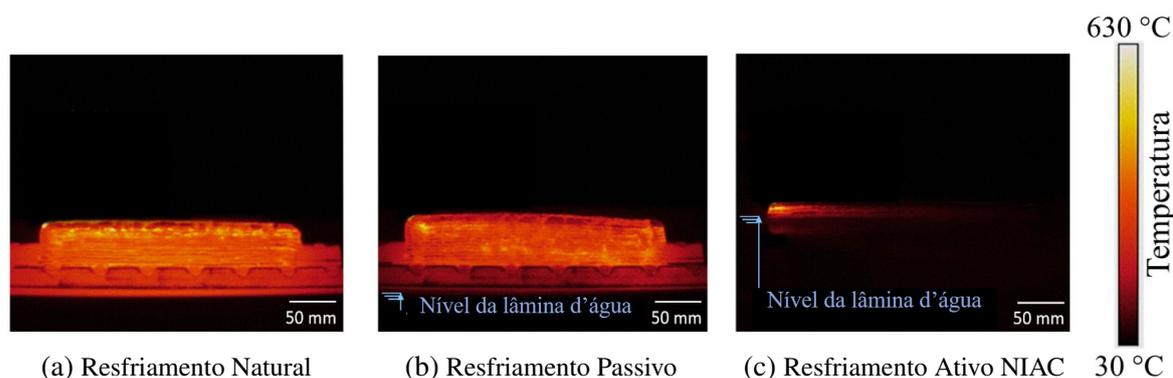


Figura 13 – Resultados de câmara térmica para resfriamento natural, passivo e ativo NIAC

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

Os parâmetros de deposição do arame de alumínio AWS ER 5356 se mantiveram os mesmos para as três abordagens de gerenciamento térmico. Ou seja, não foram alterados: velocidade de alimentação, velocidade de deposição, Distância Bico de Contato-Peça (DBCP), distância da lâmina d’água em relação ao nível de deposição, vazão do gás de proteção e corrente/tensão médias ao longo da deposição. Os resultados, apesar de cobrirem uma faixa operacional do processo bastante estreita, mostraram alto poder dissipador de calor desta técnica com capacidade de manter as pré-formas a temperaturas razoavelmente baixas durante todo o tempo de deposição, sem depender da altura da pré-forma. Além disso, as pré-formas em forma de parede produzidas com NIAC possuem uma largura praticamente constante e são as mais altas. Quanto à qualidade mecânica, esta técnica mostrou indícios de equilibrá-las, ou seja, de reduzir a anisotropia muitas vezes causada pelo crescimento preferencial de grãos devido à dinâmica térmica da deposição.

Silva *et al.* (2020) também mostraram que o gerenciamento térmico NIAC não induz à

formação de poros, como pode ser visto na Figura 14. Em comparação com as abordagens de resfriamento natural e passivo, é possível ver que o nível de vazios em porcentagem calculados pelo método de Arquimedes se manteve praticamente constante para os três casos.

Scotti *et al.* (2020) também usaram WAAM com a liga AWS ER5356 utilizando o NIAC. Neste trabalho foi utilizada uma técnica variante do CMT onde o ciclo sinérgico é dividido em duas etapas (um semiciclo de eletrodo positivo e um semiciclo de eletrodo negativo) visto que melhorias em termos de porosidade, refino de grão e possível diminuição de aporte térmico foram apontados na literatura através desta técnica. Os autores variaram os níveis de energia (três) e também os níveis de distância entre o topo da camada em deposição e a lâmina d'água (três). Os resultados mostraram que, para perfis de baixa temperatura, as pré-formas tendem a ser mais finas e altas, porém com maior ondulação superficial (exigindo mais pós-processamento para remoção de material durante a fase de acabamento) como pode ser visto na Figura 15. Os parâmetros da CMT Advanced influenciaram mais no controle geométrico do que o NIAC. Os resultados não demonstraram efeitos sobre a porosidade mas destacam uma problemática muito importante de falta de coalescência entre as camadas e descontinuidades adjacentes que ocorrem próximas aos vales das ondulações. Apesar de pequenas, os autores destacam, entretanto, que essas descontinuidades devem ser observadas, principalmente em se tratando de possíveis efeitos sobre as propriedades mecânicas, que não foram avaliadas no trabalho em questão.

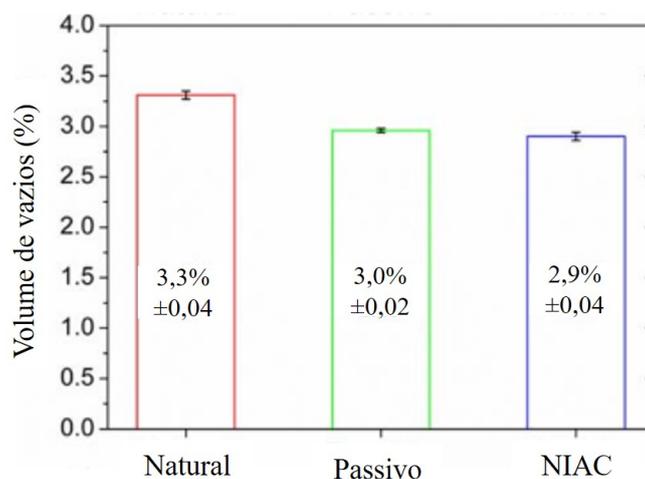


Figura 14 – Nível de porosidade para três abordagens de resfriamento

Fonte: Adaptada de Silva *et al.* (2020).

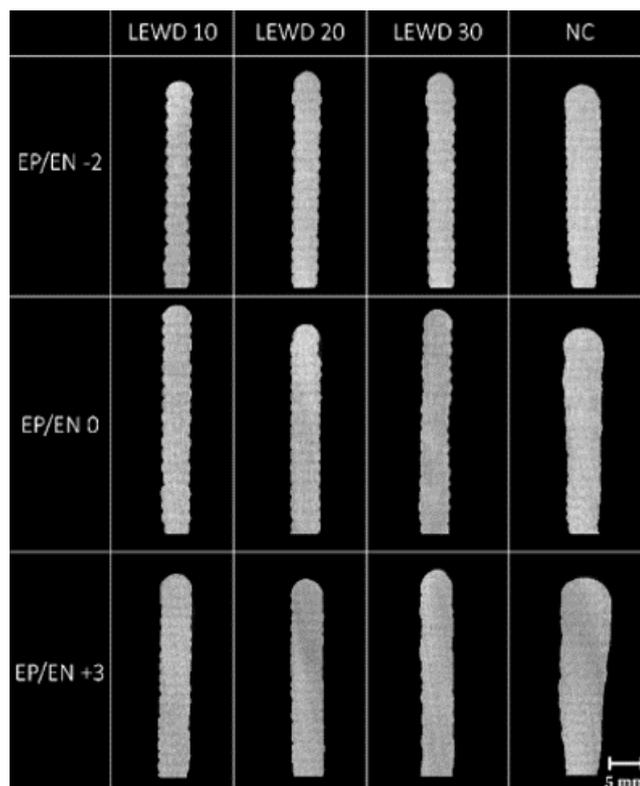


Figura 15 – Seção transversal de pré-formas produzidas por CMT Advanced com aplicação do NIAC

Fonte: Scotti *et al.* (2020).

2.3.5 Técnicas de medição de temperatura na MA

Silva, Reis e Scotti (2019) comentam das diferentes nuances que o termo "temperatura de interpasse" podem apresentar dentro da MA. Pode-se relacionar esse termo com uma temperatura de intercadas, com a própria geometria da camada produzida (visto que o monitoramento da temperatura pode ser capaz de determinar a largura da pré-forma) e por último com a posição de onde a temperatura é medida. Os autores ainda apontam quatro técnicas mais comumente utilizadas na medição de temperatura durante a deposição metálica e estão dispostas na ilustração da Figura 16. Em (1) a medição é feita por um ponto fixo no substrato através de instrumentos com ou sem contato, termopares ou pirômetros, respectivamente. A diferença para (2) está na posição, que agora será na superfície lateral da pré-forma. A metodologia (3) conta com a medição sem contato de temperatura de um ponto móvel na posição vertical na superfície lateral da pré-forma, mantendo a mesma distância ponto-superfície superior. E por último, (4) é uma medição em ponto móvel na superfície superior (sem contato), à frente do arco. Câmeras térmicas também são uma opção de medição de temperatura sem contato.

Sobre a metodologia (1), Wu *et al.* (2018) afirmam que a temperatura medida no substrato pode trazer uma grande discrepância entre a temperatura medida no substrato e a temperatura real de interpasse, indicando que técnicas sem contato fornecem dados mais confiáveis e precisos. A abordagem (2) é capaz de acompanhar o acúmulo de calor através da medição em ponto fixo

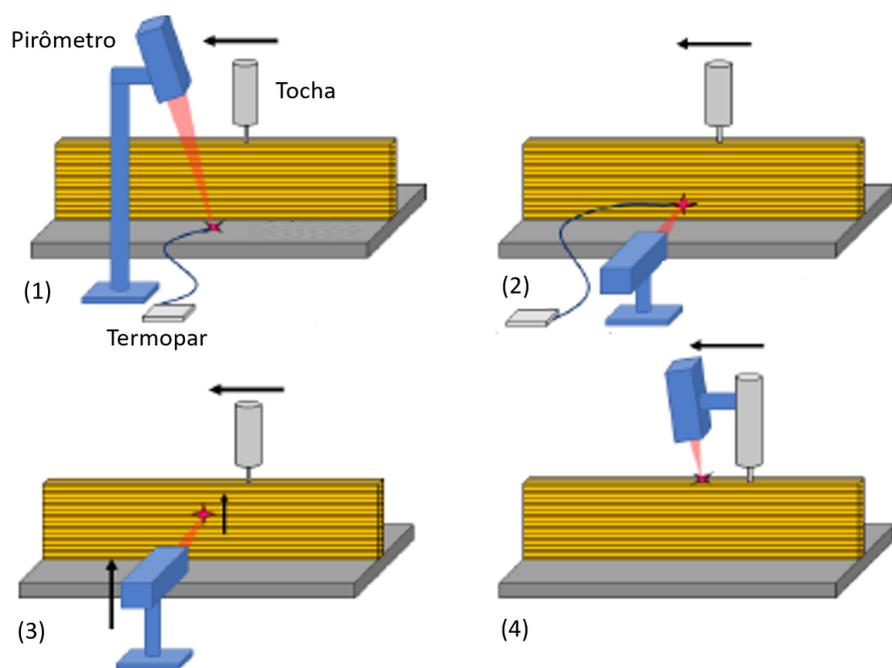


Figura 16 – Diferentes abordagens para medir a temperatura de interpasse na MA

Fonte: Silva, Reis e Scotti (2019).

mas não acompanha a taxa de resfriamento entre camadas como ocorre em (3). Para Silva, Reis e Scotti (2019) os resultados obtidos pela metodologia (4) não estão relacionados a interpasse (entre a passagem anterior e as subsequentes), uma vez que a medição é realizada durante a deposição de passagem em andamento na camada anterior apesar de acompanhar em tempo real as taxas de resfriamento e acúmulo de calor.

2.4 Técnicas de Rastreamento Digital de Imagens

Ao se averiguar a qualidade mecânica de peças produzidas em MA surge um agravante: em se tratando de MA, a confecção de corpos de prova de tamanhos tradicionais pode levar a altos custos de produção e muitas vezes ter sua construção limitada pelos envelopes de trabalho de equipamentos (tamanho da pré-forma). A miniaturização de corpos de prova se dá como uma possível solução para este fato. Dongare (2012) desenvolveu de uma técnica para a utilização de amostras em miniatura de ensaios de tração, a fim de reduzir consumo de material e possibilitar o exame de variações locais de resistência mecânica com muito melhor resolução em comparação com as amostras em tamanho padrão providas de MA da liga Ti-6Al-4V com deposição a laser. Com esta abordagem de miniaturização, torna-se bastante complicado usar métodos de medição com contato para determinar as propriedades mecânicas das pré-formas, como strain-gages e clip-gages: é preciso pensar em novas tecnologias. Lim e Kim (2013) criaram uma pequena e prática máquina de teste de tração projetada para realizar testes de tração em sala de aula usando um corpo de prova de tração em miniatura. Uma alternativa mais palpável é utilizar técnicas sem

contato para mensurar deformação em corpos de prova submetidos à ensaios de tração uma vez que o uso de extensômetros é muitas vezes inviável, ou bastante difícil fisicamente quando se trata de miniaturas (espaço para montar extensômetros limitado).

Segundo Milosevic *et al.* (2016), os métodos sem contato foram rapidamente desenvolvidos nas últimas décadas e atualmente existem até mesmo soluções comerciais baseadas nesses métodos. Alguns deles incluem técnicas como a Correlação de Imagem Digital (DIC), interferometria, estereografia, etc. Geralmente, os métodos de teste sem contato são adequados para testes destrutivos e não destrutivos, bem como para corpos de prova de todos os tamanhos.

A técnica DIC pode medir a deformação do objeto correlacionando as imagens digitais de um objeto antes e depois da deformação e determinando ainda mais o campo de deslocamento e deformação de um objeto com base na posição correspondente na imagem (GADHE; NAVTHAR, 2016). A técnica encontrou ampla aplicação em métodos de engenharia e manufatura para medir mudanças e fornecer previsões de deslocamento e medição para análise de materiais e estruturas, verificação de análise de elementos finitos e controle de qualidade (HOHMANN *et al.*, 2012).

O rastreamento e correlação de imagens digitais pode medir a deformação do objeto correlacionando suas imagens digitais antes e depois da deformação (GADHE; NAVTHAR, 2016). A Figura 17 trata de um procedimento experimental genérico para DIC e ilustra de forma esquemática e simplificada como o mesmo funciona.

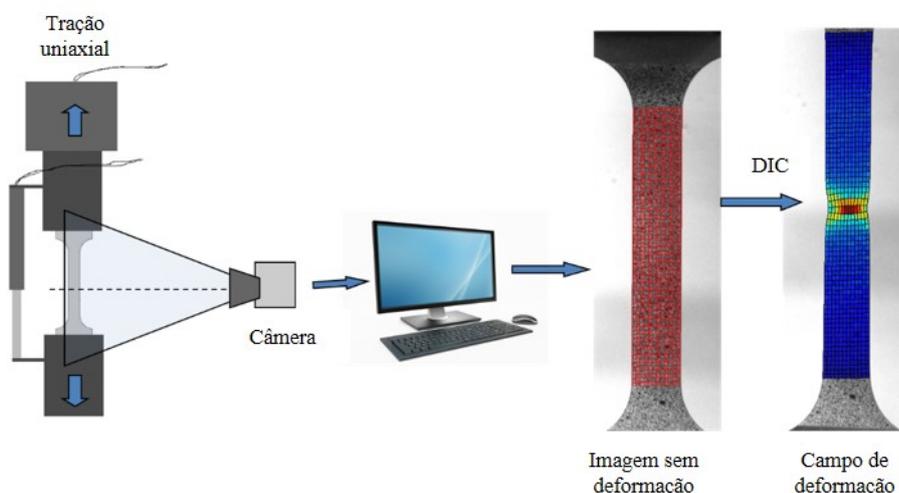


Figura 17 – Configuração esquemática para DIC

Fonte: Adaptada de Fagerholt (2017).

Prochazka *et al.* (2017) trabalharam com a técnica DIC para determinar propriedades de fadiga e de deformação sob tração do aço de endurecimento por precipitação X1CrNiMoAlTi 12-11-2. Foram utilizados corpos de prova em dimensões padronizadas e miniaturizadas a fim de comparação de resultados. A Figura 18 mostra os detalhes dos corpos de prova em miniatura com a respectiva imagem gerada por meio de DIC para determinar a deformação durante ensaios de tração. Foi encontrada uma concordância muito boa nos resultados de fadiga e deformação ,

como disposto na Figura 19, comprovando a possibilidade de aplicação de DIC na determinação de propriedades mecânicas com CPs em miniatura.

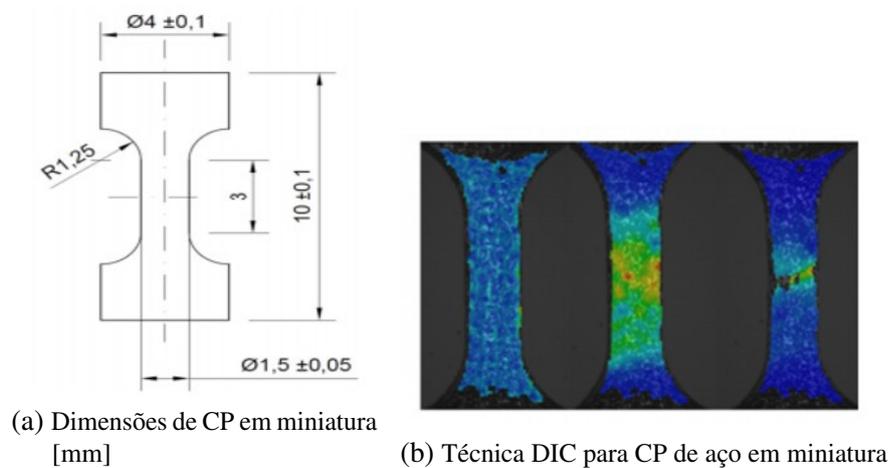
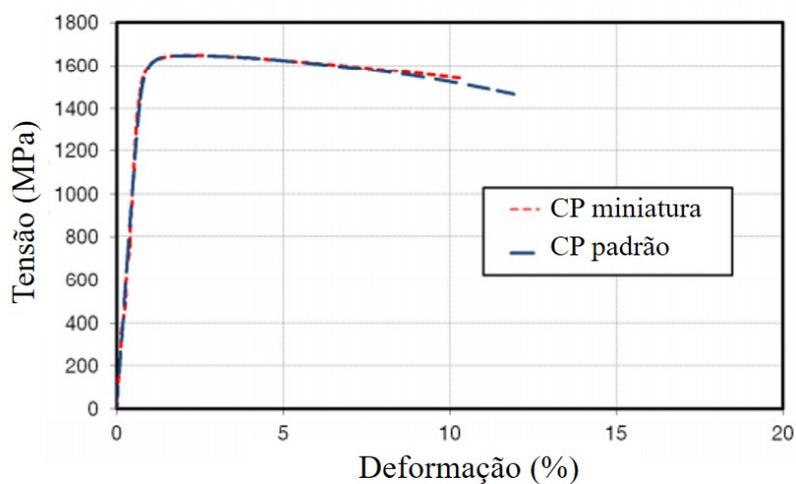
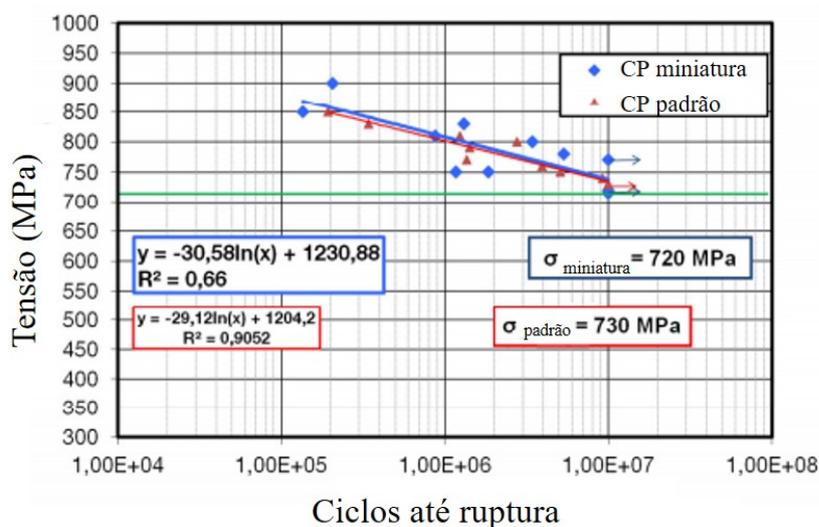


Figura 18 – Procedimento experimental para aplicação de DIC em corpos de prova em miniatura

Fonte: Prochazka *et al.* (2017).



(a) Tensão/deformação



(b) Fadiga

Figura 19 – Resultados comparativos de propriedades mecânicas

Fonte: Adaptada de Prochazka *et al.* (2017).

2.5 Planejamento de Experimentos na Manufatura Aditiva

Ainda em se tratando da dificuldade de obtenção de corpos de prova para validação de técnicas, a MA, até pela relativa demora envolvida na construção de partes por essa rota de fabri-

cação, conta com uma estratégia vinculada à estatística que é capaz de reduzir significativamente os esforços experimentais sem ferir a confiabilidade dos resultados. Trata-se do Planejamento de Experimentos, ou como também conhecido, *Design of Experiments* (Planejamento de Experimentos) (DOE).

O DOE usa metodologia estatística para analisar dados e prever o desempenho das propriedades do produto sob todas as condições possíveis, dentro dos limites selecionados para o projeto experimental. É uma técnica ou procedimento para gerar as informações necessárias com a quantidade mínima de experimentos, utilizando de condições experimentais específicas e análise matemática para prever a resposta em qualquer ponto dentro dos limites estabelecidos (JR; MOUNT; JR, 2004). Ao manipular várias entradas ao mesmo tempo, o DOE pode identificar interações importantes que podem ser perdidas ao experimentar um fator de cada vez. Todas as combinações possíveis podem ser investigadas (fatorial completo) ou apenas uma parte das combinações possíveis (fatorial fracionário). Um experimento estrategicamente planejado e executado pode fornecer uma grande quantidade de informações sobre o efeito em uma variável de resposta devido a um ou mais fatores (BOWER, 2017).

Muitas vezes em um processo de AM, as peças produzidas precisam atender simultaneamente diferentes requisitos dimensionais e mecânicos, gerando conflito e escolhas entre estes requisitos estruturais. Para resolver esse problema, a comunidade de pesquisa usou o Design de Experimentos para otimizar os parâmetros individuais das máquinas (ITUARTE *et al.*, 2015). Existe, então, a necessidade de pesquisar uma abordagem experimental sistemática para atender a vários requisitos de produção simultaneamente e caracterizar os recursos de fabricação. Ituarte *et al.* (2015) utilizaram uma metodologia que integra o *Taguchi Design of Experiments* com o objetivo de caracterizar a tecnologia MA, dependendo das variáveis de processo de fabricação, bem como realizar uma avaliação comparativa de três tecnologias de (Sinterização Seletiva a Laser, Estereolitografia a Laser e Polyjet). A entrada de materiais precisos e parâmetros de simulação é fundamental para previsões em processos de MA. DOE também foi utilizado por Li *et al.* (2015) na modelagem de elementos finitos para variar os parâmetros de simulação e identificar variáveis críticas no LPBF.

Durakovic (2017) estudou sobre o desenvolvimento de aplicações desta ferramenta e afirmam que graças ao desenvolvimento de softwares, o uso do DOE como ferramenta científica aumentou rapidamente nos últimos 20 anos em indústrias manufatureiras e não manufatureiras em todo o mundo. É uma ferramenta já muito popular e poderosa para diminuir o esforço experimental e mesmo assim se obter avaliações consistentes e confiáveis.

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta como foi feito o planejamento dos experimentos, quais equipamentos e parâmetros utilizados na confecção das pré-formas e qual foi a maneira de se obter valores de produtividade das deposições. Além disso, os processos de obtenção das propriedades mecânicas com aparato dos ensaios de tração, microdureza e micrografia são exibidos e comentados.

3.1 Fabricação das pré-formas

O nome pré-forma refere-se neste trabalho às paredes de alumínio construídas através de WAAM com deposição via CMT. A geometria de uma parede foi escolhida devido à sua simplicidade para facilitar o processo de deposição, poupar tempo e esforço experimental, já que o objetivo final do trabalho é uma avaliação mais abrangente da técnica NIAC com a variação dos parâmetros de deposição e não a avaliação do NIAC em diferentes geometrias. Outra justificativa para a escolha da geometria simplificada é a criticidade da troca de calor por condução. A fabricação destas paredes contou com um planejamento experimental no intuito de reduzir a quantidade de experimentos necessários para se chegar em um resultado estatisticamente confiável.

3.1.1 *Planejamento dos Experimentos*

O DOE caracteriza-se por ser a condução do experimento de maneira formal, ou seja, os testes são planejados para que os fatores (variáveis controladas) sejam alterados de modo a entender e avaliar seu impacto sobre uma variável resposta (CHAVES, 2008).

Haaland (1989) diz que um problema experimental de duas ou três variáveis pode ser resolvido em três caminhos: Análise Univariada, Matriz com todas as combinações e Planejamento Composto Central. A Análise Univariada é um procedimento experimental “*one-at-a-time*”,

onde diferentes condições de uma variável é avaliada enquanto as demais variáveis estão fixas. Isto faz com que as condições estejam limitadas em uma só região, já que não detecta os efeitos de interação entre as variáveis. O segundo caminho envolve todas as combinações possíveis dentro de uma matriz. Este tem a vantagem de explorar todo o espaço experimental, e tem a desvantagem de necessitar de um número grande de testes. No terceiro caminho, a solução do projeto experimental pode ser feita usando um número menor de medidas e explorando todo o espaço experimental através de um Planejamento Composto Central (PCC). É possível ainda, elaborar um modelo matemático, que se validado estatisticamente, pode ser usado para obtenção da Superfície de Resposta e através desta análise determinar as condições otimizadas, conhecendo-se a significância estatística das respostas (CHAVES, 2008). A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais e vem sendo muito investigada por pesquisadores e estudiosos desde a primeira publicação feita por Box e Wilson (1951). A MSR é essencialmente um conjunto de técnicas estatísticas, compostas por planejamento e análise de experimentos, que procura relacionar respostas com os níveis de fatores quantitativos e suas interações (CUSTÓDIO; MORAIS; MUNIZ, 2000). Desta forma, é possível otimizar e também prever ao final dos experimentos, qual seria o vetor resposta dentro de qualquer ponto da região experimental avaliada. A Figura 20 ilustra cada um dos três caminhos comentados.

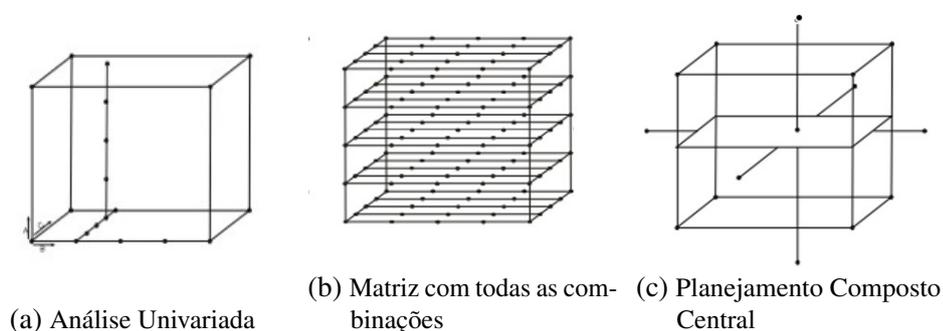


Figura 20 – Possibilidades de planejamento experimental

Fonte: Haaland (1989).

Neste trabalho, durante a deposição de alumínio serão avaliadas três variáveis: velocidade de alimentação (V_a), velocidade de deposição (V_d - equivalente à velocidade de soldagem em operações de união) e distância do nível da lâmina d'água em relação ao nível de deposição (h). Estas variáveis podem possuir 2, 3 ou mais níveis. Considerando que se deseja avaliá-las em três níveis e obter o nível de interação entre as mesmas, há duas estratégias indicadas: Fatorial Completo 3^k ou PCC. Um experimento Fatorial Completo inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento com a ordem das corridas aleatorizada. Barrozo (1996) comenta que planejamentos compostos centrais são planejamentos fatoriais de 1ª ordem 2^k aumentados de alguns pontos para permitir a estimação dos parâmetros de uma superfície de

2ª ordem:

$$N_{\text{experimentos}} = 2^k + 2k + n \quad (3.1)$$

onde k é a quantidade de variáveis e n é a quantidade de repetições do ponto central (nível 0). Ou seja, um fatorial completo exigiria um total de 27 (3^3) experimentos enquanto um PCC requer apenas 16 ($2^3+2 \times 3+2$).

Optando pelo PCC por entregar resultados com mesma confiabilidade estatística, porém com menor esforço experimental, foi utilizado o software STATISTICA® para calcular as corridas e ordem com que os experimentos seriam feitos. Os níveis adotados para este trabalho estão descritos na Tabela 1. Já a Tabela 2 mostra o resultado obtido do software, com ilustração feita pela Figura 21. Nota-se a existência de valores que extrapolam os limites da Tabela 1, sendo estes calculados proporcionalmente de acordo com um parâmetro chamado α , que pode assumir dois valores: ortogonal ou rotativo. Irá depender da operação dos equipamentos e/ou de prioridades nos resultados. Minitab (2019) explica que optar por um α ortogonal significa que os experimentos serão dispostos ortogonalmente em blocos e permitem que efeitos de tratamentos e blocos de modelos sejam estimados separadamente e minimizam a variação nos coeficientes de regressão. Experimentos rotativos melhoram a qualidade da predição. Neste trabalho, foi adotado $\alpha=1,2872$ de ortogonalidade por limitação da distância do nível do líquido de resfriamento, visto que valores muito pequenos podem dificultar o processo de deposição ao ocasionar maior evaporação de água, que poderia hidratar os óxidos frescos e culminar na formação excessiva de poros além de causar instabilidade no arco elétrico.

Tabela 1 – Variáveis e níveis de interesse

Variável	Inferior (-1)	Central (0)	Superior (+1)
Va (mm/min)	6000	7500	9000
Vd (mm/min)	500	800	1100
h (mm)	30	20	10

Fonte: Dados da pesquisa.

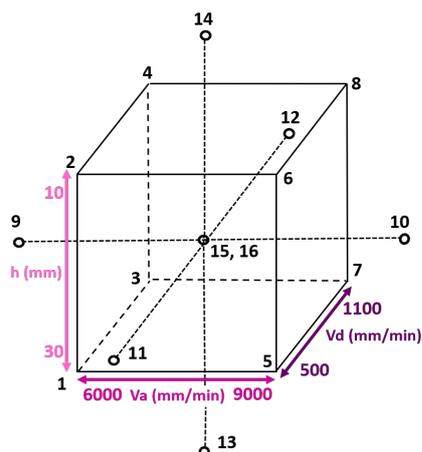


Figura 21 – Cubo PCC com valores da pesquisa

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Corridas geradas pelo Planejamento Composto Central

Corrida	Va (mm/min)	Vd (mm/min)	h (mm)
1	6000	500	30
2	6000	500	10
3	6000	1100	30
4	6000	1100	10
5	9000	500	30
6	9000	500	10
7	9000	1100	30
8	9000	1100	10
9	5570	800	20
10	9431	800	20
11	7500	414	20
12	7500	1186	20
13	7500	800	33
14	7500	800	7
15	7500	800	20
16	7500	800	20

Fonte: Dados da pesquisa.

A fim de se construir uma base de comparação da técnica NIAC com outros gerenciamentos térmicos, mais três pré-formas foram construídas com Resfriamento Natural com tempo de espera entre camadas até determinada temperatura de interpasse (mesma da condição equivalente com NIAC) e outras três sem tempo de espera para resfriamento. As condições gerais utilizadas foram a de nível zero do PCC e condições de máxima e mínima energia de deposição. Ou seja, foram escolhidas a máxima velocidade de alimentação com mínima velocidade de deposição (energia máxima), a mínima velocidade de alimentação com máxima velocidade de deposição (energia mínima) e o ponto central (nível zero). A Tabela 3 contém todas estas informações com respectivos valores. As temperaturas de interpasse serão apresentadas na Seção 3.5

Tabela 3 – Corridas geradas para comparação com a técnica NIAC

Corrida	Gerenciamento térmico	Va (mm/min)	Vd (mm/min)
17	Resfriamento Natural	7500	800
18		9000	500
19		6000	1100
20	Sem Resfriamento	7500	800
21		9000	500
22		6000	1100

Fonte: Dados da pesquisa.

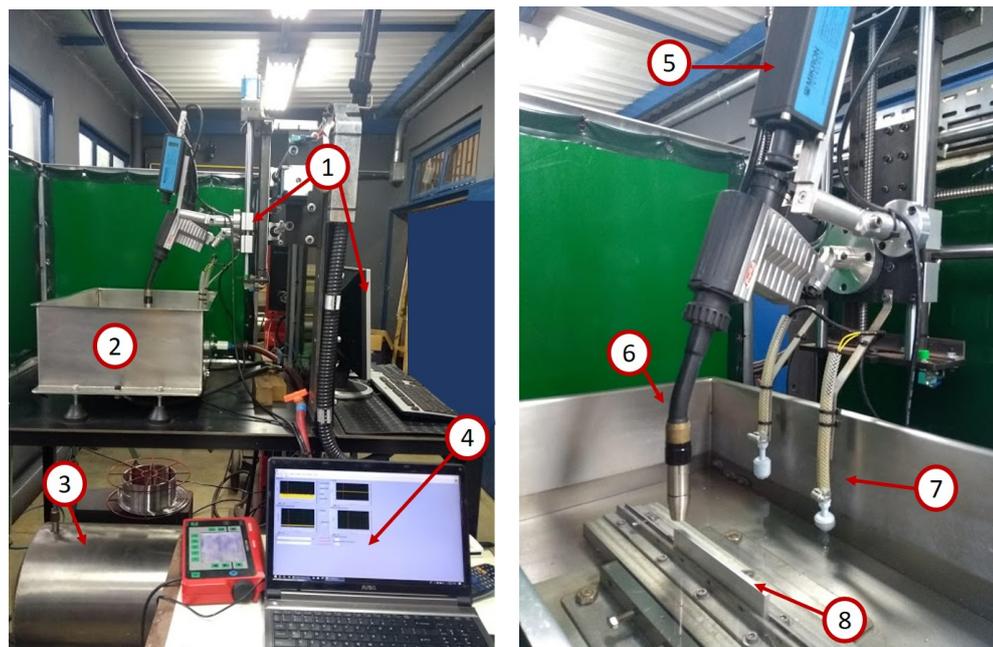
3.1.2 Materiais e Equipamentos

A construção das pré-formas foi realizada inteiramente no LAPROSOLDA-UFU e contou com o consumo dos insumos: arame AWS ER5356 ($\phi = 1,0$ mm), chapa de liga de alumínio Al5052 (250x40x3 mm³) como substrato e argônio comercial como gás de proteção (15 L/min). Os equipamentos e dispositivos utilizados estão dispostos na Figura 22, sendo eles:

- Sistema de soldagem/deposição CMT Fronius VR 7000;
- Cilindro para armazenamento de gás de proteção;
- Sistema de movimentação (mesa de dois eixos controlada por software - eixos X e Z);
- Controlador CNC;
- Pirômetro infravermelho MIKRON Infrared Mi-PE140;
- Dispositivo de E/S multifuncionais National instruments NI USB-6009 (sistema de aquisição de dados para monitoramento de tensão e corrente);
- Tanque de trabalho em aço inox (48x36x30 mm³ / 50 L);
- Tanque de água pressurizada com sistema hidráulico e pneumático;
- Sensor de nível do tipo flutuador magnético;
- Paquímetro 150 mm Universal Mitutoyo.

3.1.3 Execução da Deposição

O arame de liga de alumínio AWS ER5356 foi utilizado pensando em aplicação em estruturas leves e a fim de comparação com resultados obtidos em trabalhos anteriores desenvolvidos no LAPROSOLDA. A velocidade de alimentação é controlada exclusivamente pela tocha CMT (item 6 da Figura 22b) . A velocidade de deposição é determinada pelo sistema de movimentação desenvolvido por Silva (2019), que conta com uma mesa de dois eixos e utiliza do software



(a) Aparato experimental em vista geral

(b) Destaque para o tanque de trabalho

Figura 22 – Aparato experimental para deposição com NIAC: (1) sistema de movimentação, (2) tanque de trabalho, (3) tanque de água pressurizada, (4) sistema de aquisição de dados, (5) pirômetro, (6) tocha CMT, (7) sensor de nível do tipo flutuador magnético, (8) substrato.

Fonte: Elaborada pelo autor.

MACH 03® para programação dos movimentos em X (ao longo do substrato) e em Z (na direção da altura da pré-forma). A fim de tornar o processo mais dinâmico e produtivo e minimizar riscos de acúmulo de material e calor com abertura/extinção do arco nas mesmas posições, a deposição se deu de maneira bidirecional, ou seja, ao final da deposição de cada camada a tocha reverte sua direção e deposita o metal no sentido contrário. Para evitar maior acúmulo de calor, foi adotado um tempo de espera de dois segundos nas deposições com gerenciamento NIAC visando resfriamento local e utilizado também para reabertura do arco elétrico. Com o objetivo de reduzir a radiação do arco elétrico no ambiente e reduzir também os vapores gerados, foram instaladas cortinas de proteção e um sistema de escape de ar, respectivamente (SILVA, 2019). O cabo terra foi conectado nas duas extremidades do tanque de trabalho para minimizar efeitos do sopro magnético do arco. Valores de tensão e corrente foram obtidos através do sistema de aquisição.

Sabe-se por pesquisas anteriores que a altura e largura das pré-formas é diretamente dependente dos parâmetros de deposição (SILVA, 2019). Deseja-se que a altura das pré-formas esteja dentro de uma faixa de 40 a 50 mm e para isto foi preciso realizar testes preliminares que avaliaram quantitativamente com o paquímetro quanto em mm cada camada contribui na altura final da parede metálica. Desta forma, foi possível determinar a altura média de cada camada bem como a quantidade de camadas necessária para se atingir a faixa de altura estabelecida. O comprimento definido das pré-formas é 250 mm (controlado pelo sistema de movimentação). A

Figura 23 ajuda a ilustrar o processo descrito.

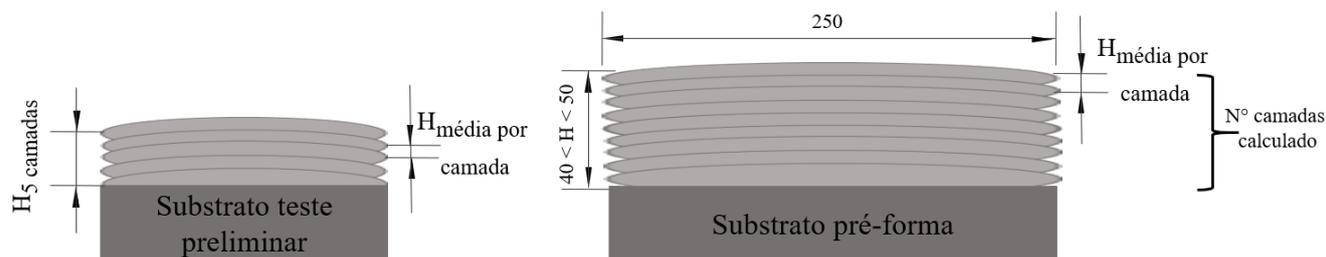


Figura 23 – Definição do número de camadas das pré-formas (mm)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O gerenciamento térmico NIAC utiliza água a temperatura ambiente armazenada em um tanque pressurizado que alimenta o tanque de trabalho (itens 1 e 2 na Figura 24, respectivamente). O controle do nível é feito por um flutuador magnético (item 3 na Figura 24) que eleva o nível da água ao final de cada camada (conforme incremento Z) através de uma válvula solenoide. Desta forma, garante que a distância da lâmina d'água em relação ao nível de deposição (variável h) esteja bem definida. Silva (2019) afirma haver um atraso de 2,1 segundos no tempo de resposta para mudança de nível (o tempo de espera de 2 s entre as camadas serviu então também para estabilização do nível de água). A água sobe ao tanque de trabalho por diferença de pressão e retorna manualmente quando necessário por efeito gravitacional para reutilização. Este sistema também possui além de válvulas e mangueiras, um controlador CNC para comunicação com os motores de passo e computador (itens 4 e 5 na Figura 24, respectivamente).

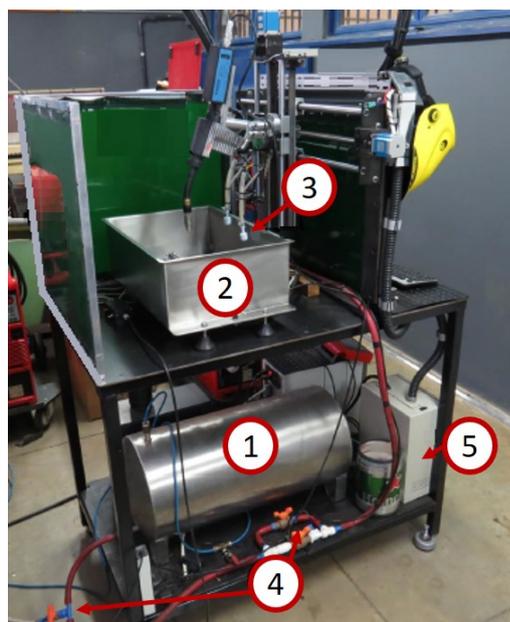


Figura 24 – Sistema hidráulico e pneumático para deposição com NIAC: (1) tanque de água pressurizada, (2) tanque de trabalho, (3) sensor de nível do tipo flutuador magnético, (4) válvulas e mangueiras, (5) controlador CNC.

Fonte: Adaptada de Silva (2019).

Análises térmicas foram feitas por meio de um pirômetro infravermelho acoplado ao sistema de movimentação da tocha (apontado na Figura 22b). Parâmetros como vazão e gás de proteção, líquido de refrigeração e DBCP foram adotados de acordo com envelope desenvolvido por Silva (2019). Demais parâmetros e informações necessárias na construção das pré-formas estão dispostos na Tabela 4. Já a composição química o arame utilizado pode ser vista na Tabela 6

Tabela 4 – Lista de parâmetros de deposição

Arame	AWS ER 5356 - $\phi=1,0$ mm
Substrato	Liga Al5052 (250 x 40 x 3 mm ³)
Gás de proteção	Argônio comercial (vazão de 15 L/min)
Estratégia de deposição	Multicamadas bidirecionais de passe único
DBCP	12 mm
Geometria da pré-forma	Parede única de 250 mm de comprimento
Altura da pré-forma	Entre 40 e 50 mm
Número de camadas	Variável para cada condição
Espera para pré-formas com NIAC	2 segundos
Espera para pré-formas sem resfriamento	2 segundos
Espera para pré-formas com temp. interpasse	Variável para cada condição
Líquido de resfriamento com NIAC	Água em temperatura ambiente
Va, Vd, h	Variáveis de interesse

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 6 – Composição química do arame AWS ER 5356

Elemento	Composição química (%)
Alumínio	>94,00
Magnésio	4,50 a 5,50
Manganês	0,05 a 0,20
Silício	0,25
Bélio	0,0008
Titânio	0,06 a 0,20
Cobre	0,10
Cromo	0,05 a 0,20
Zinco	0,10
Ferro	0,40

Fonte: Harris (2018).

3.2 Análise Térmica

A fim de se avaliar quantitativamente a capacidade da técnica NIAC em reduzir os efeitos do aporte térmico (por meio de sua dissipação rápida) durante a construção das pré-formas,

um pirômetro foi acoplado junto ao sistema de movimentação da tocha (metodologia (4) da Figura 16). Uma câmera térmica ofereceria um panorama amplo, mas Silva, Reis e Scotti (2019) afirmam que a emissividade da pré-forma varia com as características da superfície, tornando a análise cada vez mais complicada. Calcular a emissividade mais adequada para o pirômetro também não é uma tarefa trivial, mas pode ser feita por técnicas de comparação. Além disso, há um problema relacionado à interferência da luz do arco irradiada, onde a faixa de espectro dos pirômetros é estreita (3 a 5 μm) se comparada às câmeras térmicas (8 a 13 μm), mitigando esse erro.

Como a deposição de material foi feita com multicamadas bidirecionais e o pirômetro estava fixo ao sistema, hora as medições foram feitas à frente da poça de fusão e hora atrás, como pode ser ilustrado na Figura 25. O Pirômetro Infravermelho MIKRON Infrared Mi-PE140 com foco óptico possui uma faixa de temperatura de 30 a 1000 °C e uma resolução de 0,1 °C. Além disso, sua faixa espectral vai de 3 a 5 μm e seu foco a uma distância de 380 mm possui diâmetro de 2,9 mm (LUMASENSE, 2019). Para o ajuste de emissividade, adotou-se 0,22 baseado no trabalho de Silva (2019) onde foi usada a técnica de comparação com um termopar tipo K. Durante os testes de calibração, algumas camadas do arame AWS ER5356 foram depositadas e em seguida o termopar foi anexado na última camada, bem próximo ao pirômetro. Uma diferença de 7% entre a emissividade sugerida pelo fabricante e o valor encontrado pode estar relacionada com a evaporação de elementos de baixo ponto de fusão, formando fuligem no momento da deposição. O foco de medição do pirômetro precisou ser posicionado a 30 mm do centro do arco para evitar ruídos na medição.

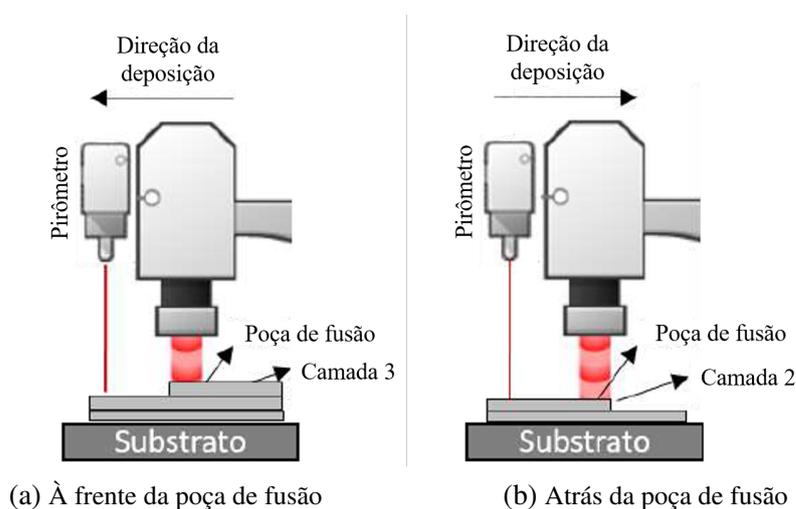


Figura 25 – Posição relativa do pirômetro

Fonte: Felice (2020).

3.3 Micrografia

Avaliar a micrografia das pré-formas é importante para a identificação de fenômenos durante a solidificação do material depositado, em especial em relação à granulação (natureza, forma e quantidade de grãos). Para considerar uma região de maior uniformidade de deposição, e assim consistente para exame, as amostras para análise de micrografia foram retiradas da seção transversal da região central das pré-formas, que está indicada na Figura 26. E como forma de comparação dos resultados foram escolhidas nove pré-formas para esta análise, são elas os pontos centrais e as condições de máxima e mínima energia de deposição das três estratégias de resfriamento abordadas neste trabalho (Tabela 8).

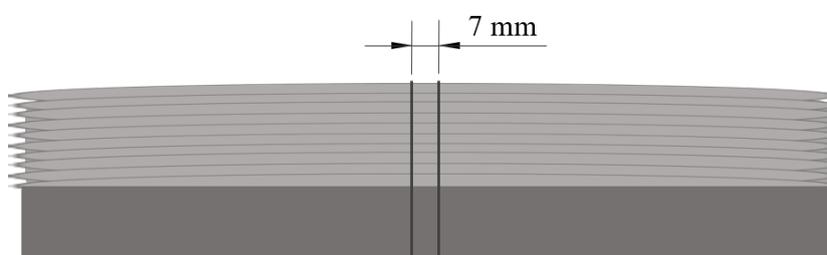


Figura 26 – Seção transversal para análise de micrografia

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Escolha de amostras para análise de micrografia

Corrida	Gerenciamento térmico	Va (mm/min)	Vd (mm/min)
4	NIAC	6000	1100
5		9000	500
15		7500	800
17	Resfriamento Natural	7500	800
18		9000	500
19		6000	1100
20	Sem Resfriamento	7500	800
21		9000	500
22		6000	1100

Fonte: Dados da pesquisa.

As amostras foram submetidas sequencialmente a lixas de 220, 400, 600 e 1200 *mesh*. Em seguida foi feito um polimento com pasta de diamante 1 μm em uma lixadeira e politriz Fortel modelo PLF e realizada limpeza ultrassônica por seis minutos em um equipamento Digital Ultrasonic Cleaner 2500 ml. A tenacidade e baixa dureza do alumínio contribuem para a susceptibilidade do material à deformação durante a preparação metalográfica, necessitando bastante atenção a esta etapa. Além disso, a análise metalográfica do tamanho de grão de ligas não ferrosas precisam de reagentes específicos porque estruturas dendríticas podem ser as únicas reveladas por conta de diferenças comuns de composição química das ligas. Na literatura encontraram-se bons resultados para ligas de Al utilizando ataque eletrolítico com o ácido

fluobórico (HBF_4) também conhecido como "*Barker's reagent*" (KRÓL *et al.*, 2017), (JINAN; SANTOS; PADILHA, 2017),(WEIDMANN; GUESNIER, 2008),(VOORT; MANILOVA, 2009). Neste trabalho, adotou-se um ataque eletrolítico de uma solução de 290 ml de água com 10 ml de HBF_4 50% a 15 V por 3,5 minutos utilizando o equipamento Struers LectroPol-5. O aparato experimental do ataque externo eletrolítico está apresentado na Figura 27. Para produção das imagens foi utilizada luz polarizada do microscópio óptico Olympus BX51M cedido pelo Laboratório de Tribologia e Materiais (FEMEC - UFU). A metodologia adotada para calcular o tamanho de grão foi o chamado *Jeffries Planimetric Method*, baseado na Norma ASTM (2013).



Figura 27 – Ataque eletrolítico

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 Propriedades Mecânicas

3.4.1 Deformação e limite de resistência à tração

Resultados de limite de resistência à tração e deformação mecânica são obtidos tradicionalmente em ensaios de tração com a utilização de extensômetros acoplados aos corpos de prova tradicionais. Como um dos objetivos específicos deste trabalho é desenvolver uma metodologia de medição de deformação por imagem para corpos de prova em miniatura, nesta seção serão apresentados os procedimentos realizados nesse sentido. A fim de se verificar a resistência mecânica tanto na direção de deposição quanto na direção perpendicular e para melhor confiabilidade estatística nos resultados, foram considerados três corpos de prova horizontais e três verticais para cada uma das 22 pré-formas.

Como a deposição é feita de maneira bidimensional, é esperado que as bordas das pré-formas sofram efeitos térmicos mais intensamente que o restante da geometria uma vez que o acúmulo de calor aumenta nesses locais. Souza (2017) explica este fenômeno chamado “efeito das bordas”, onde a molhabilidade do material depositado faz com que ele se espalhe mais e por consequência possa até interferir na espessura média da pré-forma. Por este motivo foi optado por eliminar as bordas de todas as pré-formas na tentativa de se obter amostras o mais uniforme possível no que diz respeito às respostas ao ciclo térmico a qual são submetidas durante sua construção. A Figura 28 ilustra como foram feitos os descartes. Conforme seção anterior, as amostras para micrografia foram retiradas da região central resultando em duas metades de uma mesma pré-forma. As 22 pré-formas possuíam entre 17 e 40 camadas, variando para cada condição conforme já mencionado. A geometria adotada para os corpos de prova em miniatura foi baseada em Lu *et al.* (2017) e pode ser vista na Figura 29. Após a deposição de material, a Manufatura Aditiva exige um pós-processamento de usinagem para faceamento da superfície e chegar à espessura dos corpos de prova. Já a geometria (contorno) foi determinada pela utilização de corte a jato d’água abrasivo da máquina de corte Flow Waterjet Mach 2 utilizando o abrasivo Zirtec Garnet 80 a uma velocidade de 740 mm/min. Estas etapas estão listadas na Figura 30.

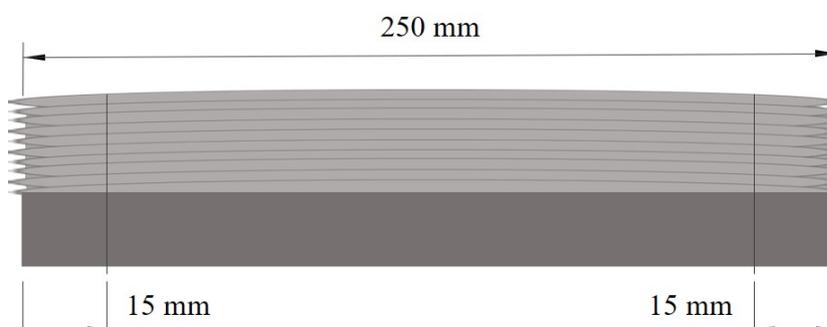


Figura 28 – Eliminação das bordas

Fonte: Elaborada pelo autor.

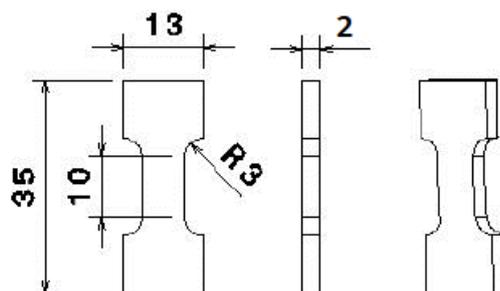
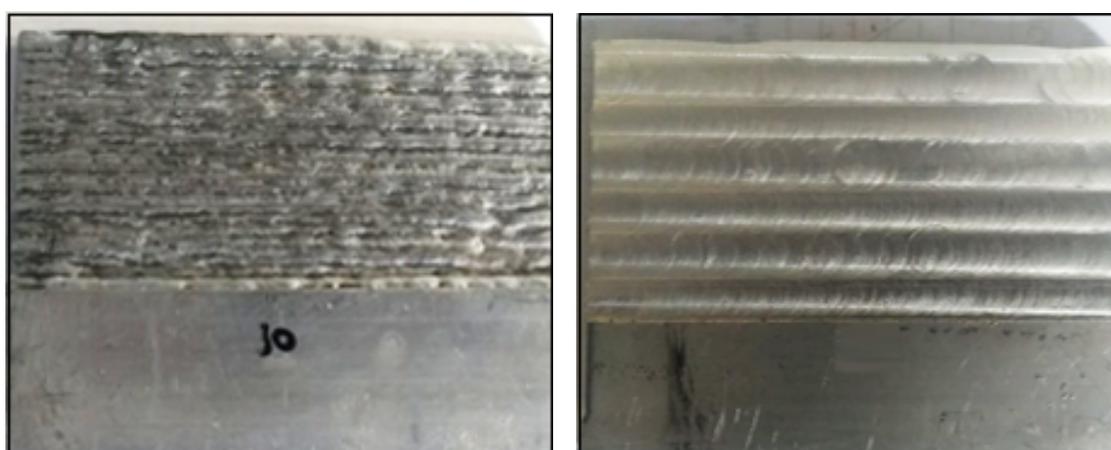


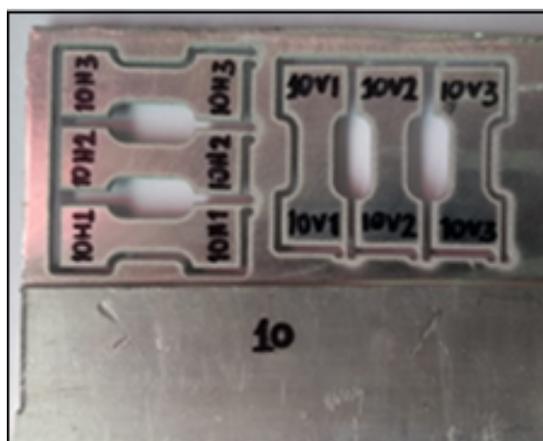
Figura 29 – Geometria de corpos de prova em miniatura

Fonte: Elaborada pelo autor.



(a) Pré-forma original

(b) Pré-forma faceada por fresamento



(c) Corte dos corpos de prova por jato d'água abrasivo

Figura 30 – Etapas de usinagem dos corpos de prova

Fonte: Elaborada pelo autor.

A metodologia para determinação da deformação de corpos de prova em miniatura sofreu algumas alterações desde sua abordagem inicial, que seria a marcação de um círculo na região central do corpo de prova utilizando uma caneta de ponta porosa. Conforme o teste ocorre, o círculo se torna uma elipse e através do Software MATLAB, uma rotina pode medir

constantemente suas dimensões. Em detalhes, o programa pode rastrear o círculo e transformá-lo em uma imagem binária. O próximo passo é ajustar a imagem binária a uma equação de elipse e continuar ajustando-a conforme o tempo passa. A variação do diâmetro em relação ao diâmetro inicial poderia então trazer resultados de deformação ao longo de todo o ensaio, tanto na fase plástica quanto na fase elástica, sendo uma vantagem em relação aos métodos tradicionais. Porém, resultados não satisfatórios foram encontrados e podem estar relacionados com o fato de o diâmetro do círculo ser consideravelmente menor que o pescoço do corpo de prova de 10 mm de comprimento, não sendo capaz de captar parte da deformação sofrida. Outra abordagem adotada simultaneamente foi construir duas linhas paralelas posicionadas na região do pescoço do corpo de prova. De forma semelhante, a ideia também seria acompanhar a variação da distância entre elas durante todo o ensaio. Mas como o processamento da rotina computacional depende diretamente de uma imagem com bom contraste de cores (por envolver transformação em imagens binárias como fase do processo), a pequena dimensão do pescoço faz com que estas linhas desenhadas estejam muito próximas às garras da máquina de tração, ocasionando uma incapacidade da rotina de fazer a leitura em tempo real. A solução encontrada então foi fazer uma medição por imagem da distância das linhas desenhadas no momento do início do ensaio e frações de segundos antes da ruptura. Desta forma, encontra-se um valor de deformação final, que por si só é um bom parâmetro a ser utilizado na avaliação da técnica NIAC bem como na verificação da influência das variáveis abordadas na resistência mecânica dos componentes produzidos.

Os ensaios de tração foram realizados no LAPROSOLDA através da máquina de tração Shimadzu AG-X 300 kN a uma taxa de aquisição de resultados de 100 Hz. Baseado na Norma ASTM (2017b) empregou-se uma velocidade de ensaio de 1 mm/min. Todos os ensaios foram filmados por um celular montado em um suporte pensando na praticidade de uma metodologia acessível para resultados de deformação mecânica nestes corpos de prova em miniatura. As imagens foram retiradas dos vídeos, que foram feitos a uma taxa de 30 frames/s com câmera Full HD 1080p. O software ImageJ® foi utilizado na medição da distância das linhas paralelas e a calibração foi feita baseada na largura dos corpos de prova, que foi medida usando um paquímetro de resolução 0,01 mm, bem como suas espessuras. A Figura 31 mostra uma vista lateral do aparato experimental, onde o corpo de prova se encontra de perfil. A diferença visual na evolução por imagem da deformação dos corpos de prova está indicada na Figura 32.

A fim de examinar a veracidade dos resultados encontrados, uma análise foi feita comparando a distância calculada pelo software Image J e a distância real das linhas medida através do paquímetro após o fim do ensaio em 11 corpos de prova escolhidos de forma aleatória. Apesar da medição via paquímetro não considerar a deformação elástica (que será recuperada após a ruptura), pouca diferença é esperada, visto que a fase elástica representa aproximadamente 0,2% de deformação de um material extremamente dúctil. A Tabela 9 expõe estas comparações e baseado nestes resultados, pode-se afirmar que a metodologia adotada é coerente, principalmente

porque todos erros relativos são positivos (ou seja, as medições com o paquímetro são sempre menores indicando que houve recuperação do material pela fase elástica). Espera-se em um futuro próximo resolver as dificuldades relacionadas ao ensaio com corpos de prova de pequenas dimensões de forma a possibilitar a medição da deformação durante todo o ensaio via software dedicado.



Figura 31 – Aparato experimental para ensaios de tração: (1) corpo e prova em miniatura, (2) máquina de tração Shimadzu, (3) celular equipado de câmera, (4) luz LED

Fonte: Elaborada pelo autor.

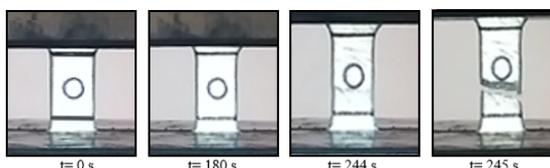


Figura 32 – Evolução por imagem da deformação em um CP

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 9 – Metodologias para medir distância entre retas paralelas

Imagem (mm)	Paquímetro (mm)	Erro %
12,17	11,78	3,3
13,68	13,60	0,6
14,50	14,04	3,3
11,98	11,58	3,4
10,32	10,12	1,9
12,91	12,36	4,4
11,67	11,34	2,8
12,70	12,16	4,5
12,11	12,06	0,4
11,82	11,54	2,4
11,35	11,28	0,6

Fonte: Dados da pesquisa.

3.4.2 Microdureza

A análise de microdureza foi feita baseada na Norma ASTM (2017a) considerando as mesmas nove amostras preparadas superficialmente para as micrografias. Foi utilizado o microdurômetro digital Shimadzu HVM-G. A escala HV utiliza um indentador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada. A carga utilizada foi de 1,0 kgf aplicada por 15 s. As 11 medições de cada amostra foram feitas em uma sequência linear ao longo de sua superfície central, tomando uma distância de 25 μm entre cada indentação.

3.5 Produtividade

A análise de produtividade foi feita basicamente através da contagem de tempo necessário na deposição das pré-formas através de um cronômetro. As 16 pré-formas submetidas ao NIAC e as três pré-formas sem resfriamento contaram com deposição contínua. Já as três pré-formas de resfriamento natural através de temperaturas de interpasse tiveram uma abordagem diferente. Com base já nos resultados térmicos obtidos pelo pirômetro infravermelho, uma faixa de temperatura de interpasse foi determinada para cada uma dessas três pré-formas (ponto central, máxima e mínima energia de deposição). A determinação destas faixas foi feita através da obtenção da temperatura que representasse o primeiro quartil da distribuição de temperatura ao longo da deposição da pré-forma em condição equivalente com NIAC (como pode ser visto na Figura 33). Por exemplo, para a pré-forma 18 ($V_a=9000$ mm/min, $V_d=500$ mm/min) a temperatura do primeiro quartil da deposição da pré-forma 5 (equivalente) é 92°C . A faixa de temperatura escolhida foi de 85 a 95°C , indicada em linhas vermelhas na Figura 33. Uma vez determinada esta faixa, ao final da deposição de cada camada o arco elétrico permaneceu desligado até que pirômetro acusasse uma temperatura dentro desta faixa. Todo este processo foi cronometrado para se obter o tempo total de deposição em cada caso.

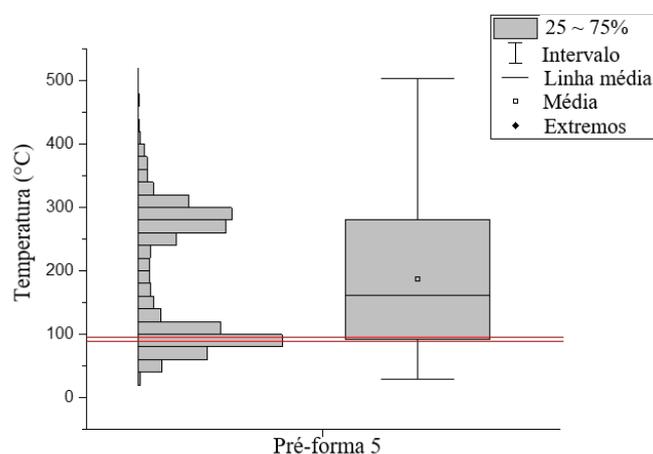


Figura 33 – Determinação da temperatura de interpasse para a pré-forma 18

Fonte: Dados da pesquisa.

RESULTADOS

4.1 Análise Térmica

Os resultados de temperatura foram colhidos a uma taxa de aquisição de 100 Hz e uma deposição completa está disposta em forma de gráfico na Figura 34, que se refere à pré-forma 16 (ponto central NIAC). Este padrão em geral se repete para as demais pré-formas. A Figura 35 mostra em detalhes um ciclo com deposição bidirecional de duas camadas. No momento em que o pirômetro está posicionado atrás da poça de fusão (Figura 25b), ele consegue captar as maiores temperaturas. Os picos observados se devem ao fato de no momento de repouso antes da deposição das camadas ímpares o pirômetro apontar para a cuba d'água e assim que o sistema de eixos se movimentar, a temperatura captada passa a ser da pré-forma. Durante o período de pausa entre uma camada e outra (2 s para pré-formas com NIAC e sem resfriamento) observa-se um pequeno acúmulo de calor. O próximo passe (agora em direção contrária) se dará com o pirômetro à frente da poça de fusão (Figura 25a) e corresponde à construção de camadas pares.

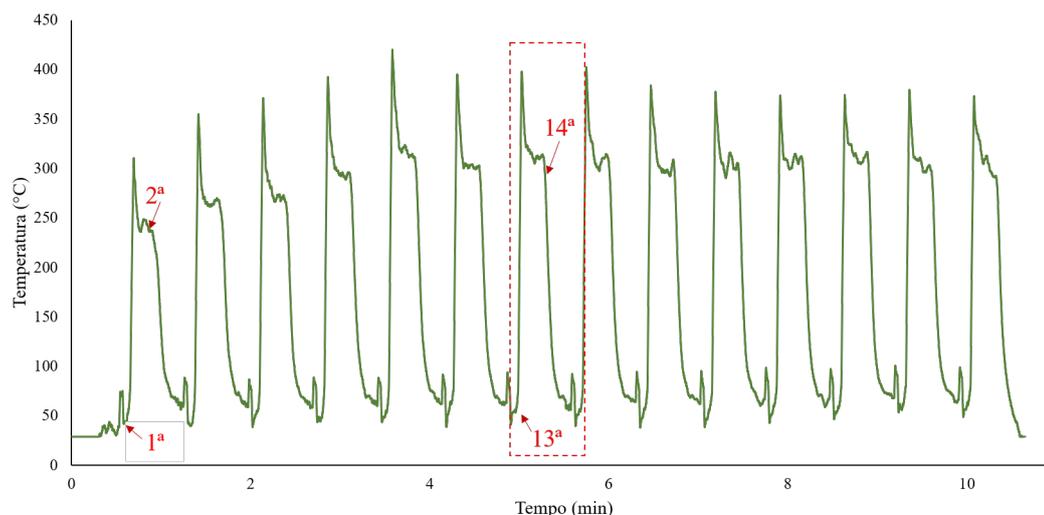


Figura 34 – Ciclo térmico para pré-forma do ponto central com NIAC (corrida 16)

Fonte: Dados da pesquisa.

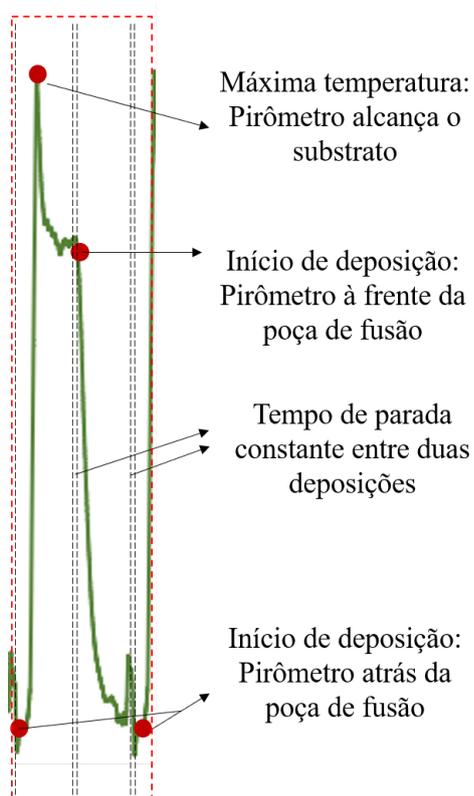


Figura 35 – Ciclo térmico em detalhe da Figura 34

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outra vista em detalhes da deposição da última e penúltima camada considerando as três estratégias de resfriamento em ponto central pode ser vista na Figura 36 (corridas 15, 17 e 20). As linhas tracejadas indicam o tempo de parada entre passes, consideravelmente maior para a pré-forma de resfriamento natural (tempo de espera para determinada temperatura de interpasso). Observa-se claramente como o NIAC apresenta menores temperaturas.

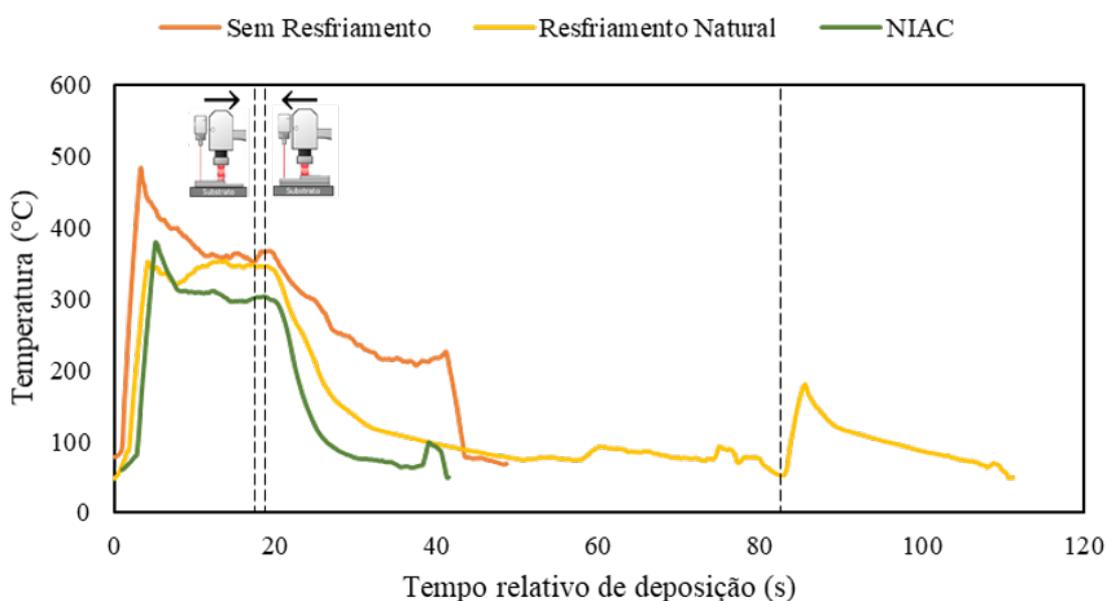


Figura 36 – Dados de temperatura do pirômetro à frente e atrás da poça de fusão (duas camadas) para pré-formas de pontos centrais (corridas 15, 17 e 20)

Fonte: Dados da pesquisa.

A fim de se comparar os patamares de temperatura ao longo de toda a deposição das pré-formas, a Figura 37 foi construída relacionando também as energias de deposição: máxima, central e mínima.

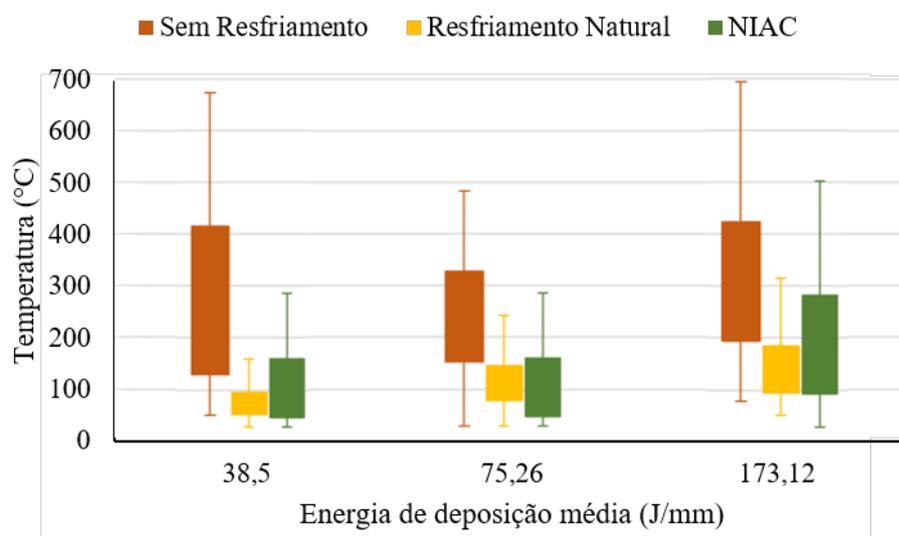


Figura 37 – Distribuição de temperatura comparativa entre as estratégias de resfriamento

Fonte: Dados da pesquisa.

A fim de se avaliar o planejamento como um todo e verificar a influência das variáveis e de suas interações nos resultados de temperatura que representa o primeiro quartil (interpasso) a Tabela 10 foi construída. Com estes resultados em mãos, é possível construir um modelo

matemático que melhor se adequa às respostas de temperatura de interpasse através do software STATISTICA® para o Planejamento Composto Central do NIAC. Considerando um intervalo de confiança de 95%, o modelo reduzido (desconsiderando os efeitos não significativos) chegou a um coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 77,4% e está representado na Equação 4.1:

$$T_{25\%} = 68,12 + 9,18Va + 17,84h \quad (4.1)$$

A verificação do gráfico de resíduos em função dos valores previstos não mostrou nenhuma tendência como aponta a Figura 38, ou seja, a aleatoriedade dos pontos é mais um indício de que o modelo está adequado. As superfícies de resposta estão dispostas na Figura 39, Figura 40 e Figura 41. Pelas imagens fica clara a influência do NIAC nos resultados, mostrando que a estratégia é capaz de reduzir significativamente as temperaturas ao longo da construção das pré-formas. Em se tratando da variável Vd, assim como mostra o modelo reduzido, há pouca influência nos resultados. Ao contrário de Vd, Va se mostra influente tanto na Figura 39 quanto na Figura 41.

Tabela 10 – Resultados de Temperatura de Interpasse - Planejamento Composto Central

Corrida	Va (mm/min)	Vd (mm/min)	h (mm)	Temp. Interpasse (°C)
1	6000	500	30	69,0
2	6000	500	10	35,4
3	6000	1100	30	73,4
4	6000	1100	10	47,2
5	9000	500	30	92,9
6	9000	500	10	41,4
7	9000	1100	30	85,8
8	9000	1100	10	67,0
9	5570	800	20	55,2
10	9431	800	20	87,6
11	7500	414	20	46,7
12	7500	1186	20	71,0
13	7500	800	33	85,1
14	7500	800	7	29,0
15	7500	800	20	48,6
16	7500	800	20	67,0

Fonte: Dados da pesquisa.

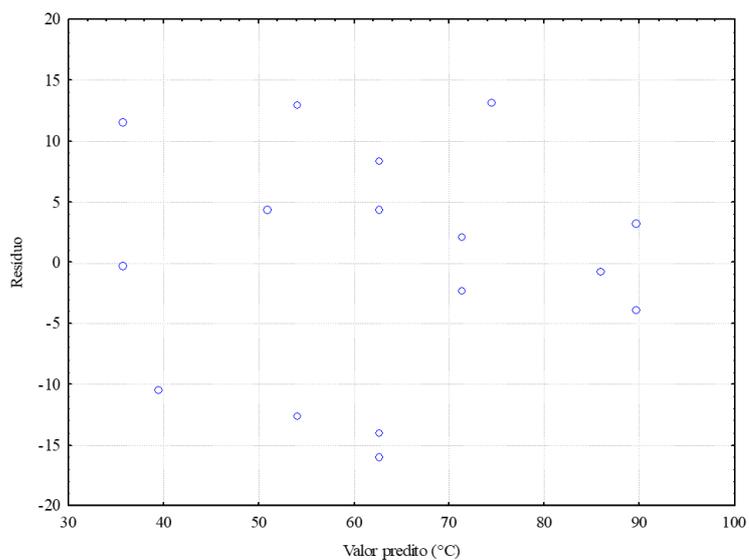


Figura 38 – Valor predito versus resíduos para temperaturas de interpasse

Fonte: Dados da pesquisa.

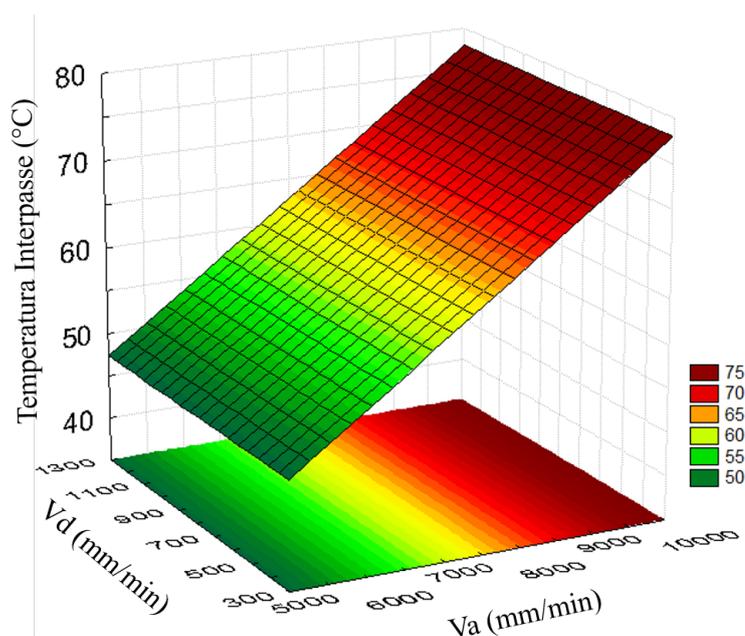


Figura 39 – Superfície de resposta de temperatura de interpasse com variação de Va e Vd em h=20 mm

Fonte: Dados da pesquisa.

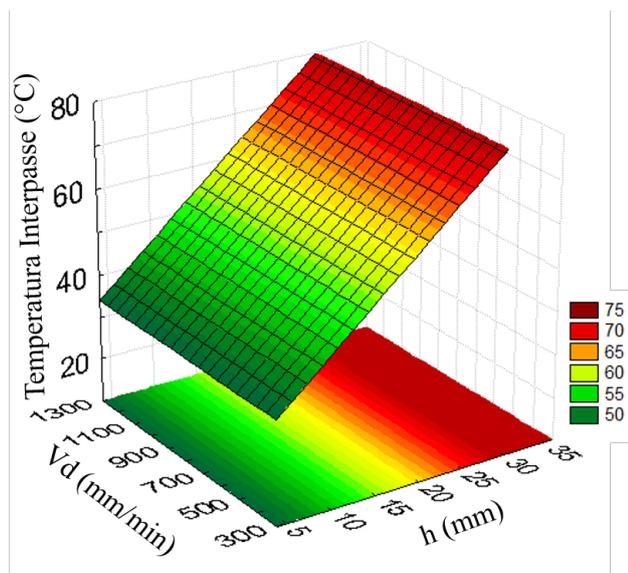


Figura 40 – Superfície de resposta de temperatura de interpasse com variação de Vd e h em Va=7500 mm/min

Fonte: Dados da pesquisa.

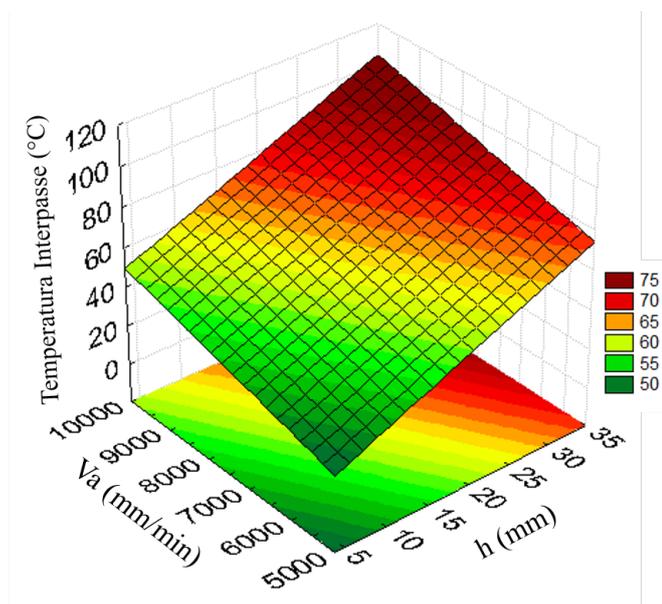


Figura 41 – Superfície de resposta de temperatura de interpasse variação de Va e h em Vd=800 mm/min

Fonte: Dados da pesquisa.

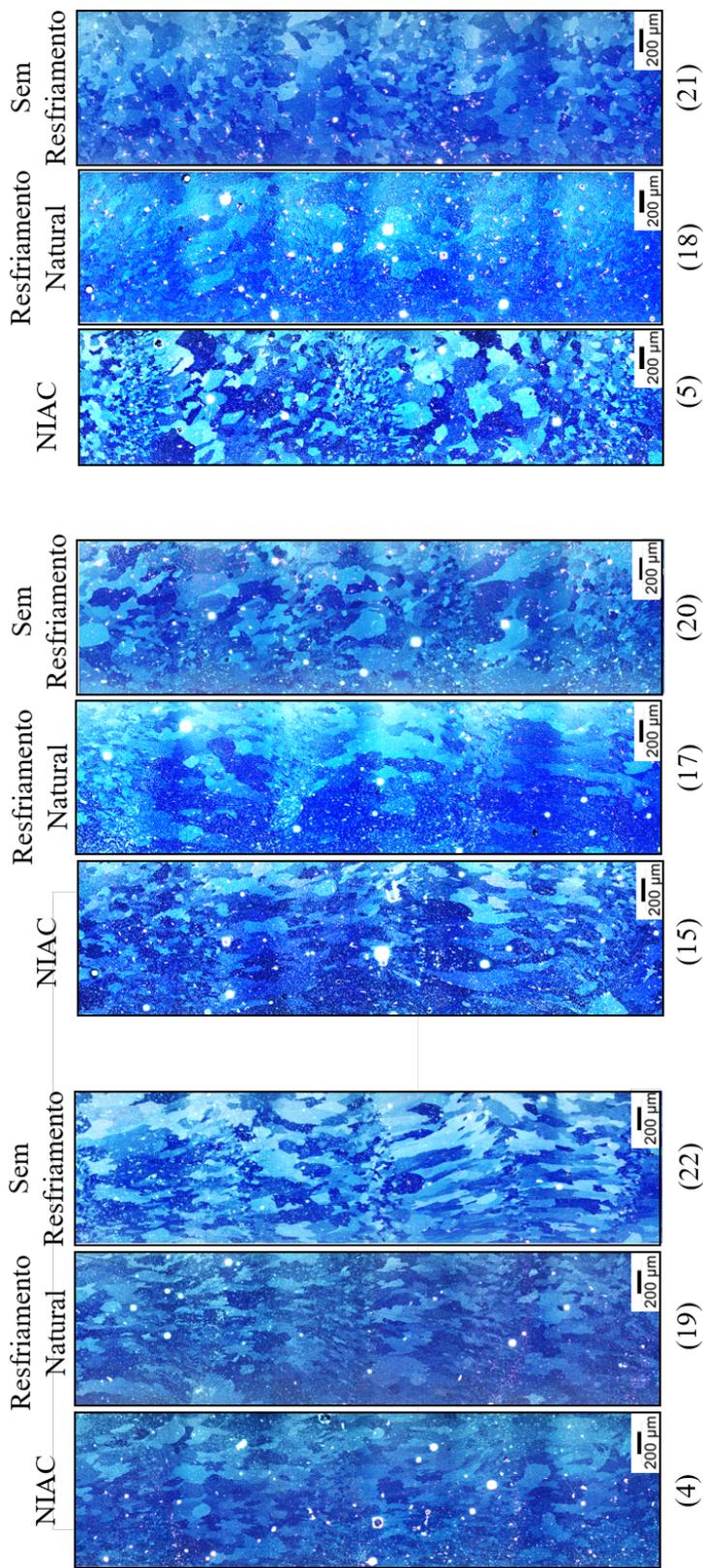
4.2 Micrografias

As nove micrografias feitas a fim de se comparar as três estratégias de deposição bem como os três níveis de energia de deposição podem ser vistas na Figura 42 e quantitativamente através da Tabela 11, que traz os tamanhos de grão. Como principais características destes resultados pode-se dizer em várias imagens que a zona da linha de fusão pode ser facilmente identificada através de maior refino de grão. Além disso, fica claro que o Resfriamento Natural produziu grãos maiores e mais alongados na direção de crescimento vertical das pré-formas, certamente devido ao tempo de resfriamento ao qual foram expostos. Nota-se também que mesmo amostras com bom refino de grão apresentam regiões de grãos alongados, podendo atuar como regiões de movimentação de discordâncias e conseqüentemente prejudicando as propriedades mecânicas.

Tabela 11 – Resultados de Tamanho de Grão

Corrida	Gerenciamento térmico	Va (mm/min)	Vd (mm/min)	Tamanho de Grão (μm)
4	NIAC	6000	1100	20,1
5		9000	500	15,5
15		7500	800	18,3
17	Resfriamento Natural	7500	800	24,3
18		9000	500	25,8
19		6000	1100	22,7
20	Sem Resfriamento	7500	800	18,8
21		9000	500	18,0
22		6000	1100	18,2

Fonte: Dados da pesquisa.



Energia de deposição média (J/mm)

Figura 42 – Micrografias comparativas

Fonte: Dados da pesquisa.

Já a Figura 43 exibe um comparativo de imagens para NIAC de mínima e máxima energia de deposição (pré-formas 4 e 5, respectivamente) em duas diferentes regiões de uma mesma amostra: região inferior (próxima ao substrato) e região superior. Para a amostra de mínima energia nota-se que na região inferior os grãos estão mais alongados, indicando que o acúmulo de calor inicial levou, mesmo com a baixa energia de deposição somada ao resfriamento NIAC, a produzir grãos maiores. Já a amostra da pré-forma 5, de máxima energia de deposição, mostra um comparativo das duas regiões sem diferenças visuais e com grãos maiores que a condição com menor energia de deposição.

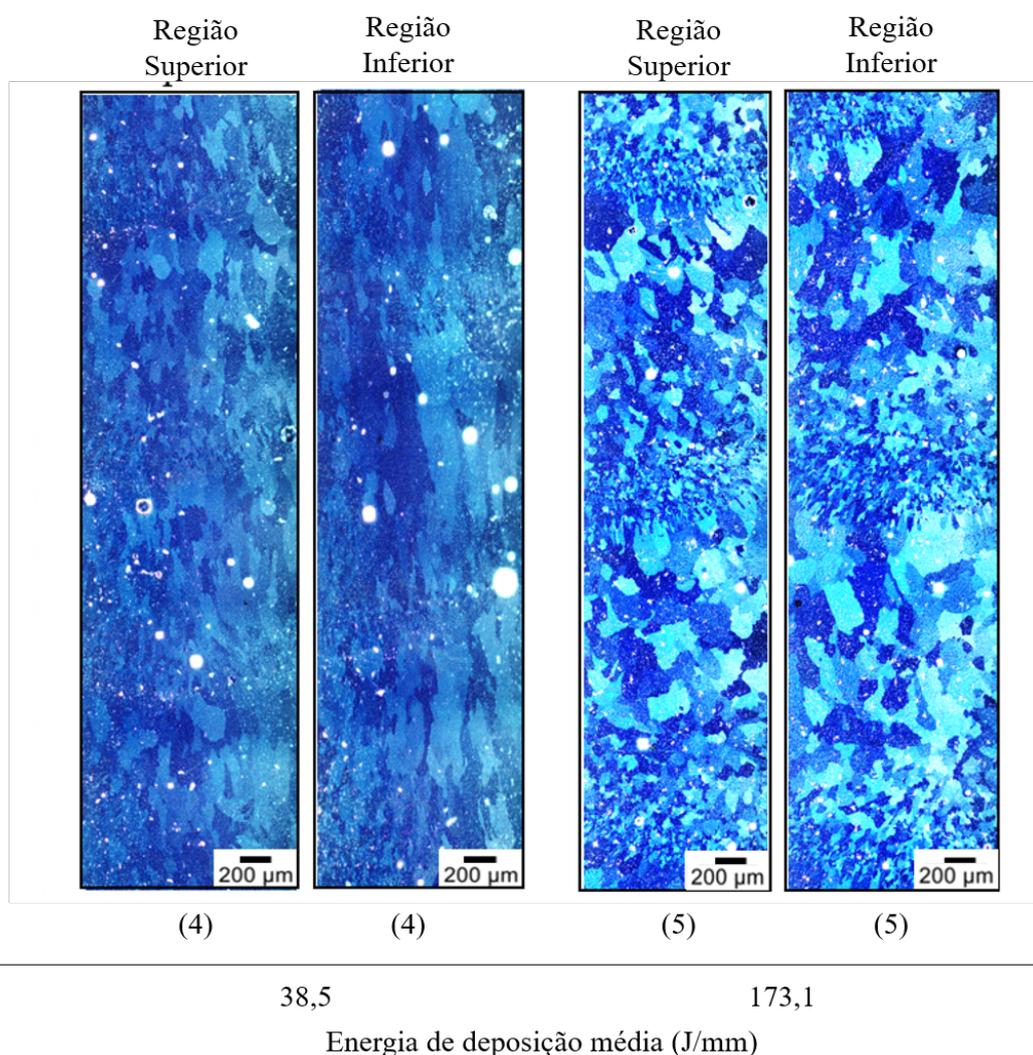


Figura 43 – Comparação de duas regiões de pré-formas

Fonte: Dados da pesquisa.

4.3 Propriedades Mecânicas

4.3.1 Deformação e Limite de Resistência à Tração

No momento de usinagem dos corpos de prova, houve certa insegurança em relação à espessura dos corpos de prova para com a capacidade do equipamento de tração disponível em realizar os testes de maneira segura e confiável. Para isto, um teste preliminar foi realizado utilizando corpos de prova de liga de alumínio laminado de mesma geometria a ser utilizada no trabalho. O resultado está disposto na Figura 44. Foram então realizados 132 testes de tração referentes às 22 pré-formas e aos seis corpos de prova de cada uma (três verticais e três horizontais). Alguns resultados não foram computados, seja por perda de corpos de prova no processo de usinagem ou no ensaio de tração. Todas as curvas Tensão x Deslocamento podem ser vistas no Apêndice A. A fim de demonstrar o comportamento característico dos resultados, a Figura 45 exhibe as curvas referentes ao ponto central com NIAC, pré-forma 15.

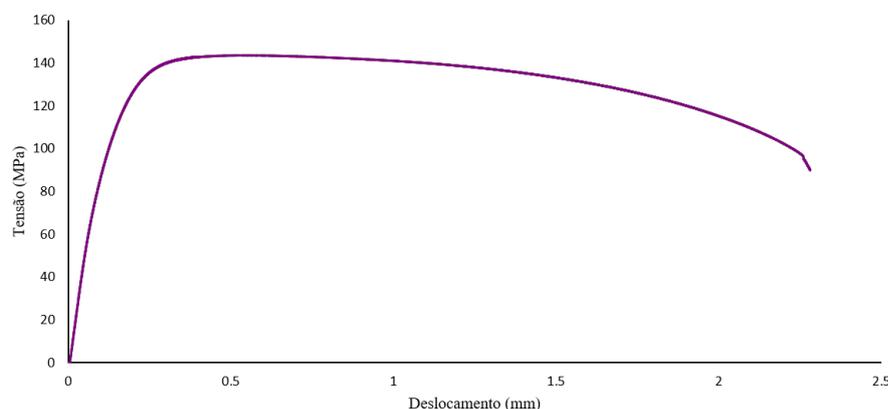
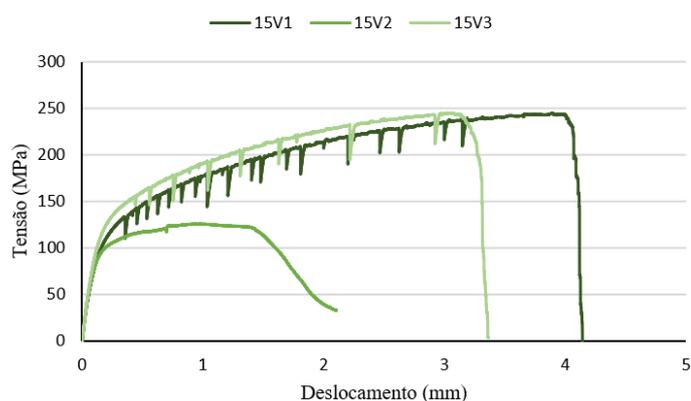
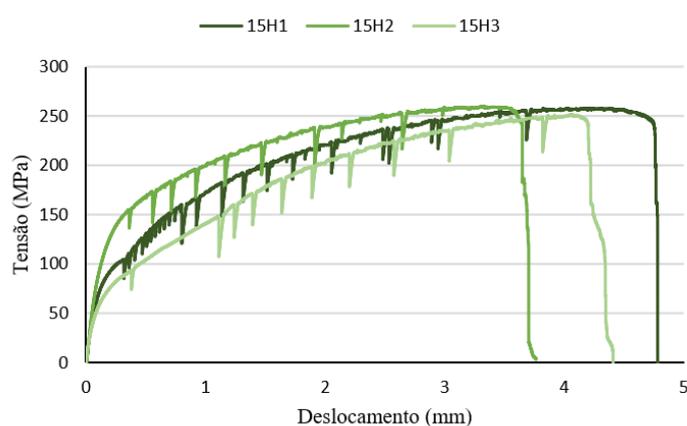


Figura 44 – Resultado de ensaio de tração preliminar

Fonte: Dados da pesquisa.



(a) Corpos de prova verticais



(b) Corpos de prova horizontais

Figura 45 – Resultados de curva Tensão x Deslocamento para pré-forma 15 - Ponto Central NIAC

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao contrário do que se possa imaginar, as instabilidades (quedas e recuperações rápidas) de tensão encontrados na curva não estão relacionados com escorregamento do corpo de prova nas garras da máquina de tração visto que o teste preliminar de material isotrópico e mesma geometria não apresentou tal característica. Além disso, os poucos ensaios em que de fato houve escorregamento possuem resultados descritos conforme o corpo de prova 15V2 na Figura 45a e ficam fisicamente marcados indicando escorregamento (Figura 46a). Estas instabilidades de tensão certamente estão relacionadas com o acomodamento do material quando submetidos à força de tração. Uma possível teoria é a de formação de poros adjacentes às extremidades e que vez ou outra seria capaz de aliviar a tensão ao decorrer do ensaio. Uma característica marcante da estrutura final dos corpos de prova deste trabalho após a ruptura é uma aparência mais brilhante e com formação de algumas ondulações na região do pescoço do corpo de prova. Estas ondulações talvez se formam por se tratar de uma estrutura com diferenças do tamanho de grão ao longo do comprimento do pescoço onde os grãos maiores estão propensos a se deformarem antes dos grãos menores. Uma comparação entre um corpo de prova provindo de alumínio laminado e

deste trabalho pode ser vista na Figura 46.

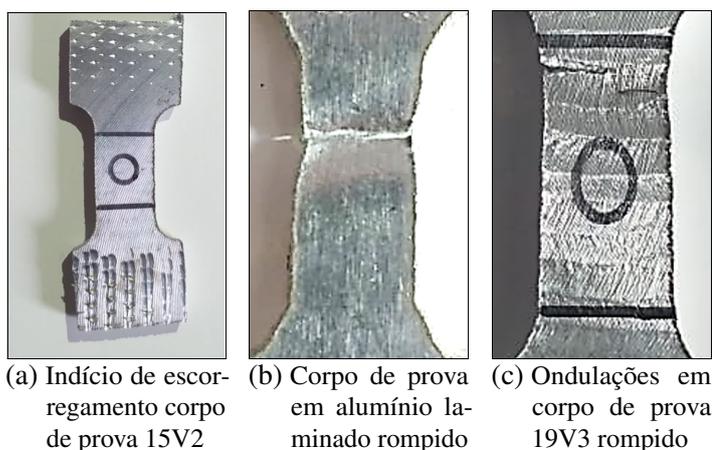


Figura 46 – Corpos de prova ensaiados

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados de deformação estão indicados na Tabela 12 e de forma gráfica na Figura 47 e Figura 48.

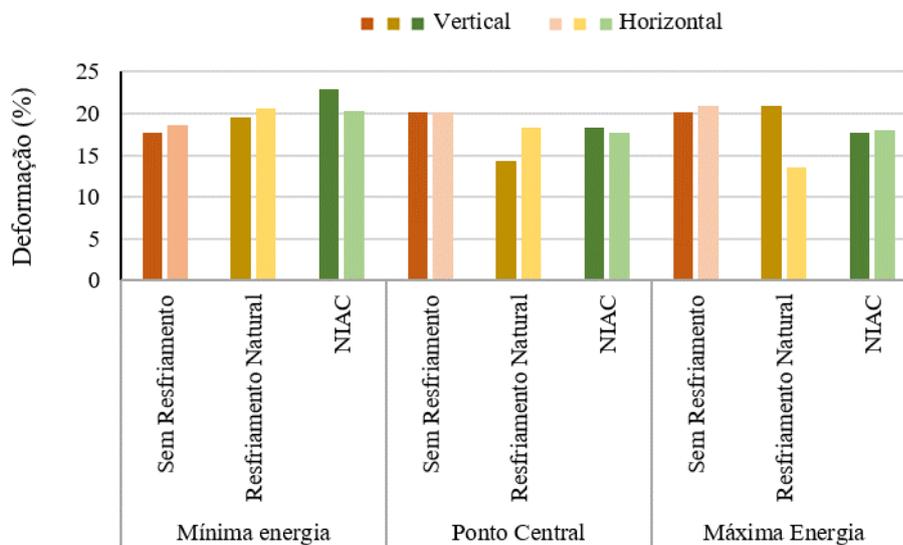
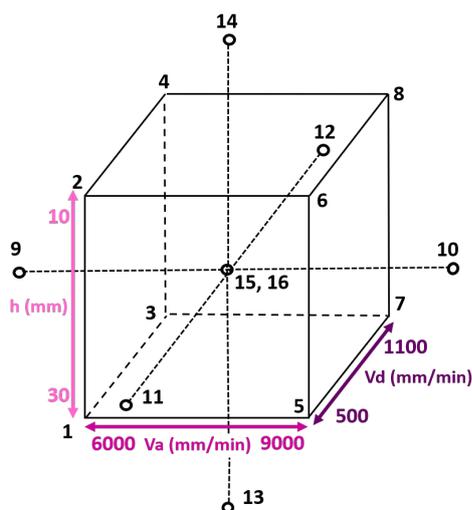
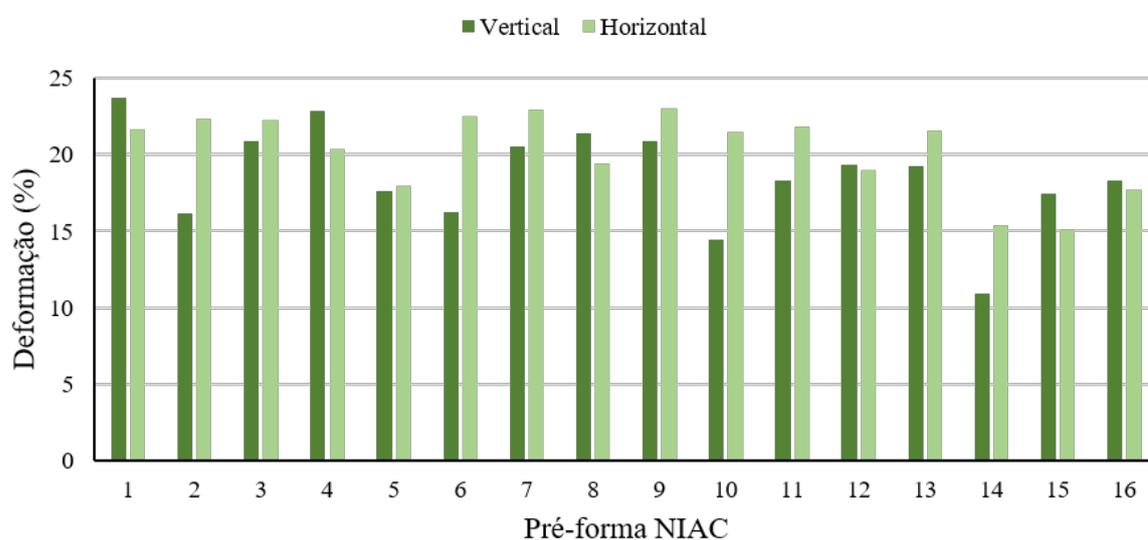


Figura 47 – Resultados de deformação comparativos entre as diferentes estratégias de resfriamento

Fonte: Dados da pesquisa.



(a) Planejamento Composto Central



(b) Deformação para NIAC

Figura 48 – Deformação para corpos de prova de pré-formas NIAC

Fonte: Dados da pesquisa.

Comparando as três estratégias de resfriamento, observa-se pequena desvantagem do Resfriamento Natural, em alguns casos ficando abaixo de 17% que é o esperado para ER5356. Esta queda de deformação pode ser esperada considerando que Derekar *et al.* (2019) comentam da difusão de hidrogênio e engrossamento de poros na MA da mesma liga, onde maiores tempos de resfriamento entre passes poderia favorecer este fenômeno.

No que se refere ao Planejamento Composto Central, as pré-formas que menos se deformaram em posição vertical se referem às pré-formas 10 e 14, pontos de extrapolação superior das variáveis V_a e h , respectivamente. Esta perda, em geral, em deformação da pré-

Tabela 12 – Resultados de Deformação

Corrida	Va (mm/min)	Vd (mm/min)	h (mm)	Def. Vertical (%)	Desvio -	Def. Horizontal (%)	Desvio -
1	6000	500	30	23,69	2,96	21,69	0
2	6000	500	10	16,16	1,77	22,33	2,36
3	6000	1100	30	20,87	1,04	22,26	3,58
4	6000	1100	10	22,87	2,23	20,36	0,04
5	9000	500	30	17,64	0,79	17,94	1,88
6	9000	500	10	16,25	0,52	22,5	0,33
7	9000	1100	30	20,58	2,47	22,94	1,08
8	9000	1100	10	21,41	1,31	19,39	1,61
9	5570	800	20	20,85	2,37	23,02	1,7
10	9431	800	20	14,41	0,69	21,49	1,68
11	7500	414	20	18,3	0,08	21,83	1,17
12	7500	1186	20	19,34	0,13	18,95	1,64
13	7500	800	33	19,26	0,27	21,56	3,09
14	7500	800	7	10,94	1,58	15,42	2,83
15	7500	800	20	17,46	0,12	15,14	0,08
16	7500	800	20	18,33	1,45	17,67	1,59
17	7500	800	-	14,35	0,49	18,29	1,59
18	9000	500	-	20,9	0,74	13,5	0,83
19	6000	1100	-	19,46	0,56	20,59	0,75
20	7500	800	-	20,09	1,24	20,2	1,72
21	9000	500	-	20,15	0	20,85	2,75
22	6000	1100	-	17,64	3,95	18,65	1,53

Fonte: Dados da pesquisa.

forma 14 ($V_a=7500$ mm/min, $V_d=800$ mm/min, $h=7$ mm) pode estar relacionada com porosidade induzida pelo hidrogênio em função da pequena distância entre a poça de fusão e a água do NIAC. No que se refere aos resultados de corpos de prova verticais, não foi identificada dependência em relação a nenhuma das variáveis analisadas. Já quanto à deformação de corpos de prova horizontais, apesar de possuir um coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 34,2% a dependência em relação à variável V_a pode ser descrita como o modelo reduzido:

$$Def - Horizontal = 18,52 + 2,49V_a^2 \quad (4.2)$$

De maneira semelhante, em relação ao Limite de Resistência à Tração (LRT), os resultados estão dispostos na Tabela 13 e graficamente na Figura 49 e Figura 50. Com exceção da condição com baixa energia, as condições com NIAC parecem levar a resultados menos anisotrópicos em termos de deformação se comparado às condições com resfriamento natural.

Tabela 13 – Resultados de Limite de Resistência à Tração

Corrida	Va (mm/min)	Vd (mm/min)	h (mm)	LRT Vertical (MPa)	Desvio -	LRT Horizontal (MPa)	Desvio -
1	6000	500	30	247,74	1,23	261,44	1,51
2	6000	500	10	242,05	1,06	257,67	5,08
3	6000	1100	30	238,39	2,9	249,49	2,36
4	6000	1100	10	239,5	0,29	255,89	1,4
5	9000	500	30	240,38	1,32	238,35	0,61
6	9000	500	10	250	3,17	251,93	0,8
7	9000	1100	30	246,07	1,78	249,05	3,65
8	9000	1100	10	236,51	3,47	256,73	4,04
9	5570	800	20	233,38	3,73	256,81	0,83
10	9431	800	20	241,01	1,36	258,05	2,66
11	7500	414	20	261,17	0,32	263,01	2,28
12	7500	1186	20	239,22	0,2	262,06	1,71
13	7500	800	33	244,05	0,89	244,43	0,35
14	7500	800	7	237,61	1,82	239,08	0,26
15	7500	800	20	241,65	4,53	252,1	1,45
16	7500	800	20	240,15	2,95	251,56	2,95
17	7500	800	-	242,78	1,14	260,69	0,41
18	9000	500	-	259,02	1,24	253,25	0,91
19	6000	1100	-	249,78	1,05	267,1	3,7
20	7500	800	-	251,81	0,01	258,39	2,24
21	9000	500	-	250,81	0,57	251,6	1,69
22	6000	1100	-	246,36	1,37	261,31	1,63

Fonte: Dados da pesquisa.

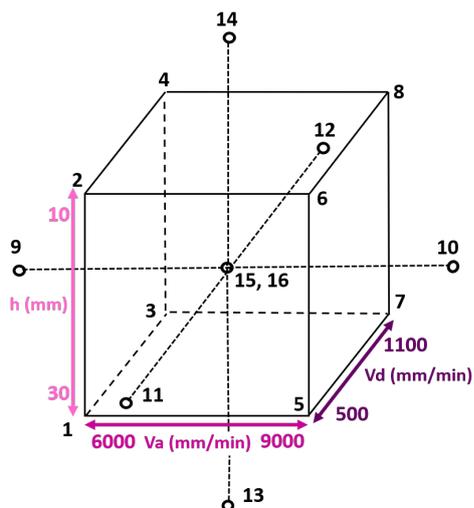
Para o Planejamento do NIAC é possível verificar que com exceção da pré-forma 5 (máxima energia de deposição), todos os outros resultados de LRT para corpos de prova verticais são inferiores aos horizontais. Uma possível explicação para isso é a microestrutura não homogênea ao longo da zona de fusão. Assim como para resultados de deformação, a pré-forma 9 também apresentou resultados inferiores quando comparados aos demais. A relação entre as variáveis de interesse culminam em um modelo reduzido de coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 31,7%:

$$LRT - Vertical = 242,43 - 4,24Vd \quad (4.3)$$

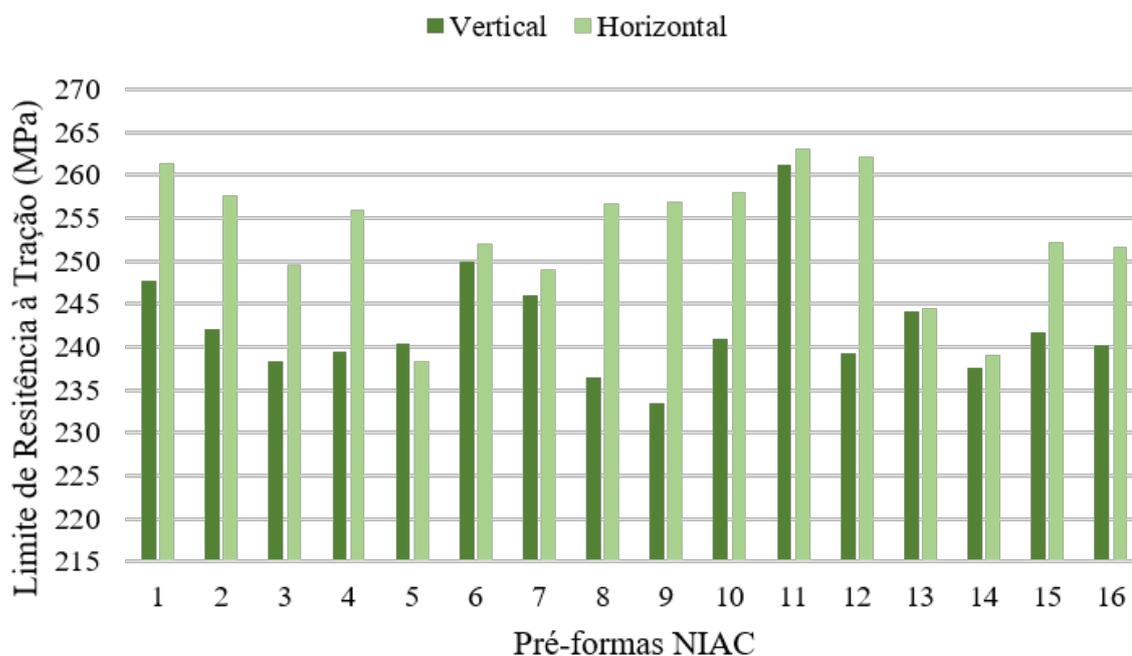
Em se tratando dos corpos de prova horizontais, para um coeficiente de determinação (R^2) de aproximadamente 35,5% o modelo reduzido pode ser descrito como:

$$LRT - Horizontal = 258,19 - 7,33h \quad (4.4)$$

Em geral, para o Planejamento NIAC a pré-forma 11 (extrapolação inferior de Vd) obteve os melhores resultados, ao contrário da pré-forma 5 (máxima energia de deposição).



(a) Planejamento Composto Central



(b) LRT para NIAC

Figura 49 – Resultados de Limite de Resistência à Tração para pré-formas do Planejamento Composto Central NIAC

Fonte: Dados da pesquisa.

Agora quando comparadas as estratégias de resfriamento, os resultados se mantiveram muito similares e com permanência da tendência de corpos de prova horizontais possuírem maiores valores de LRT (possível limitação de resistência pelo empilhamento das camadas).

A grande maioria dos resultados obtidos neste trabalho ficaram dentro das especificações listadas na Tabela 14, que traz comparações de propriedades mecânicas da mesma liga AWS

ER5356 quando fabricada por forjamento e por deposição. As exceções são os valores de deformação para a pré-forma 14 (extrapolação superior da variável h), 10 (extrapolação superior de Va) e pré-formas 17 e 18 de Resfriamento Natural. Para o Limite de Resistência à Tração, todos os resultados se enquadram no intervalo dado. Isso indica que a aplicação do NIAC não comprometeu a resistência avaliada.

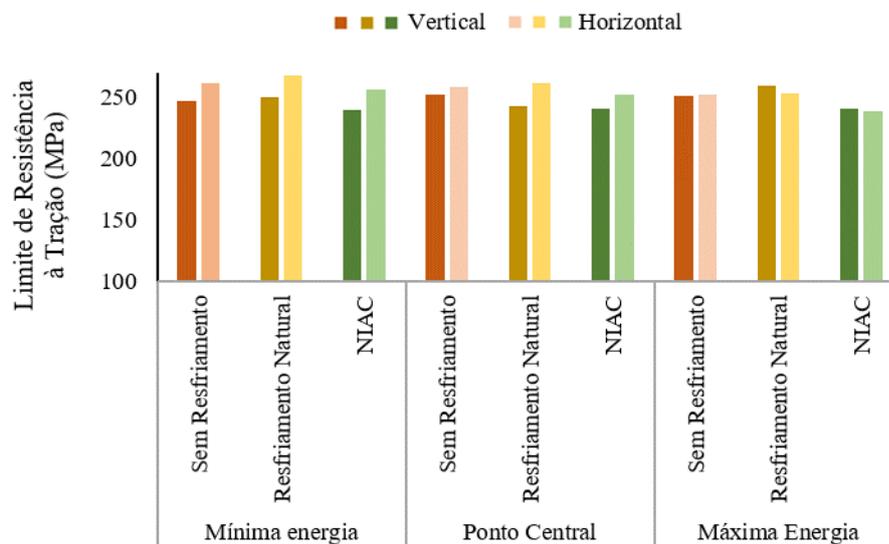


Figura 50 – Resultados de Limite de Resistência à Tração comparativos entre as diferentes estratégias de resfriamento

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 14 – Propriedades mecânicas comparativas para a Liga AWS ER5356

Liga	Processo de Fabricação	LRT (MPa)	Deformação (%)	Referência
AA5356	Forjado	285	-	Mondolfo (2013)
ER5356	Depositado	200 - 310	10 - 18	Alloys (2015)

Fonte: Mondolfo (2013).

Fonte: Alloys (2015).

4.3.2 Microdureza

Os resultados de máximo e mínimo extremos foram descartados e o valor médio de cada amostra está disposto na Tabela 15. Não houve mudança significativa nos resultados quando comparadas as estratégias de resfriamento e energia de deposição. Esta independência nos resultados pode ser explicada pelo fato de a liga AWS ER5356 não ser uma liga tratável termicamente.

Tabela 15 – Resultados de Microdureza

Corrida	Gerenciamento térmico	Va (mm/min)	Vd (mm/min)	Microdureza Vickers (HV)	Desvio Padrão
4	NIAC	6000	1100	78	2,2
5		9000	500	72	1,7
15		7500	800	76	2,1
16		7500	800	77	2,6
17	Resfriamento Natural	7500	800	75	2,5
18		9000	500	74	1,5
19		6000	1100	74	1,2
20	Sem Resfriamento	7500	800	72	2,8
21		9000	500	71	1,6
22		6000	1100	73	2,0

Fonte: Dados da pesquisa.

4.4 Produtividade

A Figura 51 mostra que as pré-formas produzidas por Resfriamento Natural demandam muito mais tempo, sendo 2x, 2,8x e 3,5x mais lenta que a média para deposições subsequentes do NIAC e Sem Resfriamento. Além disso, foi observado um aumento gradativo de espera entre passes para esta estratégia, visto que a cada camada o acúmulo de calor é gradativo e consequentemente o tempo necessário de resfriamento até a temperatura de interpasso setada é cada vez maior, se adequando a equações polinomiais como está exposto na Figura 52.

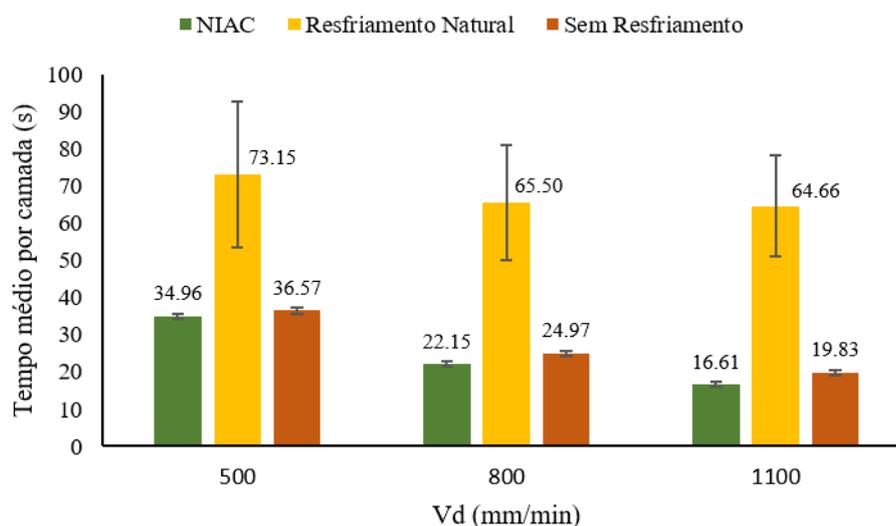


Figura 51 – Comparativo de tempo médio gasto por camada

Fonte: Dados da pesquisa.

Vale ressaltar que a estratégia Sem Resfriamento deteriora em muito a qualidade geométrica das pré-formas como fora demonstrado por Felice (2020) ao utilizar as mesmas condições e planejamento experimental para estudar aspectos geométricos e de porosidade. Mesmo se

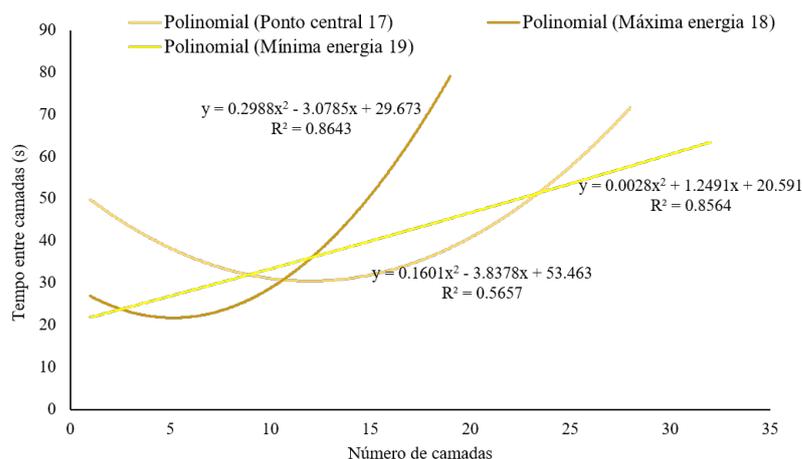
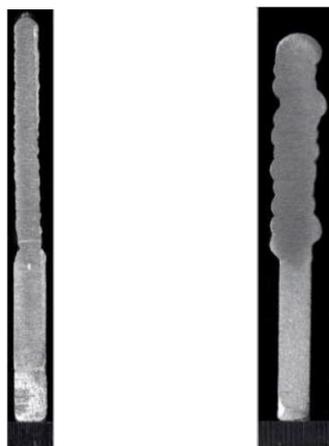


Figura 52 – Linhas de tendência para tempo de espera entre passes - Resfriamento Natural

Fonte: Dados da pesquisa.

gastando o mesmo tempo de deposição total, se comparado à abordagem a abordagem sem resfriamento, a aplicação do NIAC leva a pré-formas mais regulares e homogêneas (Figura 53) sem comprometer o nível de porosidade e como aqui demonstrado sem comprometer a qualidade mecânica obtida independentemente da energia de deposição utilizada. Além disso, o mesmo autor, mostra que, comparado à abordagem com NIAC, a abordagem de resfriamento Natural promove a mesma geometria (por utilizar a mesma temperatura de interpasse), mas ao preço de demandar tempos de deposição muito mais longos como aqui ficou demonstrado. Assim, o NIAC se mostra mais produtivo tanto do ponto de vista geométrico quanto do ponto de vista de tempo, mas sem comprometer os níveis de porosidade e performance mecânica das pré-formas.



(a) Macrografia para pré-forma 17 (b) Macrografia para pré-forma 21

Figura 53 – Macrografias comparativas

Fonte: Felice (2020).

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1 Conclusões

Uma avaliação empírica da distribuição de temperaturas ao longo da deposição apontou a estratégia de Resfriamento Natural como aquela que mais eficientemente reduz o acúmulo de calor, seguida da estratégia NIAC. Na contramão desses resultados, as pré-formas fabricadas Sem Resfriamento (deposição contínua) se mostraram mais propícias à ocorrência de altas temperaturas. Dentre as variáveis de interesse, a velocidade de alimentação (V_a) e a distância do nível do líquido de resfriamento em relação ao nível de deposição (h) apresentaram influência linear e proporcional sobre os resultados da medida de temperatura de interpasse.

As imagens de microscopia óptica apontaram que as pré-formas resfriadas naturalmente possuem em geral maior tamanho de grão, o que resultou em menor Limite de Resistência à Tração. As micrografias de todas as amostras indicam regiões de refino de grão (gerado pelas diferentes estratégias de resfriamento e energias de deposição), porém apresentam regiões de grãos alongados propícios à movimentação de discordâncias. Isto pode explicar o fato de as deformações e o Limite de Resistência à Tração não seguirem um padrão bem definido diante das diferentes abordagens de resfriamentos utilizadas. Uma afirmação que pode ser feita é que dentro do espaço do planejamento experimental empregado, para o ponto de extrapolação superior da variável h , a proximidade de 7 mm de distância da lâmina d'água ao ponto de deposição prejudicou tanto o limite de resistência a tração (LRT) quanto a deformação total dos corpos de prova da respectiva pré-forma (14). Isto pode ser explicado pela evaporação de água, ajudando a hidratar óxidos frescos e ocasionar em maior formação excessiva de poros. Tanto os resultados de LRT quanto os de deformação total encontram-se dentro daqueles especificados pela literatura para liga AWS ER5356. Os resultados de microdureza foram muito próximos.

Uma vez verificado que o NIAC não compromete propriedades mecânicas da liga depositada e que consegue quantitativamente dissipar com eficiência o aporte térmico ao qual o

material é submetido, em um ambiente industrial esta técnica pode ser extremamente benéfica. Visto que longas deposições podem ser feitas em um curto espaço de tempo sem ter a preocupação do excessivo acúmulo de calor influenciando negativamente na molhabilidade do material depositado (qualidade geométrica), para este patamar de quantidade de camadas a técnica NIAC pode ser até 3,5 vezes mais rápida que uma deposição com parada entre passes. Ao se considerar peças maiores, com maior número de camadas este número pode ser ainda maior já que o tempo de espera entre passes que garanta uma mesma temperatura de interpasse referente ao NIAC cresce de forma quase exponencialmente.

5.2 Perspectivas Futuras

O principal rumo para continuidade deste trabalho pode ser a implementação de um software dedicado que rastreie em tempo real a distância das retas paralelas desenhadas nos corpos de prova em miniatura. Desta forma utilizando dos resultados de tensão provindos da máquina de tração será possível gerar a curva tensão x deformação (elástica e plástica) de cada ensaio.

Considerando as observações feitas a respeito da aparência características dos corpos de prova seria também interessante avaliar a mecânica da fratura em comparação com corpos de prova de mesma geometria provindos de alumínio laminado. Outro ponto para continuidade seria a avaliação do NIAC e seus efeitos para ligas metálicas mais transformáveis como aços, titânio e superligas.

Considerando o NIAC como uma subtécnica da MA, e com isso a necessidade de se investigar os parâmetros e materiais da mesma, sugere-se também estudar fatores como diferentes líquidos de resfriamento, o efeito da temperatura do líquido de resfriamento, dentre outros.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, R. J. **Solid-free-form fabrication process and apparatus including in-process workpiece cooling**. [S.l.]: Google Patents, 2008. US Patent 7,326,377. Citado na página 33.
- ALBRECHT, B. P.; HSU, C. **Additive manufacturing heating control systems and methods**. [S.l.]: Google Patents, 2015. US Patent App. 14/330,845. Citado na página 34.
- ALLOYS, P. Er5356 data sheet. 2015. Citado na página 76.
- ARAÚJO, G. G. de. Fabricação aditiva: Tecnologias e parâmetros. **REGRAD-Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM-ISSN 1984-7866**, v. 10, n. 01, p. 417–432, 2018. Citado na página 24.
- ASTM. Standard astm f2792-12a. 2012. 2012. Citado na página 24.
- _____. Astme112 13. **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/E0112-13>>. Citado na página 54.
- _____. Astm f3187 - 16 - standard guide for directed energy deposition of metals. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/F3187>>. Citado nas páginas 25 e 29.
- _____. Astme384-17. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/E0384-17>>. Citado na página 59.
- _____. Standard astm e8/e8m 16a 2017. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials1**, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-16A>. Citado na página 57.
- ASTM/ISO. Astm52900-15. **Standard Terminology for Additive Manufacturing–General Principles–Terminology**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2>>. Citado na página 18.
- BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S. **Additive manufacturing**. [S.l.]: CRC press, 2019. Citado na página 17.
- BARROZO, M. A. **Planejamento de Experimentos**. [S.l.: s.n.], 1996. Citado na página 45.
- BOCK, F. E.; FROEND, M.; HERRNRING, J.; ENZ, J.; KASHAEV, N.; KLUSEMANN, B. Thermal analysis of laser additive manufacturing of aluminium alloys: Experiment and simulation. In: AIP PUBLISHING LLC. **AIP Conference Proceedings**. [S.l.], 2018. v. 1960, n. 1, p. 140004. Citado na página 30.
- BOWER, K. M. **What is design of experiments (DOE)?** 2017. Disponível em: <<https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>>. Acesso em: 24/04/2020. Citado na página 43.

BOX, G.; WILSON, K. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society**, JSTOR, v. 13, n. 1, p. 1–45, 1951. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x>>. Citado na página 45.

CARLOTA, V. **The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing**. 2019. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>>. Acesso em: 16/04/2020. Citado na página 26.

CHAVES, A. T. C. A. **Otimização do Processo de Produção de Biodiesel Etilico do Óleo de Girassol (*Hellianthus Annus*) Aplicando um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008. Citado nas páginas 44 e 45.

COELHO, A. W. F. **MANUFATURA ADITIVA POR JATO DE AGLUTINANTE (IMPRESSÃO 3D): FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE COMPÓSITOS DE GESSO COM FIBRAS DE SISAL**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Citado na página 24.

CUSTÓDIO, T. N.; MORAIS, A. d.; MUNIZ, J. A. Superfície de resposta em experimento com parcelas subdivididas. **Ciência & Agrotecnologia**, v. 24, n. 4, p. 1008–1023, 2000. Citado na página 45.

DEBROY, T.; WEI, H.; ZUBACK, J.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.; MILEWSKI, J.; BEESE, A. M.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, Elsevier, v. 92, p. 112–224, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>>. Citado na página 28.

DEREKAR, K.; LAWRENCE, J.; MELTON, G.; ADDISON, A.; ZHANG, X.; XU, L. Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (waam) of aluminium alloy components. In: EDP SCIENCES. **MATEC Web of Conferences**. 2019. v. 269, p. 05001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/mateconf/201926905001>>. Citado na página 72.

DONGARE, S. Development of a technique for testing of tensile properties with miniature size specimens for metal additive manufacturing. Missouri University of Science and Technology, 2012. Citado na página 39.

DURAKOVIC, B. Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, v. 5, n. 3, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.21533/pen.v5i3.14>>. Citado na página 43.

DUTTA, B. **Method of high rate direct material deposition**. [S.l.]: Google Patents, 2016. US Patent App. 15/074,400. Citado na página 34.

DUTTA, B.; FROES, F. H. S. The additive manufacturing (am) of titanium alloys. In: **Titanium powder metallurgy**. Elsevier, 2015. p. 447–468. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00024-1>>. Citado nas páginas 17, 19, 23, 30 e 34.

FAGERHOLT, E. **Digital Image Correlation Egil Fagerholt 25 August 2015**. 2017. Disponível em: <<https://pdfslide.us/documents/digital-image-correlation-egil-fagerholt-25-august-2015.html>>. Acesso em: 24/04/2020. Citado na página 40.

- 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**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Citado nas páginas 52, 77 e 78.
- FISCHER G., R. T. H. I. **Method for the additive production of a shaped body**. 2015. Citado na página 34.
- FOSTER, B.; BEESE, A. M.; KEIST, J. S.; MCHALE, E.; PALMER, T. Impact of interlayer dwell time on microstructure and mechanical properties of nickel and titanium alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Springer, v. 48, n. 9, p. 4411–4422, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11661-017-4164-0>>. Citado na página 32.
- FRANKY. **3D Printing Technologies: Stereolithography**. 2014. Disponível em: <<https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>>. Acesso em: 16/04/2020. Citado na página 26.
- FRONIUS. **CMT – Cold Metal Transfer: The Cold Welding Process for Premium Quality**. 2017. Disponível em: <<https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>>. Acesso em: 16/04/2020. Citado na página 29.
- GADHE, M. S. S.; NAVTHAR, R. Digital image correlation technique for strain measurement of aluminium plate. **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, 2016. Citado na página 40.
- GARCIA-COLOMO, A.; WOOD, D.; MARTINA, F.; WILLIAMS, S. A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications. **International Journal of Rapid Manufacturing, Underscience Publishers, UK**, p. 2, 2019. Citado nas páginas 26, 27 e 28.
- GU, J.; CONG, B.; DING, J.; WILLIAMS, S. W.; ZHAI, Y. Wire+ arc additive manufacturing of aluminium. In: **Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 4–6. Citado nas páginas 29 e 30.
- HAALAND, P. D. **Experimental design in biotechnology**. [S.l.]: CRC press, 1989. v. 105. Citado nas páginas 44 e 45.
- HACKENHAAR, W.; MONTEVECCHI, F.; SCIPPA, A.; CAMPATELLI, G. Air-cooling influence on wire arc additive manufactured surfaces. In: **TRANS TECH PUBL. Key Engineering Materials**. 2019. v. 813, p. 241–247. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.813.241>>. Citado na página 32.
- HARRIS. **5356 Aluminum Weld Wire**. 2018. Citado na página 51.
- HOHMANN, B. P.; BRUCK, P.; ESSELMAN, T. C.; SCHMIDT, T. **Digital image correlation (DIC): an advanced nondestructive testing method for life extension of nuclear power plants**. [S.l.], 2012. Citado na página 40.
- HUANG, Y.; LEU, M. C.; MAZUMDER, J.; DONMEZ, A. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 137, n. 1, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4028725>>. Citado nas páginas 17, 19 e 24.

- HUCKSTEPP, A. **Directed Energy Deposition (DED)**. 2019. Disponível em: <<https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>>. Acesso em: 16/04/2020. Citado na página 25.
- ITUARTE, I. F.; COATANEA, E.; SALMI, M.; TUOMI, J.; PARTANEN, J. Additive manufacturing in production: a study case applying technical requirements. **Physics Procedia**, Elsevier, v. 78, p. 357–366, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.050>>. Citado na página 43.
- JAMSHIDINIA, M.; KOVACEVIC, R. The influence of heat accumulation on the surface roughness in powder-bed additive manufacturing. **Surface Topography: Metrology and Properties**, IOP Publishing, v. 3, n. 1, p. 014003, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/1/014003>>. Citado na página 30.
- JINAN, W. T.; SANTOS, J. V. S. dos; PADILHA, A. F. Caracterização microestrutural de tubo extrudado da liga de alumínio aa 6351. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5151/1983-4764-30153>>. Citado na página 54.
- JR, H. F. G.; MOUNT, E. M.; JR, J. R. W. **Extrusion: the definitive processing guide and handbook**. [S.l.]: William Andrew, 2004. Citado na página 43.
- KARLEN, E. **Thermal control for additive manufacturing**. [S.l.]: Google Patents, 2017. US Patent App. 15/182,456. Citado na página 34.
- KÖHLER, M.; HENSEL, J.; DILGER, K. Effects of thermal cycling on wire and arc additive manufacturing of al-5356 components. **Metals**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 7, p. 952, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/met10070952>>. Citado nas páginas 32 e 33.
- KRÓL, M.; TAŃSKI, T.; SNOPIŃSKI, P.; TOMICZEK, B. Structure and properties of aluminium–magnesium casting alloys after heat treatment. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Springer, v. 127, n. 1, p. 299–308, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10973-016-5845-4>>. Citado na página 54.
- LI; FONG, J.; LANE, B.; MOYLAN, S.; FILLIBEN, J.; HECKERT, A.; LEVINE LYLE, M. Using design of experiments in finite element modeling to identify critical variables for laser powder bed fusion. p. 219–228, 2015. Citado na página 43.
- LI, J. Z.; ALKAHARI, M. R.; ROSLI, N. A. B.; HASAN, R.; SUDIN, M. N.; RAMLI, F. R. Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing. **International Journal of Automation Technology**, Fuji Technology Press Ltd., v. 13, n. 3, p. 346–353, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346>>. Citado na página 25.
- LIM, W.; KIM, H.-K. Design and development of a miniaturised tensile testing machine. **Global journal of engineering education**, v. 15, n. 1, p. 48–53, 2013. Citado na página 39.
- LIU, F.; SLATTERY, K.; KINSELLA, M.; NEWKIRK, J.; CHOU, H.-N.; LANDERS, R. Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/13552540710776188>>. Citado na página 23.

- LU, X.; ZHOU, Y.; XING, X.; SHAO, L.; YANG, Q.; GAO, S. Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 93, n. 5-8, p. 2145–2154, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0636-z>>. Citado nas páginas 20, 32 e 55.
- LUMASENSE. **Infrared Thermometer Handbook**. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 52.
- MARTINA, F. **Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire+Arc Additive Manufacturing**. Tese (Doutorado) — Cranfield University, 2014. Citado nas páginas 29 e 30.
- MILOSEVIC, M.; MILOSEVIC, N.; SEDMAK, S.; TATIC, U.; MITROVIC, N.; HLOCH, S.; JOVICIC, R. Digital image correlation in analysis of stiffness in local zones of welded joints. **Tehnički vjesnik**, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Elektrotehnički fakultet u Osijeku . . . , v. 23, n. 1, p. 19–24, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.17559/TV-20140123151546>>. Citado na página 40.
- MINITAB. **O que é alfa em um experimento central composto?** 2019. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/what-is-alpha-in-a-central-composite-design/>>. Acesso em: 02/05/2020. Citado na página 46.
- MONDOLFO, L. F. **Aluminum alloys: structure and properties**. [S.l.]: Elsevier, 2013. Citado na página 76.
- NAWARE, G. N. **Selective zone temperature control build plate**. [S.l.]: Google Patents, 2016. US Patent App. 14/550,419. Citado na página 34.
- PARIS, H.; MANDIL, G. *et al.* The development of a strategy for direct part reuse using additive and subtractive manufacturing technologies. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 22, p. 687–699, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.026>>. Citado na página 23.
- PEREIRA, T.; KENNEDY, J. V.; POTGIETER, J. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 30, p. 11–18, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003>>. Citado na página 23.
- PERETTI, M. W.; TRAPP, T. **High temperature additive manufacturing systems for making near net shape airfoils leading edge protection, and tooling systems therewith**. [S.l.]: Google Patents, 2010. US Patent App. 12/409,904. Citado na página 34.
- PROCHAZKA, R.; DZUGAN, J.; KONOPIK, P.; RUND, M. Investigation of high-strength stainless steel using small specimen test techniques—tensile and fatigue properties. In: **Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design (M2D), Albufeira, Portugal**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 11–15. Citado nas páginas 40, 41 e 42.
- ROBINSON, L.; SCOTT, J. Layers of complexity: Making the promises possible for additive manufacturing of metals. **JOM**, Springer Science & Business Media, v. 66, n. 11, p. 2194, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11837-014-1166-x>>. Citado na página 17.

ROCHA, P. C. J.; RODRIGUES, M. B.; PEREIRA, M.; GALEAZZI, D. *et al.* Analysis of interlayer idle time as a temperature control technique in additive manufacturing of thick walls by means of cmt and cmt pulse welding processes. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 25, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-9224/si25.18>>. Citado nas páginas 32 e 33.

SCOTTI, F. M.; TEIXEIRA, F. R.; SILVA, L. J. da; ARAÚJO, D. B. de; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Thermal management in waam through the cmt advanced process and an active cooling technique. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 57, p. 23–35, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>>. Citado nas páginas 37 e 38.

SHER, D. **FiT special filter holder facial mask**. 2020. Disponível em: <<https://www.3dprintingmedia.network/forums/topic/fit-special-filter-carrier-holder-facial-mask/>>. Acesso em: 14/04/2020. Citado na página 23.

_____. **Prisma Health and JJ supply 3D printed VESper ventilator splitter at no cost to healthcare providers**. 2020. Disponível em: <<https://www.3dprintingmedia.network/prisma-health-and-jj-produce-and-supply-3d-printed-vesper-ventilator-splitter-at-no-cost-to-healthcare-prov>>. Acesso em: 14/04/2020. Citado na página 23.

SILVA, L. J. da. **Near-Immersion Active Cooling for Wire+Arc Additive Manufacturing: From Concept to Application**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Citado nas páginas 29, 30, 31, 33, 34, 48, 49, 50, 51 e 52.

SILVA, L. J. da; REIS, R. P.; SCOTTI, A. The potential of ir pyrometry for monitoring interpass temperature in wire+ arc additive manufacturing. 2019. Citado nas páginas 38, 39 e 52.

SILVA, L. J. da; SOUZA, D. M.; ARAÚJO, D. B. de; SAAD, N. dos S.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Xliv consolda—congresso nacional de soldagem uberlândia, mg-de 10 a 13 de setembro de 2018. 2018. Citado nas páginas 19 e 36.

SILVA, L. J. da; SOUZA, D. M.; ARAÚJO, D. B. de; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in waam. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, p. 1–11, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>>. Citado nas páginas 19, 35, 36 e 37.

SMARTECH. **Markets for Aluminum Alloys in Additive Manufacturing: 2018 to 2028**. 2018. Disponível em: <<https://www.smartechanalysis.com/reports/aluminum-alloys-am-18-2028/>>. Acesso em: 25/04/2020. Citado na página 29.

SOUZA, D. M. **Estudo de Diferentes Estratégias de Resfriamento de Paredes de Alumínio Fabricadas por Manufatura Aditiva a Arco Elétrico**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Citado na página 55.

THOMAS-SEALE, L.; KIRKMAN-BROWN, J.; ATTALLAH, M.; ESPINO, D.; SHEPHERD, D. The barriers to the progression of additive manufacture: perspectives from uk industry. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 198, p. 104–118, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>>. Citado nas páginas 18 e 25.

VOORT, G. V.; MANILOVA, E. P. Metallographic etching of aluminum and its alloys. **Buehler Ltd, EUA**, 2009. Citado na página 54.

WANG, H.; JIANG, W.; OUYANG, J.; KOVACEVIC, R. Rapid prototyping of 4043 al-alloy parts by vp-gtaw. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 148, n. 1, p. 93–102, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.058>>. Citado na página 32.

WEIDMANN, E.; GUESNIER, A. Metallographic preparation of aluminium and aluminium alloys. 2008. Citado na página 54.

WILLIAMS, S. W.; MARTINA, F.; ADDISON, A. C.; DING, J.; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. Wire+ arc additive manufacturing. **Materials Science and Technology**, Taylor & Francis, v. 32, n. 7, p. 641–647, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>>. Citado nas páginas 28 e 29.

WU, B.; DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H.; HAN, J.; FEI, Z. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in wire arc additive manufacturing of ti6al4v. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 250, p. 304–312, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>>. Citado nas páginas 30 e 31.

WU, B.; PAN, Z.; DING, D.; CUIURI, D.; LI, H.; FEI, Z. The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured ti6al4v alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 258, p. 97–105, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024>>. Citado nas páginas 30, 32 e 38.

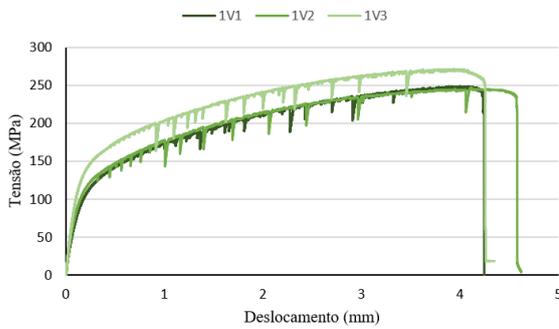
XIONG, J.; ZHANG, G. Adaptive control of deposited height in gmaw-based layer additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 214, n. 4, p. 962–968, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.11.014>>. Citado na página 32.

XIONG Z.Q., Z. X. W. Y. Q. Z. **Partial temperature control system for metal material 3D printing**. 2015. Citado na página 34.

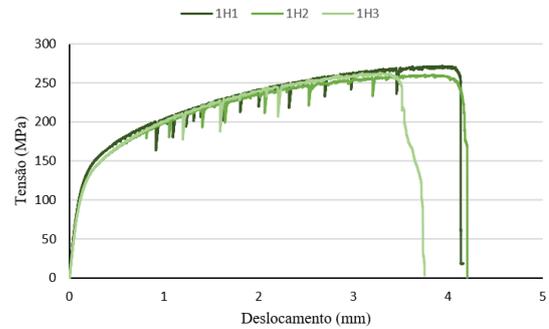
YANG, D.; HE, C.; ZHANG, G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode gmaw based additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 227, p. 153–160, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.021>>. Citado na página 18.

YANG, D.; WANG, G.; ZHANG, G. Thermal analysis for single-pass multi-layer gmaw based additive manufacturing using infrared thermography. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 244, p. 215–224, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/9780429466236>>. Citado nas páginas 29 e 32.

CURVAS TENSÃO X DESLOCAMENTO



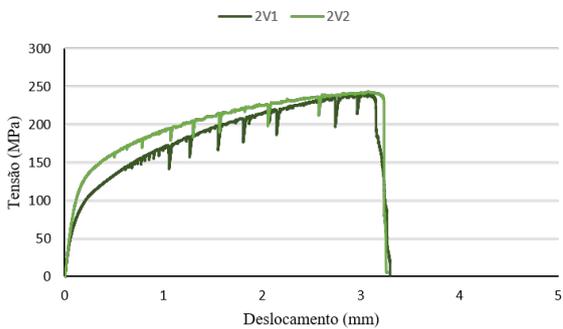
(a) Corpos de prova verticais



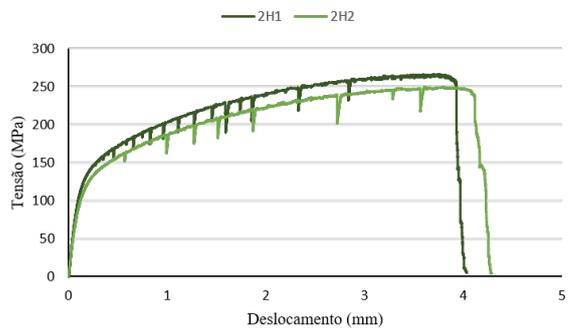
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 54 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 1

Fonte: Dados da pesquisa.



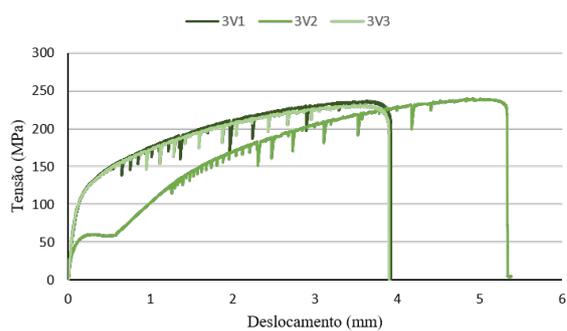
(a) Corpos de prova verticais



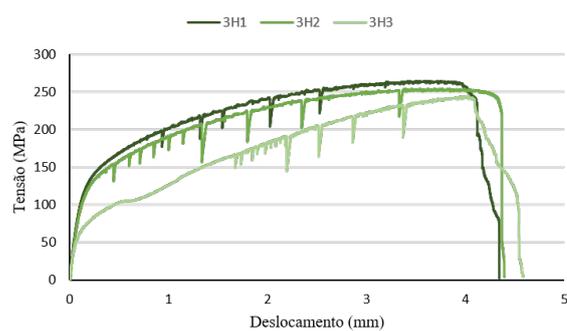
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 55 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 2

Fonte: Dados da pesquisa.



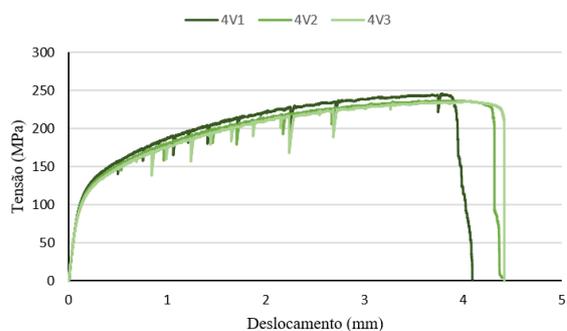
(a) Corpos de prova verticais



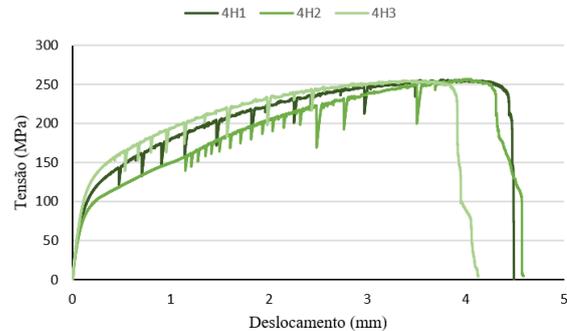
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 56 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 3

Fonte: Dados da pesquisa.



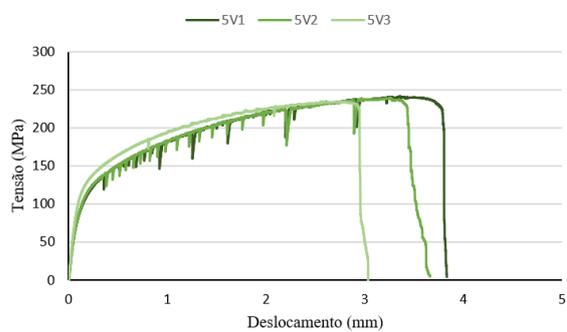
(a) Corpos de prova verticais



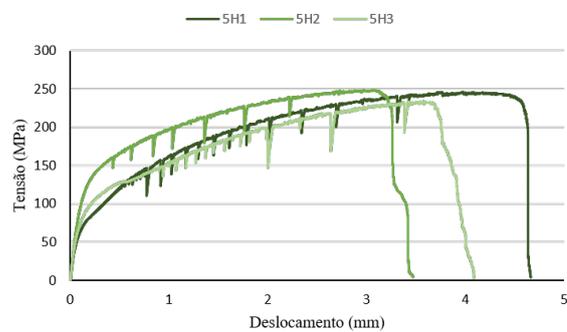
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 57 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 4

Fonte: Dados da pesquisa.



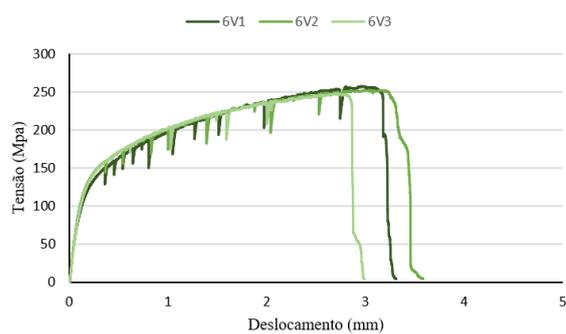
(a) Corpos de prova verticais



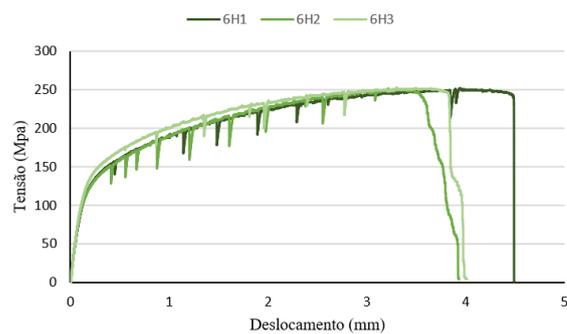
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 58 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 5

Fonte: Dados da pesquisa.



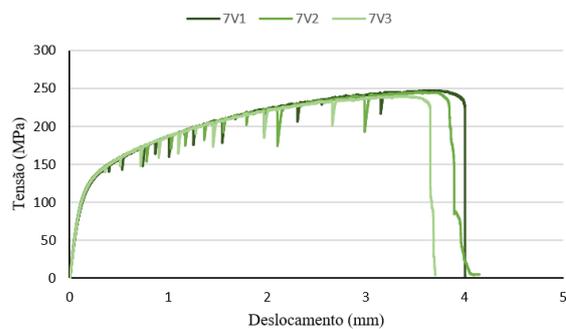
(a) Corpos de prova verticais



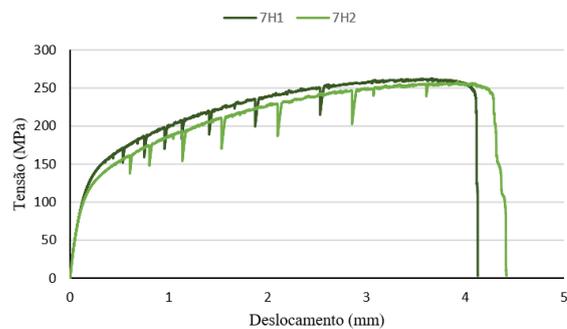
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 59 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 6

Fonte: Dados da pesquisa.



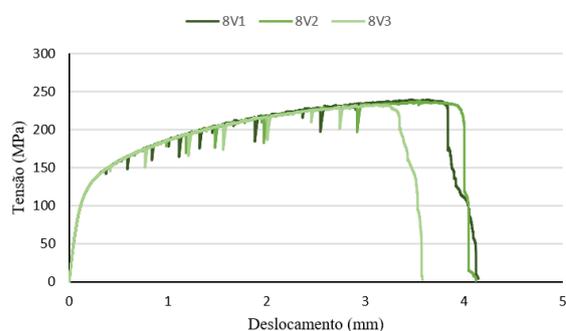
(a) Corpos de prova verticais



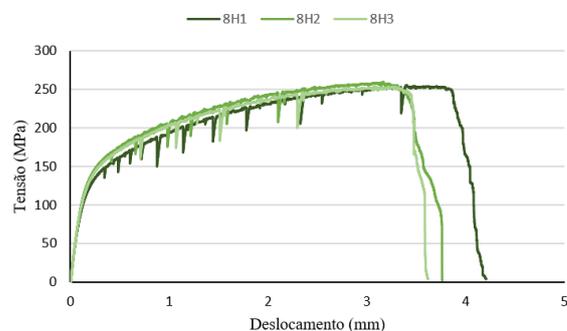
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 60 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 7

Fonte: Dados da pesquisa.



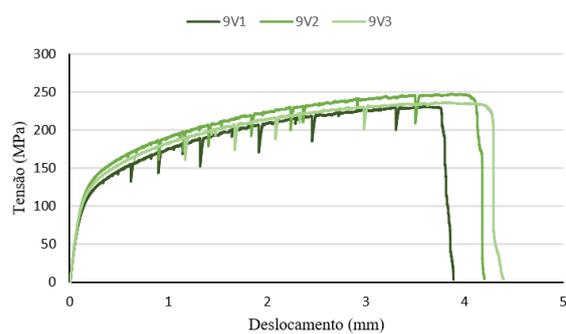
(a) Corpos de prova verticais



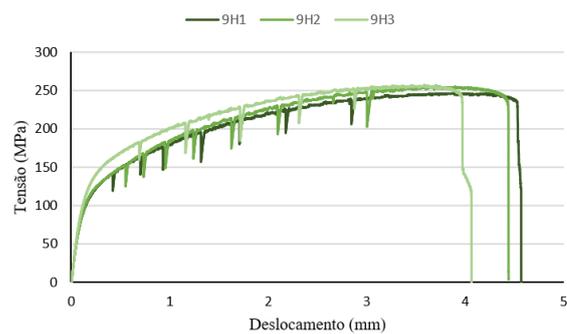
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 61 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 8

Fonte: Dados da pesquisa.



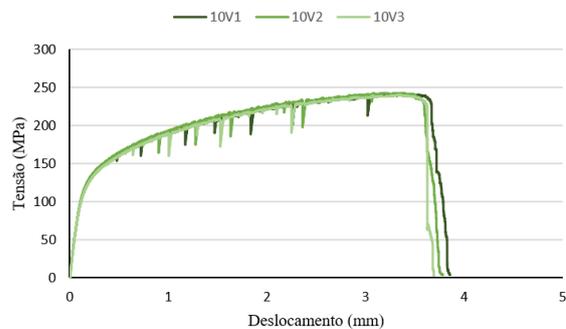
(a) Corpos de prova verticais



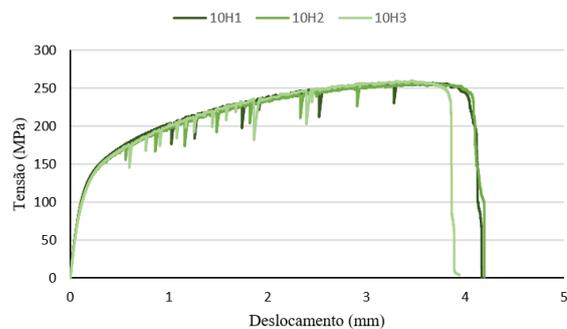
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 62 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 9

Fonte: Dados da pesquisa.



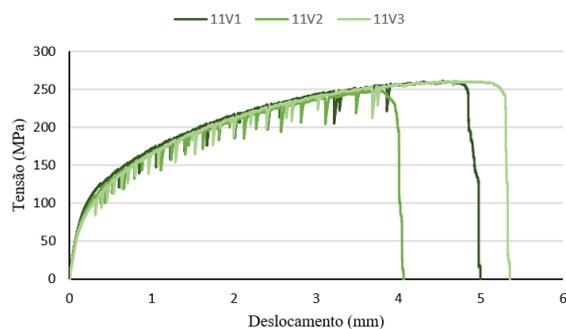
(a) Corpos de prova verticais



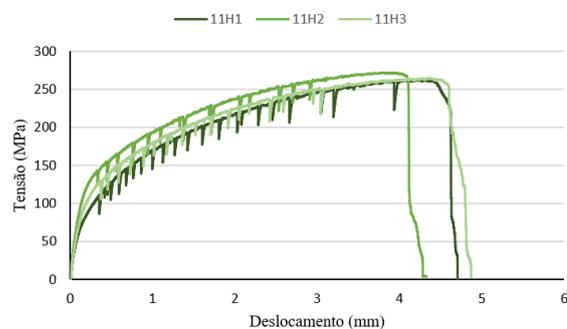
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 63 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 10

Fonte: Dados da pesquisa.



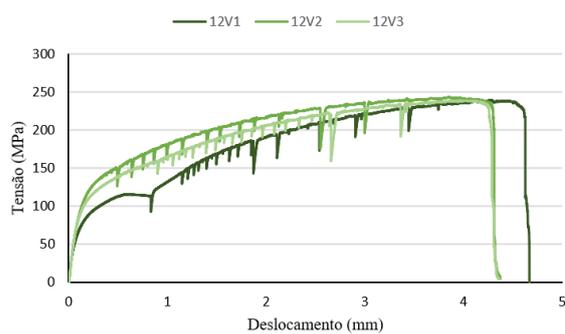
(a) Corpos de prova verticais



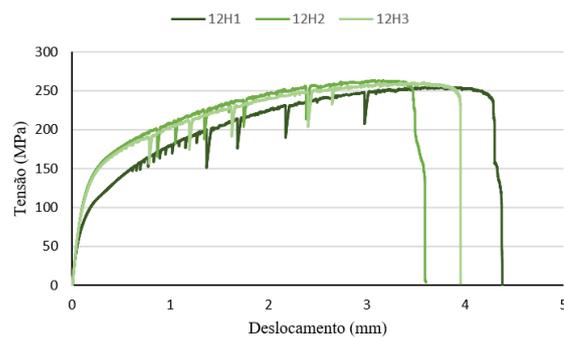
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 64 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 11

Fonte: Dados da pesquisa.



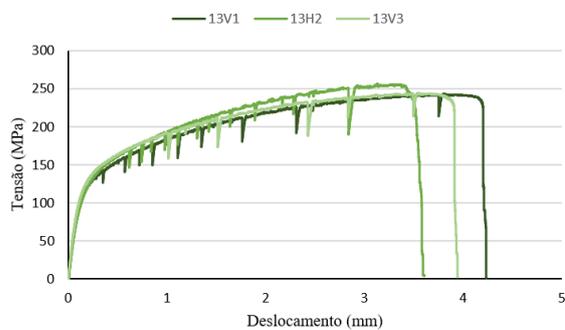
(a) Corpos de prova verticais



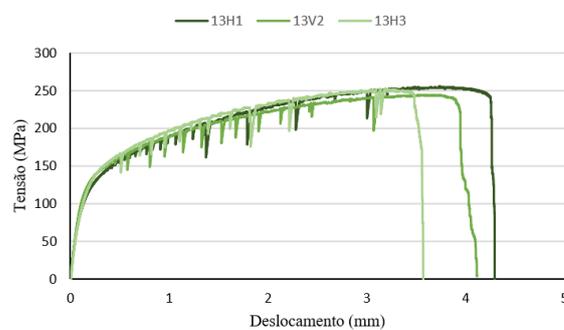
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 65 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 12

Fonte: Dados da pesquisa.



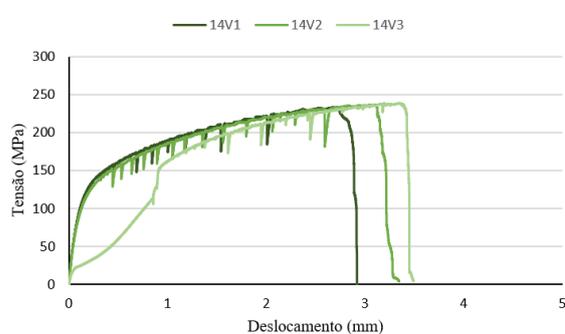
(a) Corpos de prova verticais



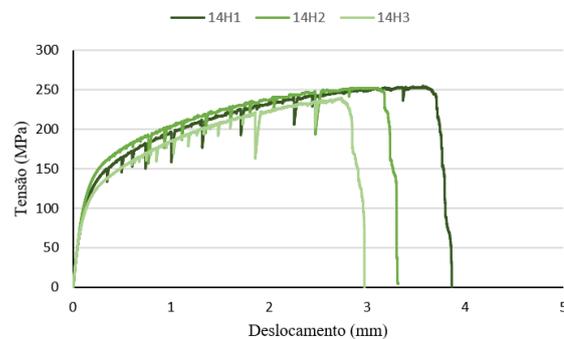
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 66 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 13

Fonte: Dados da pesquisa.



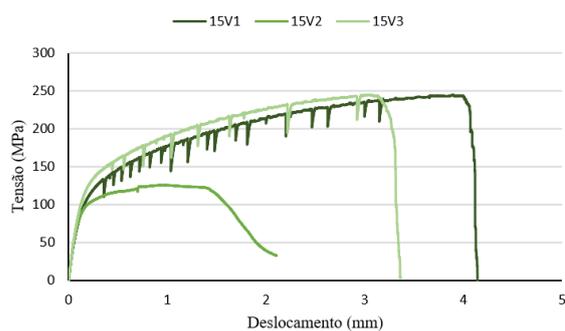
(a) Corpos de prova verticais



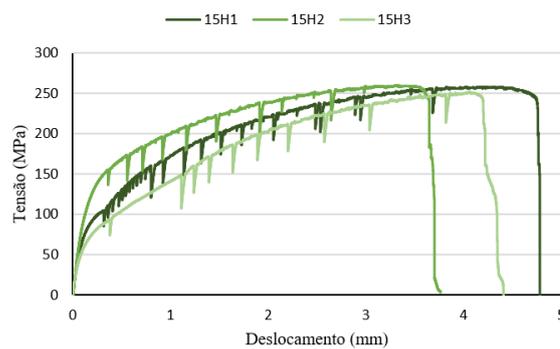
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 67 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 14

Fonte: Dados da pesquisa.



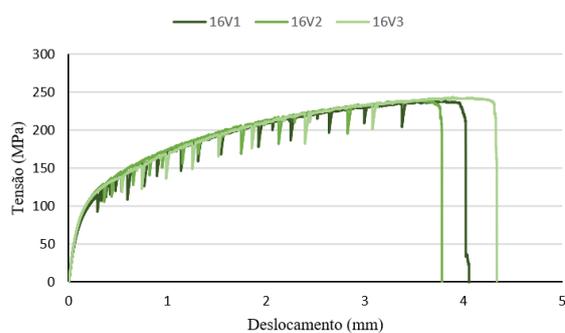
(a) Corpos de prova verticais



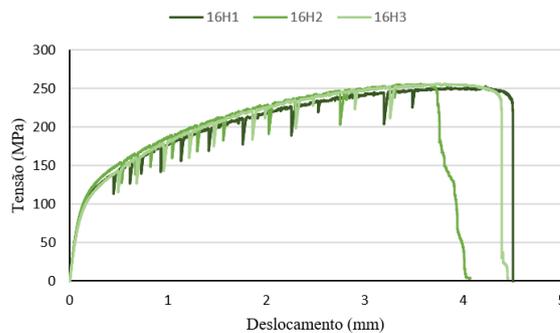
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 68 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 15

Fonte: Dados da pesquisa.



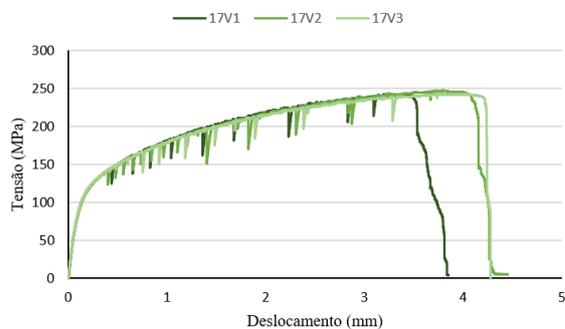
(a) Corpos de prova verticais



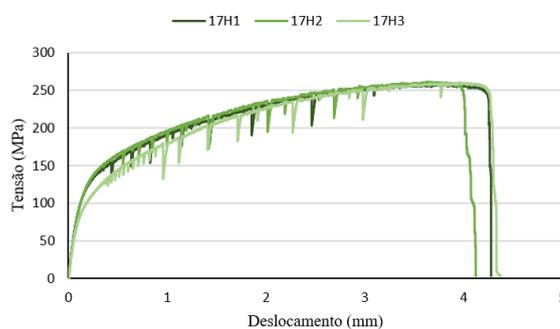
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 69 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 16

Fonte: Dados da pesquisa.



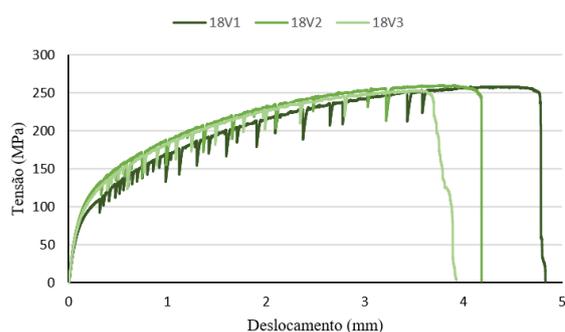
(a) Corpos de prova verticais



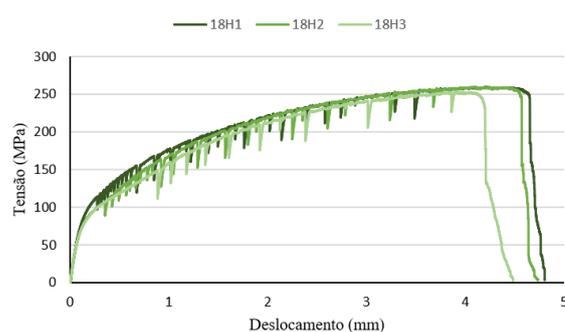
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 70 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 17

Fonte: Dados da pesquisa.



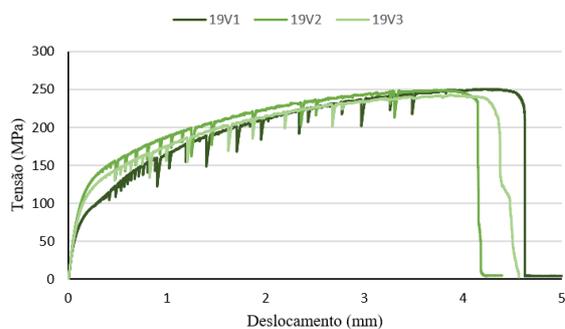
(a) Corpos de prova verticais



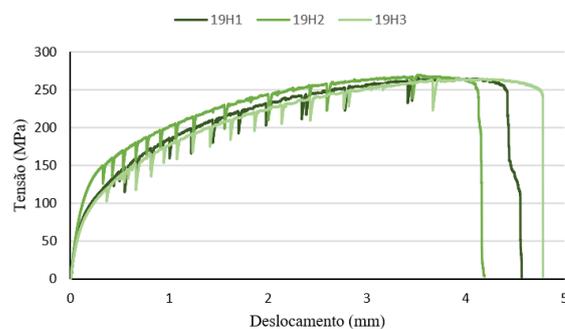
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 71 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 18

Fonte: Dados da pesquisa.



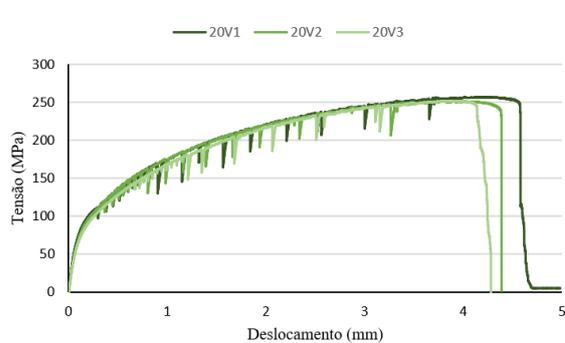
(a) Corpos de prova verticais



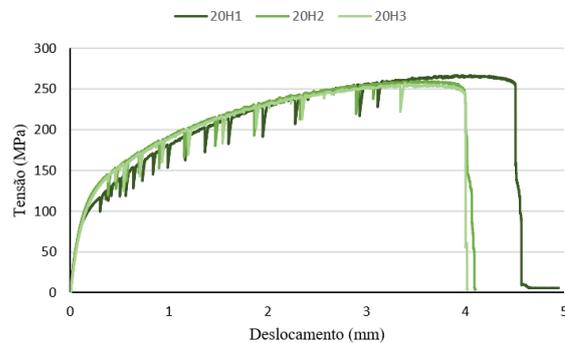
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 72 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 19

Fonte: Dados da pesquisa.



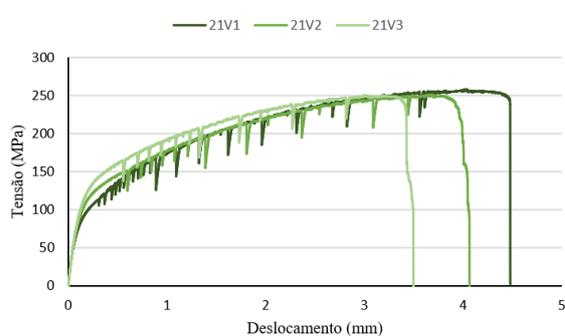
(a) Corpos de prova verticais



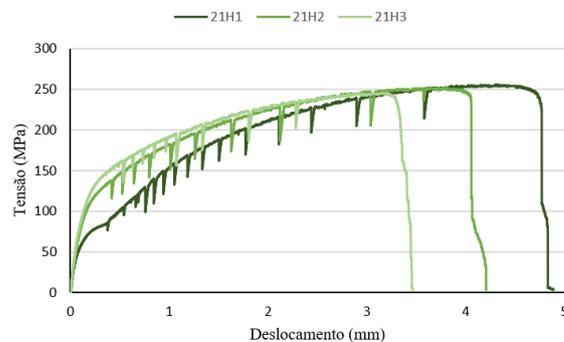
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 73 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 20

Fonte: Dados da pesquisa.



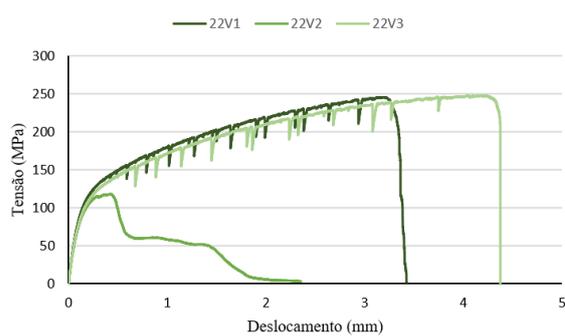
(a) Corpos de prova verticais



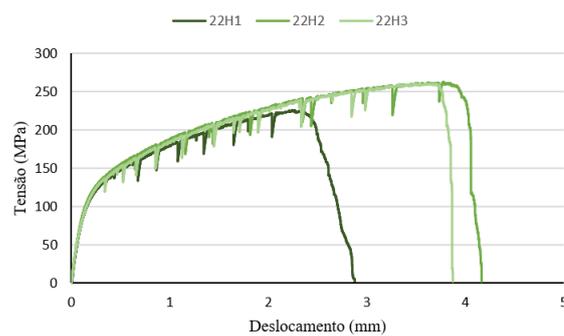
(b) Corpos de prova horizontais

Figura 74 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 21

Fonte: Dados da pesquisa.



(a) Corpos de prova verticais



(b) Corpos de prova horizontais

Figura 75 – Tensão x Deslocamento para pré-forma 22

Fonte: Dados da pesquisa.