

PAULO VÍTOR ARRAIS DE LIMA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO OPERACIONAL E
GEOMÉTRICO DE LIGAS DE AÇO CARBONO FABRICADAS POR
DEPOSIÇÃO DE DIFERENTES ARAMES EM MADA DUPLO
ARAME**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2023

PAULO VÍTOR ARRAIS DE LIMA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO OPERACIONAL E
GEOMÉTRICO DE LIGAS DE AÇO CARBONO FABRICADAS POR
DEPOSIÇÃO DE DIFERENTES ARAMES EM MADA DUPLO
ARAME**

Projeto de fim de curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito final para a obtenção do título de
graduado em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho
Coorientador: Me. Elias Hoffmann de Lima

Uberlândia
2023

PAULO VÍTOR ARRAIS DE LIMA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO OPERACIONAL E
GEOMÉTRICO DE LIGAS DE AÇO CARBONO FABRICADAS POR
DEPOSIÇÃO DE DIFERENTES ARAMES EM MADA DUPLO
ARAME**

Projeto de fim de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia, como
requisito parcial para a obtenção do título de
graduado em Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo

Prof. Msc. Elias Hoffmann de Lima

Prof. Msc. Angelo Ores Bonamigo

Uberlândia, 03 de fevereiro de 2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita bondade e por ser o principal e imprescindível responsável pela minha chegada até aqui;

Aos meus pais e heróis Antônio Luiz e Lucinha, que nunca mediram esforços para me oferecer a melhor educação possível, além do apoio irrestrito às minhas escolhas e sonhos;

Ao meu irmão Pedro Ícaro, pelas palavras de força e apoio;

À minha namorada Isadora Alves, por todo o incentivo, e por se fazer presente ao meu lado durante as etapas mais difíceis que enfrentei;

Em nome do meu professor orientador Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, aos professores que fizeram parte de todos os níveis da minha formação, donos da profissão mais importante e responsável por todas as demais;

Ao meu Coorientador Msc. Elias Hoffmann de Lima, por todos os ensinamentos, apoio e compreensão;

À toda a equipe do Laprosolda/UFU, em nome dos meus colegas de pesquisa Msc. Angelo Ores Bonamigo, Ian, João e Breno;

A todos os meus amigos e aos colegas de curso que contribuíram para a minha evolução;

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) pela oportunidade de realizar esta graduação;

Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico e laboratorial, fornecendo os materiais e os meios de produção necessários para este estudo.

LIMA, P. V. A. **Análise do comportamento operacional e geométrico de ligas de aço carbono fabricadas por deposição de diferentes arames em mada duplo arame.** 2023. 64 folhas. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

RESUMO

No contexto atual de inovação e atenuação de custos na indústria de precisão, existe uma busca por produzir peças complexas ou personalizadas com redução no ciclo de processamento, a fim de obter a economia capital e de tempo desejada. Um dos principais avanços relacionados à melhoria dos processos de fabricação de produtos metálicos, refere-se aos processos de Manufatura Aditiva (MA), tendo a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) como destaque como uma solução de baixo custo para fabricação de produtos de grande escala e tolerância, com vantagem no preço dos equipamentos e alta eficiência energética. A aplicação de duplo arame amplia as vantagens, por aumentar a taxa de deposição e possibilitar a constituição de novas ligas a partir de dois arames distintos. Este trabalho teve como objetivo, construir três pré-formas por MADA por duplo arame através de diferentes estratégias de deposição, e relacionar o comportamento operacional com os sinais elétricos adquiridos, as características geométricas e a eficiência dos processos. As paredes foram constituídas de combinações dos arames ER70S-3/ER70S-3, ER70S-3/ER80S-G e ER70S-3/ER110S-1, todos em concentração de 50/50 %. A ausência de tecimento em uma das deposições resultou em um aspecto final com menos ondulações, e os pontos de abertura e fechamento dos arcos se mostraram mais suscetíveis a escorrimientos, ocasionando grandes falhas quando posicionados nas extremidades e resultando na menor eficiência do trabalho, com aproveitamento de 83,5 % do material empregado. Estratégias desenvolvidas ao logo do estudo, atingiram uma transferência predominantemente goticular e conseguiram mitigar as falhas de regime transiente, alcançando uma eficiência de 92,7 % com extremidades regulares.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Soldagem; MADA; Duplo arame.

LIMA, P. V. A. **Analysis of the Operational and Geometric Behavior of Carbon Steel Alloys Manufactured by Deposition of Different Wires in Double Wire MADA.** 2022. 64 pages. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

ABSTRACT

In an innovation and price reduction context inserted into the precision industry, there is a need to build complex and custom products looking for minimize the process cycle, in order to achieve capital and time savings. One of the main advances related to the improvement of the manufacturing processes of metallic products, refers to the Additive Manufacturing (AM) processes, where the Wire and Arc Additive manufacturing (WAAM) stands out as a low cost solution for manufacturing products of large scale and tolerance, with price reduction and energy efficiency. The double wire application improves it, by increasing the deposition rate and making it possible to create new alloys from two different wires. The objective of this study is to build three preforms with MADA by double wire through different deposition strategies, and to relate the operational behavior based on the acquired electrical signals, the geometric characteristics and the efficiency of the processes. The walls were made up by combinations of ER70S-3/ER70S-3, ER70S 3/ER80S-G and ER70S 3/ER110S-1 wires, all in a 50/50 % ratio. The absence of weaving in one of the depositions resulted into a smoother appearance with the opening and closing points of the arches were more susceptible to dripping, causing huge gaps when positioned at the ends, resulting in lower work efficiency, with better use. 83.5 % of the material used. The strategies developed throughout the study achieved a predominantly droplet transfer and managed to mitigate transient regime failures, reaching an efficiency of 92.7 % with regular ends.

Keywords: additive manufacturing; Welding; WAAM; Double Wire

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos processos de fabricação.....	16
Figura 2. Representação das principais etapas do processo de MA	17
Figura 3. Representação das principais etapas do processo de MA	19
Figura 4. Representação esquemática do processo DED-GMA.....	21
Figura 5. Representação esquemática do processo GMAW	22
Figura 6. Equipamento para a soldagem GMAW	22
Figura 7. Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio.....	24
Figura 8. Transferência por curto-circuito.....	24
Figura 9. Transferência globular	25
Figura 10. Transferência goticular.....	25
Figura 11. Representação esquemática do processo GMAW duplo arame: (a) montagem com potenciais separados; (b) tochas tipicamente usadas.....	26
Figura 12. Sopro magnético gerado na soldagem com duplo arame para diferentes polaridades.....	26
Figura 13. Duplo arame. a – Twin; e b – Tandem	27
Figura 14. Fluxograma do procedimento metodológico.....	28
Figura 15. Disposição geral da bancada de deposição em MADA duplo arame.	29
Figura 16. Ilustração esquemática do fluxo de calor no sistema de RAQI.....	30
Figura 17. Configuração esquemática do aparato inicial de RAQI	30
Figura 18. Configuração esquemática do aparato de RAQI após melhoria	31
Figura 19. Substrato de deposição	32
Figura 20. Deposição em modo tandem sem tecimento	33
Figura 21. Representação do tecimento retangular em duplo arame	34
Figura 22. Demonstração de passo e amplitude tecimento retangular em duplo arame	34
Figura 23. Representação do tecimento cruzado em duplo arame	35
Figura 24. Demonstração de passo e amplitude tecimento cruzado em duplo arame.	35
Figura 25. Estratégia de deposição da parede ER70S-3/ER70S-3	37
Figura 26. Parede em ER70S-3/ER80S-G em seu aspecto bruto após deposição	40
Figura 27. Parede em ER70S-3/ER80S-G após limpeza	40
Figura 28. Parede em ER70S-3/ER80S-G após remoção de respingos e corte das extremidades e substrato.....	41
Figura 29. Parede em ER70S-3/ER80S-G após operação de faceamento	41
Figura 30. Parede em ER70S-3/ER110S-1.....	42
Figura 31. Parede em ER70S-3/ER70S-3.....	43
Figura 32. Corrente instantânea na camada 129 da deposição ER70S-3/ER80S-G ...	44
Figura 33. Tensão instantânea na camada 129 da deposição ER70S-3/ER80S-G	45
Figura 34. Corrente média ao longo da deposição ER70S-3/ER80S-G	45
Figura 35. Tensão média ao longo da deposição ER70S-3/ER80S-G	45
Figura 36. Corrente instantânea na camada 59 da deposição ER70S-3/ ER110S-1 ...	46
Figura 37. Tensão instantânea na camada 59 da deposição ER70S-3/ ER110S-1.....	47
Figura 38. Corrente média ao longo da deposição ER70S-3/ ER110S-1	47
Figura 39. Tensão média ao longo da deposição ER70S-3/ER110S-1	48
Figura 40. Corrente instantânea na camada 37 da deposição ER70S-3/ER70S-3.....	49
Figura 41. Tensão instantânea na camada 37 da deposição ER70S-3/ER70S-3.....	50
Figura 42. Corrente média ao longo da deposição ER70S-3/ER70S-3	50
Figura 43. Tensão média ao longo da deposição ER70S-3/ER70S-3	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens da MA.....	18
Tabela 2. Composições das pré-formas.....	32
Tabela 3. Principais configurações operacionais	38

LISTA DE ABREVIACÃO

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
DED	Deposição de Energia Direcionada (<i>Directed Energy Deposition</i>)
EB	Feixe de Elétrons (Electron Beam)
EDA	Agência de Defesa Europeia
GMA	e arco gás-metal (<i>Gas Metal Arc</i>).
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
MA	Manufatura Aditiva
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
L	Laser
PA	arco de plasma (Plasma Arc)
PBF	Fusão em leito de pó (<i>Powder Bed Fusion</i>)
RAQI	Resfriamento Ativo por Quase-Imersão
SLS	Sinterização seletiva a laser (<i>Selective Laser Sintering</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO.....	15
1.1.1	Objetivos específicos.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	16
2.2	MANUFATURA ADITIVA.....	17
2.2.1	Manufatura Aditiva de materiais metálicos.....	19
2.2.2	MIG/MAG GMAW	21
2.2.3	Gás de proteção	23
2.2.4	Transferência metálica	23
2.3	GMAW COM DUPLO ARAME	25
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	28
3.2	BANCADA	29
3.3	Sistema de resfriamento ativo para MADA duplo arame.....	29
3.3	ARAMES DE DEPOSIÇÃO	31
3.4	GÁS DE PROTEÇÃO	32
3.5	SUBSTRATO.....	32
3.6	ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO	33
3.6.1	Sem uso de tecimento.....	33
3.6.2	Tecimento retangular.....	33
3.6.3	Tecimento cruzado	34
3.7	AQUISIÇÃO DOS DADOS	35
3.8	PAREDE 1 EM ER70S-3/ER80S-G	35
3.9	PAREDE 2 EM ER70S-3/ER110S-1.....	36
3.10	PAREDE 3 EM ER70S-3/ER70S-3.....	36
3.11	PRINCIPAIS DIFERENÇAS OPERACIONAIS ENTRE AS PRÉ-FORMAS... 38	
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	ASPECTOS GEOMÉTRICOS E RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO DOS PROCESSOS	39
4.1.1	Parede em ER70S-3/ER80S-G	39
4.1.2	Parede em ER70S-3/ER110S-1	42
4.1.3	Parede em ER70S-3/ER70S-3	42
4.2	SINAIS ELÉTRICOS.....	43
4.2.1	Sinais elétricos ER70S-3/ER80S-G	43
4.2.2	Sinais elétricos ER70S-3/ER110S-1	46
4.2.3	Sinais elétricos ER70S-3/ER70S-3.....	48
5	CONCLUSÃO	52

6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE A.....	57
	A.1. Teste de abertura de arco.....	57
	A.2. Modo tandem sem tecimento (com velocidades de alimentação dos arames iguais)	58
	A.3. Modo tandem sem tecimento (com velocidades de alimentação dos arames distintas).....	59
	A.4. Testes de estratégias de deposição oscilatória (tecimento)	61
	A.5. Testes de tempo de espera entre camadas	62
	A.6. Teste de Velocidade no Tecimento Retangular.....	63

1 INTRODUÇÃO

Na produção industrial, o desenvolvimento de produtos e processos está em constante aprimoramento, e conseqüentemente, exigindo menores prazos e melhoria de qualidade dos produtos manufaturados. Nesse contexto de exigência de inovação e redução dos custos dos produtos, as empresas vêm em uma tendência de, por meio de redução do ciclo de processamento de produtos, obter a economia de custos e de tempo desejada. Logo, uma análise do sistema produtivo é importante para se prever os ganhos de produtividade, principalmente no contexto atual de alta competitividade desse meio produtivo (LIRA, 2010). Assim, a relação volume-variedade de produtos determina a maneira de gerenciar o processo de transformação (KIMINAMI; CASTRO, 2013).

Um dos principais avanços relacionados à melhoria dos processos de fabricação de produtos metálicos, principalmente quando se trabalha com customização e número reduzido de exemplares, refere-se ao processo de MA. Este tipo de processo permite transformar uma geometria 3D, geralmente oriunda de um sistema CAD (*Computer Aided Design*), em um componente físico e funcional por meio de uma adição progressiva de camadas, na maioria das vezes, sem a necessidade da utilização de processo de remoção de material (usinagem) a partir de uma geometria com sobremetal (MATIAS; RAO, 2015).

O entusiasmo industrial em torno da MA de metais está sendo impulsionado por sua capacidade de permitir aos projetistas, se concentrar no projeto de componentes com foco em sua funcionalidade, em vez de limitações de processos convencionais, como processos de fundição, brasagem ou conformação (HERDERICK, 2015). Além disso, as peças podem ser produzidas sob demanda, reduzindo o estoque de peças de reposição e diminuindo o lead time de peças críticas ou componentes de substituição obsoletos (DEBROY *et al.*, 2018). Entretanto, a funcionalidade de um produto metálico não está ligada apenas a sua forma geométrica.

Assim, as exigências especificadas para um determinado produto metálico envolvem propriedades mecânicas (resistência mecânica, dureza, tenacidade, resistência à fadiga, resistência à fluência, módulo de elasticidade e capacidade de amortecimento), propriedades não mecânicas (térmicas, óticas,

magnéticas, elétricas), propriedades de superfície (resistência à corrosão, oxidação, fricção, abrasão, desgaste), propriedades estéticas (aparência, textura), e propriedades ou atributos econômicos (preço e disponibilidade do material) (KIMINAMI; CASTRO, 2013).

Segundo Herderick (2015), para utilizar todo o potencial da MA em ambiente industrial, será necessário um maior amadurecimento das ligações processamento-estrutura-propriedades em um conjunto mais amplo de ligas metálicas e outras abordagens de processamento. Quando isso acontecer, a adoção da MA será acelerada à medida que os projetistas industriais se tornarem capacitados para selecionar combinações de materiais e processos sob medida que impulsionam a melhoria de desempenho para aplicações exigidas.

Se tratando de materiais metálicos, é evidente a ampliação das vantagens relacionadas à Manufatura Aditiva, pois além da construção geométrica, é capaz de controlar a referida constituição de liga. Neste contexto, processos de MA por sinterização seletiva a laser (SLS - *Selective Laser Sintering*) utilizam pó de metal que é facilmente adaptado para produzir ligas personalizadas misturando pós de diferentes metais (ZHANG *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2018). Entretanto, apesar de Souza (2017) enfatizar a maior precisão geométrica dos processos que utilizam laser como fonte energética, Astafurov e Astafurova (2021) relatam seu baixo volume de construção e uma taxa de deposição lenta, além de o laser e pós metálicos tornarem o processo caro.

Por sua vez, apesar possuir menor precisão se comparado ao anterior, os processos que envolvem arco elétrico permitem taxas de deposição mais elevadas e os arames utilizados como matéria-prima possuem preço inferior (DEBROY *et al.*, 2018; SOUZA, 2017). Dessa forma, a MADA se mostra uma solução de baixo custo para fabricação de produtos de grande escala, com vantagem no preço dos equipamentos, apresentando ainda uma alta eficiência energética (ASTAFUROV; ASTAFUROVA, 2021). Nesse âmbito, a possibilidade do controle de liga, vem por meio da utilização do processo duplo arame com constituições de diferentes ligas metálicas entre si, com finalidade de compor uma liga para exigir demandas de projeto. O controle da velocidade relativa de alimentação entre os arames, faz ser possível prever, possivelmente de forma precisa, as concentrações dos elementos que constituem a nova liga formada.

Uma outra possibilidade que a MADA com duplo arame viabiliza, é a

utilização do modo twin para construir peças que necessitam de propriedades diferentes em zonas distintas da sua geometria. Um exemplo de aplicação, seria um duto com resistência à corrosão no lado interno, e aplicação de um aço carbono na extremidade externa.

Para viabilizar a aplicação industrial da tecnologia apresentada, diversos parâmetros atrelados ao processo (corrente, tensão, distância bico de contato peça (DBCP), tecimento, velocidade de alimentação, velocidade de deslocamento), devem ser programados, bem como, analisar suas variações no aspecto da geometria depositada.

Este projeto busca apresentar em sua fundamentação teórica, os conceitos que cercam o processo, além das variações geométricas obtidas experimentalmente na MADA com duplo arame, discutindo melhorias e possibilidades de aplicação.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é construir pré-formas por manufatura aditiva com deposição a arco por duplo arame, estudar os sinais elétricos e fazer uma correlação entre os parâmetros de construção, os aspectos geométricos alcançados e a eficiência de cada processo.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar a fabricação das pré-formas por meio da seleção de parâmetros de deposição;
- Ponderar diferenças operacionais causadas por diferentes estratégias de deposição;
- Mensurar a eficiência das estratégias de deposição das pré-formas e sua correlação ao comportamento operacional de fabricação;
- Analisar o comportamento dos sinais elétricos monitorados ao longo do processo de fabricação das pré-formas e seu resultado na eficiência e comportamento visual destas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos que norteiam o tema da pesquisa, com intuito de embasar o estudo e facilitar a compreensão e apoio as conclusões. São apresentados nesta seção conceitos sobre o sistema processos de fabricação, manufatura aditiva e manufatura aditiva em materiais metálicos.

2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Segundo Lira (2017), fabricar é transformar matérias-primas em produtos acabados por meio de uma variedade de processos. Estes processos de fabricação, são procedimentos realizados a fim de efetuar transformações físicas e/ou químicas no material inicial com o objetivo de agregar valor ao mesmo. Normalmente o material inicial passa por diversas operações até se transformar no produto final (GROOVER, 2010).

Os processos de fabricação são tradicionalmente tratados de forma separada em relação às atividades que são executadas. Neste sentido, Machado, Coelho e Abrão (2009), propuseram que os processos de fabricação fossem separados conforme descrito na Fig.1. Nota-se que a integração entre os processos é inexistente, embora em muitos casos haja a necessidade de um produto passar por vários processos.

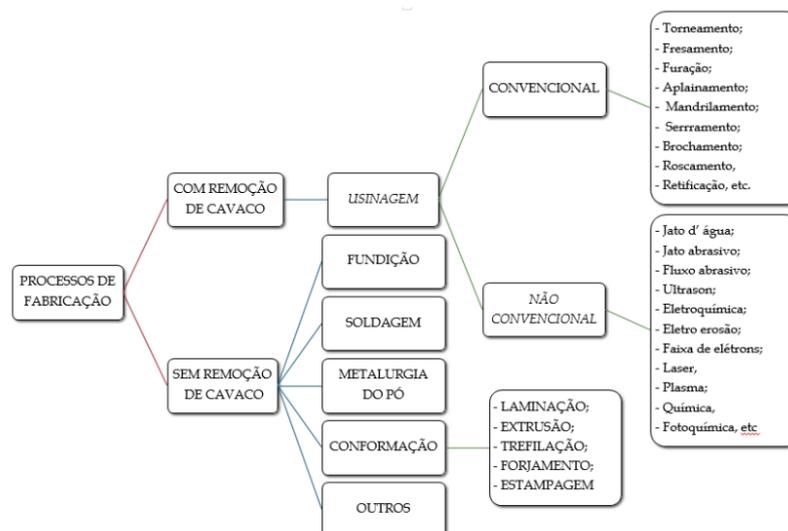


Figura 1. Classificação dos processos de fabricação

Fonte: Adaptado de MACHADO; COELHO; ABRÃO (2009)

Como dito anteriormente, a MA é um processo de fabricação sem remoção de material, tendo surgido como alternativa aos processos tradicionais, por produzir a peça quase acabada, reduzindo o número de etapas de fabricação, além de gerar economia de material (DEBROY *et al.*, 2018). Essa técnica será mais bem explicada a seguir.

2.2 MANUFATURA ADITIVA

Apresentado no final da década de 1980, um novo princípio de fabricação baseado na adição de material ficou conhecido popularmente por impressão 3D, até que um comitê técnico da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) decidiu adotar o termo manufatura aditiva (GIBSON *et al.*, 2010). A MA pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações que podem ser obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente (VOLPATO, 2017), como ilustrado na Fig. 2.

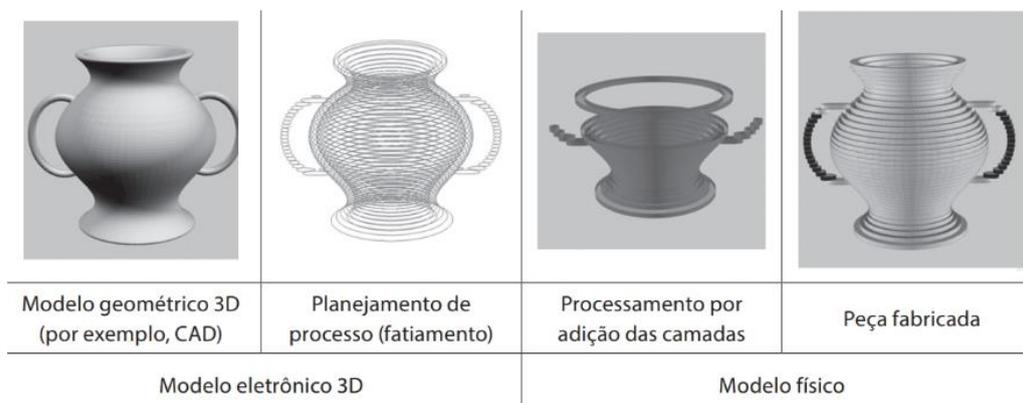


Figura 2. Representação das principais etapas do processo de MA

Fonte: VOLPATO (2017)

Normalmente, a representação geométrica é na forma de um modelo geométrico 3D originado de um sistema CAD. Na maioria dos processos de MA, as camadas adicionadas são planas, mas isso não é uma regra, pois existem tecnologias que permitem adicionar material seguindo a geometria da peça. O processo tem início com o modelo 3D da peça sendo “fatiado” eletronicamente, obtendo-se as “curvas de nível” 2D que definirão, em cada camada, onde será ou não adicionado material. A peça física é, então, gerada por meio da adição (e

da adesão) sequencial das camadas, iniciando na base até atingir o seu topo (VOLPATO, 2017).

Essa tecnologia representa um dos principais avanços relacionados à melhoria dos processos de fabricação de produtos metálicos, principalmente quando se trabalha com customização e número reduzido de exemplares. (MATIAS; RAO, 2015). A característica de não ser um processo subtrativo, aliada à produção da peça quase acabada, reduz o número de etapas de fabricação e possibilita economia no custo de produção (DEBROY *et al.*, 2018).

Segundo o estudo de Viabilidade de Fabricação em MA da Agência de Defesa Europeia (EDA), as características mais importantes da manufatura aditiva podem ser resumidas na Tab. 1 de “prós e contras:

Tabela 1. Vantagens e desvantagens da MA.

PRÓS	CONTRAS
<p>Complexidade da peça</p> <p>Sendo um processo de fabricação camada por camada, esta tecnologia é capaz de renderizar geometrias de grande complexidade, com cavidades e formas que não são possíveis obter com as tecnologias tradicionais.</p>	<p>Detalhe/Precisão</p> <p>Tecnologias tradicionais como a manufatura subtrativa, têm significativamente mais precisão do que tecnologias de manufatura aditiva.</p>
<p>Prazo de entrega (Para poucos exemplares)</p> <p>A capacidade de gerar uma peça simplesmente a partir de um arquivo 3D, torna essas tecnologias vantajosas no que tange ao tempo de fabricação de uma primeira peça, pois elimina a necessidade de outras tecnologias, como ferramentas ou moldes.</p>	<p>Lotes longos</p> <p>Embora aspectos como velocidade e custos de matéria-prima estejam sendo aprimorados continuamente, visando produzir grandes quantidades de peças/produtos, estas tecnologias tendem a ser mais lentas e mais caras do que as tradicionais.</p>
<p>Customização</p> <p>Como não são necessárias ferramentas adicionais, a fabricação de uma peça modificada de mesmo nível de quanto a fabricação do projeto original.</p>	<p>Gama de materiais disponíveis</p> <p>Embora a gama de materiais disponíveis também esteja sendo aprimorada, é ainda limitada em comparação com os materiais disponíveis para outras tecnologias de fabricação.</p>
<p>Custos fixos mais baixos para desenvolvimento de produtos e primeira série de produtos</p> <p>Como não são necessários investimentos adicionais (ferramentas, moldes etc.), é possível diminuir consideravelmente o custo inicial de produção de protótipos e primeira série de produtos.</p>	<p>Qualidade e certificação</p> <p>Por ser uma tecnologia relativamente nova, ainda existem algumas incertezas e faltam padrões para assegurar a qualidade a longo prazo das peças fabricadas.</p>

Fonte: Adaptada de EDA (2018)

Como é possível observar na tabela, uma das desvantagens da MA é a

gama de materiais disponíveis, uma das propostas da utilização de duplo arame é poder contornar este problema com a constituição de novas ligas.

2.2.1 Manufatura Aditiva de materiais metálicos

A MA de materiais metálicos transforma matérias-primas como pó e arame em uma peça metálica densa. Esse processo se dá por meio da fusão e solidificação do material, que ocorre com o auxílio de uma fonte de energia como arco elétrico, laser, feixe de elétrons, ou pelo uso de vibração ultrassônica camada por camada (DEBROY *et al.*; 2018).

Os principais processos de MA de metais se enquadram em duas categorias de acordo com a Norma ASTM F2792, sendo elas Deposição de Energia Direcionada (DED - *Directed Energy Deposition*) e Fusão em leito de pó (PBF - *Powder Bed Fusion*). Uma outra maneira de separar os processos apresentada por DebRoy *et al.*, 2018, é quanto à fonte primária de energia utilizada; assim, podem ser classificadas em laser (L - laser), feixe de elétrons (EB - *Electron Beam*), arco de plasma (PA - *Plasma Arc*) e arco gás-metal (GMA - *Gas Metal Arc*).

Alvo do presente estudo, a DED-GMA será apresentada de maneira mais detalhada na seção 2.2.1.1. Os processos de DED-L, DED-EB e PBF-L, também são bastante utilizados e são representados esquematicamente na Fig. 3.

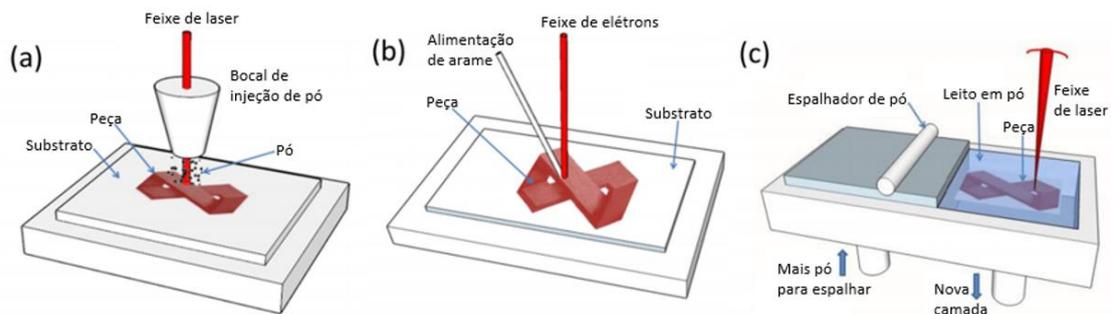


Figura 3. Representação das principais etapas do processo de MA

Fonte: Adaptado de DEBROY *et al.* (2018)

Na Figura 3(a) é apresentada uma vista esquemática da DED-L com a utilização de pó como matéria-prima. Neste sistema, um gás protege a poça de

fusão da oxidação, além de transportar a corrente de pó para a poça criada por um feixe de laser, com o objetivo de depositar o material camada por camada sobre uma peça de substrato. A DED-EB representada na Figura 3(b), utiliza um feixe de elétrons como energia para fundir um arame comercial que alimenta a poça de fusão em uma câmara de vácuo que fornece um ambiente de processamento de alta pureza durante a construção e resfriamento (DEBROY *et al.*, 2018). Na PBF-L da Fig. 3(c), o pó é espalhado em finos leitos e fundido por um laser dentro de uma câmara inerte, diminuindo incrementalmente o eixo Z após cada passo. A fusão ocorre por um movimento da fonte de calor do laser usando espelhos acionados por galvanômetros (KHOT, 2017).

2.2.1.1 MADA

A MADA é um processo que realiza deposição direta de material, utilizando o arco elétrico como fonte de energia e matéria-prima na forma de arame. Por utilizar equipamentos iguais ou semelhantes aos empregados em soldagem a arco elétrico, tem baixo custo associado aos equipamentos, além de contar com diversos arames disponíveis no mercado. (KIVIA *et al.*, 2021). Outra vantagem, é que processos por deposição a arco podem atingir valores superiores a 130 g/min, enquanto processo a laser e feixe de elétrons possuem uma taxa de deposição entre 2 e 10 g/min (SURYAKUMAR *et al.*, 2011).

A MADA pode ser baseada nos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) que utiliza um eletrodo consumível ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) que trabalha com um eletrodo de tungstênio não consumível (SOUZA, 2017). No processo GMAW, a tocha de soldagem e arame são coaxiais entre si, o que facilita o processo de geração de caminhos, além de garantir uma taxa de deposição de 2 a 3 vezes maior (BINTAO *et al.*, 2018)

Segundo Xiong *et al.* (2014), uma das limitações da MADA é o controle de precisão dimensional, por estar sob condições térmicas que mudam bruscamente a todo tempo, como a temperatura entre camadas e taxa de resfriamento. Além disso, durante a deposição, a dissipação térmica varia com o aumento do número de camadas, levando a uma variação das dimensões da camada. Estes problemas influenciam significativamente a precisão dimensional das peças.

Alvo do presente estudo, o processo de DED-GMA é representado esquematicamente na Fig. 4, no qual o arco elétrico é a fonte de calor e arames de deposição comerciais são usados como matéria-prima. Esse processo depende de uma fonte de energia, gás de proteção, um sistema de alimentação de arame e um sistema de controle multi-eixo integrado, responsável pelo movimento relativo da construção e da fonte de calor (DING *et al.*, 2015). Após o processo de deposição, a peça fabricada é removida do substrato por usinagem e muitas vezes requer mais operações de acabamento para atingir a qualidade superficial desejada.

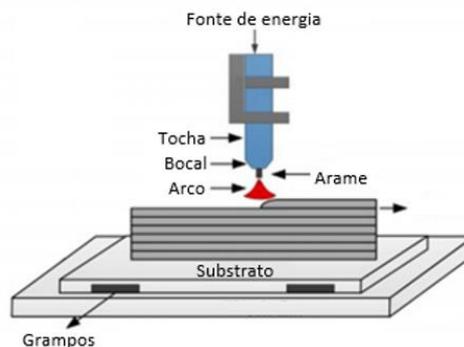


Figura 4. Representação esquemática do processo DED-GMA

Fonte: Adaptado de DEBROY *et al.* (2018)

2.2.2 MIG/MAG GMAW

Como já referido anteriormente, a manufatura por DED-GMA é baseada no processo de soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW – *Gas Metal Arc Welding*). Este processo realiza a união de peças metálicas através do aquecimento destas, o que ocorre por meio de um arco elétrico entre o eletrodo metálico nu (consumível), e a peça de trabalho, onde o arame eletrodo é alimentado mecanicamente (VILANI, 2017). O processo pode ser esquematicamente representado pela Fig. 5.

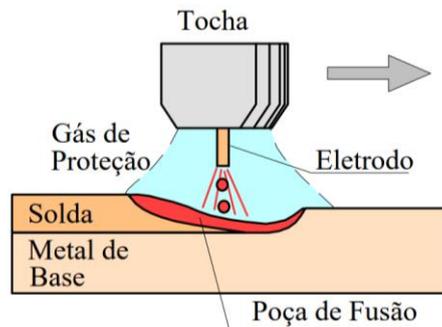


Figura 5. Representação esquemática do processo GMAW

Fonte: MODENESI (2000)

A configuração básica para a soldagem GMAW, como visto na DED-GMA, conta com uma fonte de energia, tocha de soldagem, gás de proteção e alimentador de arame, como mostrado na Fig. 6. Geralmente a fonte tem uma saída de tensão constante, que pode ser configurada entre 15 e 50V, e trabalha em conjunto com um alimentador de arame de velocidade que pode ser configurada entre 1 e 18 m/min. Quase sempre, utiliza-se corrente contínua com o eletrodo ligado ao polo positivo (CC+) (MODENESI, 2000).

Segundo Modesi (2000), a tocha possui orifícios para passagem de gás de proteção, bocal para dirigir o fluxo de gás, um contato elétrico deslizante que transmite a corrente elétrica ao arame (bico de contato) e interruptor para acionamento do processo. O alimentador de arame é dotado de um sistema para controle de velocidade, um motor e rolos para impulsão do arame.

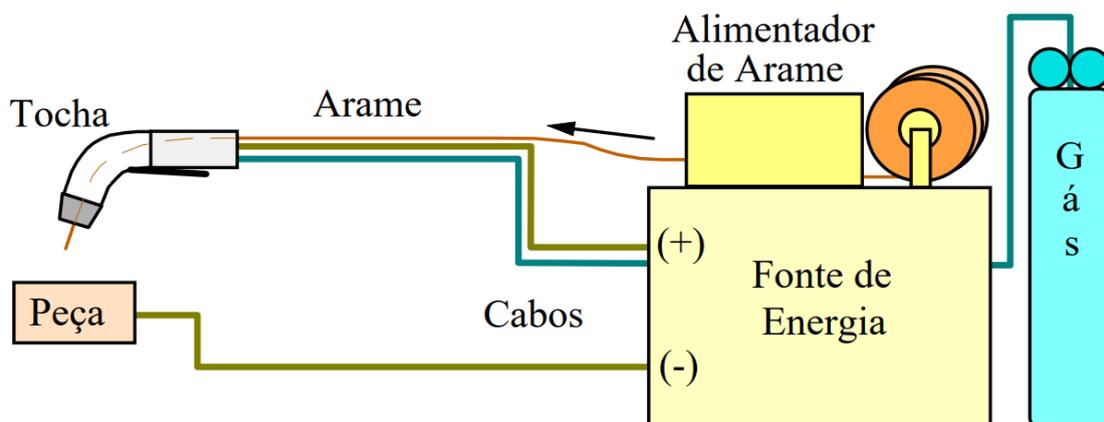


Figura 6. Equipamento para a soldagem GMAW

Fonte: MODENESI (2000)

2.2.3 Gás de proteção

A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. Dessa forma, o processo é conhecido como MIG (*Metal Inert Gas*) quando a proteção gasosa é inerte ou rica em gases inertes (Ar/He), ou MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás usado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos (CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂).

Gases inertes puros, geralmente são usados na soldagem de metais e ligas não ferrosas, enquanto misturas de gases inertes com quantidade pequena de gases ativos são usadas com aços ligados. Por sua vez, o CO₂ puro ou misturas mais ricas em gases ativos, são usados na soldagem de aços carbono (MODENESI, 2000).

2.2.4 Transferência metálica

O metal fundido na ponta do eletrodo consumível deve ser transferido para a poça de fusão. A maneira como essa transferência é realizada, afeta diversas características do processo, como a estabilidade do arco, absorção de gases pelo material fundido, aplicabilidade em determinadas posições e nível de respingos. De maneira simplificada, a soldagem MIG/MAG convencional possui três tipos principais de transferência metálica: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência goticular (*spray*). O modo de transferência depende de parâmetros operacionais, como corrente, polaridade, diâmetro, eletrodo e gás de proteção (VILANI, 2017).

A Fig. 7 apresenta o campo operacional dos três principais modos de transferência em função da corrente e da tensão no processo GMAW para um eletrodo positivo com proteção a base de argônio.

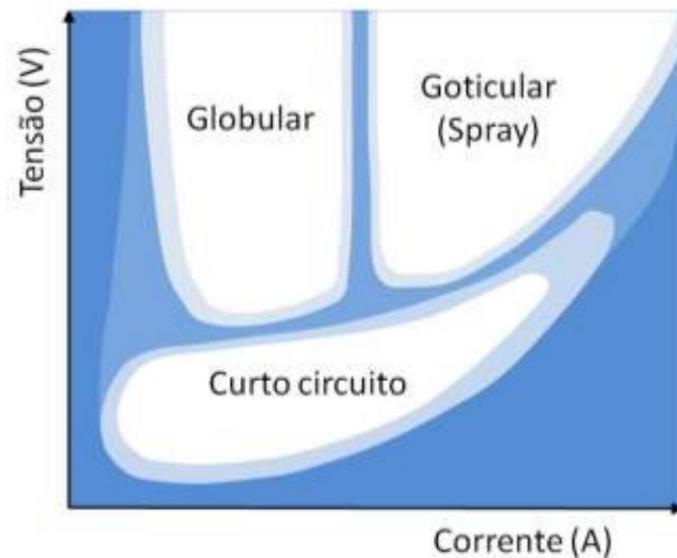


Figura 7. Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio

Fonte: MODENESI (2012)

A transferência por curto-circuito ocorre geralmente em correntes e tensões de soldagem relativamente baixas, os quais permitem obter baixa força eletromagnética, grande diâmetro de gota e arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar, com frequência de transferência de curto-circuito que pode variar de 20 a 200 Hz (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

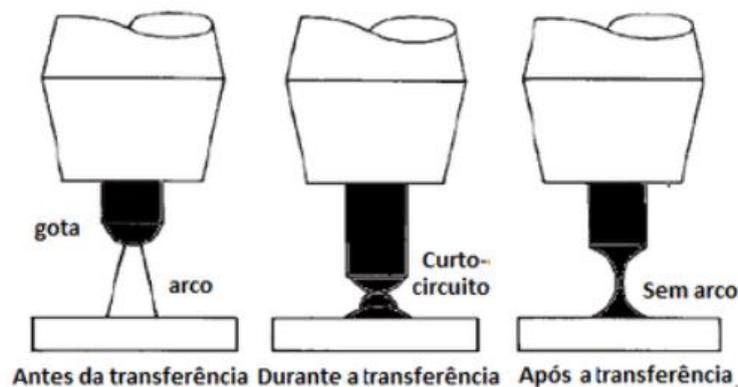


Figura 8. Transferência por curto-circuito

Fonte: DA SILVA *et al.* (2011) e SCOTTI (2009)

Silva (2012) diz que a transferência globular se caracteriza pela deposição de gotas de metal fundido com grandes diâmetros e com forma irregulares, as

quais tendem a acumular na ponta do arame-eletrodo. É o modo de transferência mais indesejado na soldagem MIG/MAG. A gota é destacada principalmente pela força da gravidade, formando uma superfície irregular e respingos. Como consequência dos tamanhos das gotas, o processo é geralmente limitado a posição plana e horizontal.

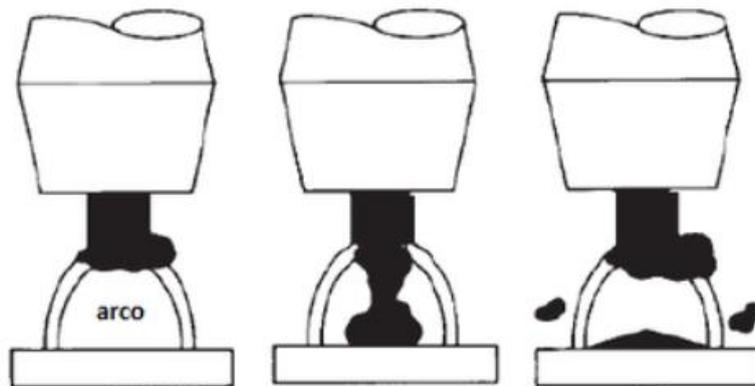


Figura 9. Transferência globular

Fonte: DA SILVA *et al.* (2011) e SCOTTI (2009)

A Transferência Goticular (“*Spray*”), foi o primeiro modo a ser utilizado na soldagem MIG/MAG. É caracterizado por gotas muito pequenas que são destacadas pela alta frequência, com resultado do uso de elevadas correntes (elevadas forças eletromagnéticas (SILVA, 2012).



Figura 10. Transferência goticular

Fonte: DA SILVA *et al.* (2011) e SCOTTI (2009)

2.3 GMAW COM DUPLO ARAME

A GMAW com duplo arame (Fig.11), como o próprio nome sugere, é uma

variação que trabalha com dois arcos elétricos por dois arames-eletrodo, o que aumenta do volume do cordão e reduz o número de passes, garantindo um menor tempo de soldagem. Apesar do ganho em deposição, quando dois arcos elétricos são colocados bem próximos um do outro, esta variação apresenta mais instabilidade nos arcos (provocada pela interação entre os campos). A Fig. 12 exemplifica essa interação em função da polaridade (VILANI, 2017).

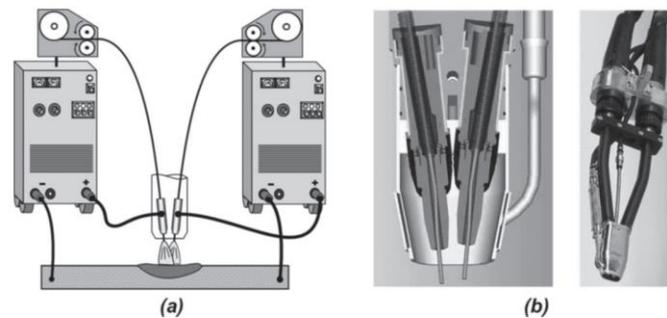


Figura 11. Representação esquemática do processo GMAW duplo arame: (a) montagem com potenciais separados; (b) tochas tipicamente usadas

Fonte: SCOTTI (2014)

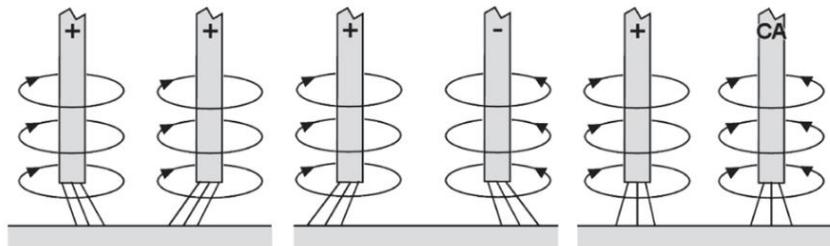


Figura 12. Sopro magnético gerado na soldagem com duplo arame para diferentes polaridades

Fonte: VILANI (2017)

Com a utilização de duas fontes para comandar os dois alimentadores, é possível impor diferentes parâmetros elétricos sobre cada arame. Ainda é possível variar a disposição relativa das pontas dos arames em relação à peça, onde a disposição em paralelo é conhecida como Twin, mostrado na Fig. 13a, e em série, Tandem, mostrado na Fig. 13b.

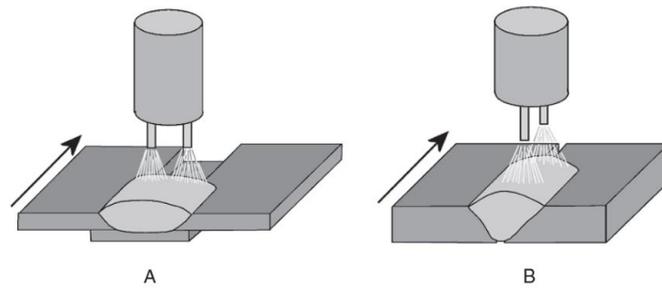


Figura 13. Duplo arame. a – Twin; e b – Tandem

Fonte: VILANI (2017)

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, além das técnicas e métodos utilizados em todas as etapas.

3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Inicialmente, foi necessário a montagem de uma bancada experimental para viabilizar a construção das pré-formas. Dessa forma, com a bancada pronta, foram escolhidos os primeiros parâmetros de deposição e realizados os primeiros pré-testes. Assim, foram estabelecidos valores de tensão, DBCP, vazão de gás, estratégias de tecimento, velocidade dos arames, velocidade de deposição, tempo de espera entre camadas e técnica de resfriamento. Mudanças nos parâmetros foram realizadas continuamente até atingir resultados de deposição satisfatórios.

Com os parâmetros de deposição validados experimentalmente, o passo seguinte foi a confecção das pré-formas. Com as pré-formas concluídas, foram realizados paralelamente um estudo das geometrias obtidas, dos sinais elétricos adquiridos durante as deposições, e de eficiência do processo. Finalmente, as conclusões sobre o estudo foram realizadas. O procedimento metodológico apresentado, pode ser representado pelo fluxograma abaixo.

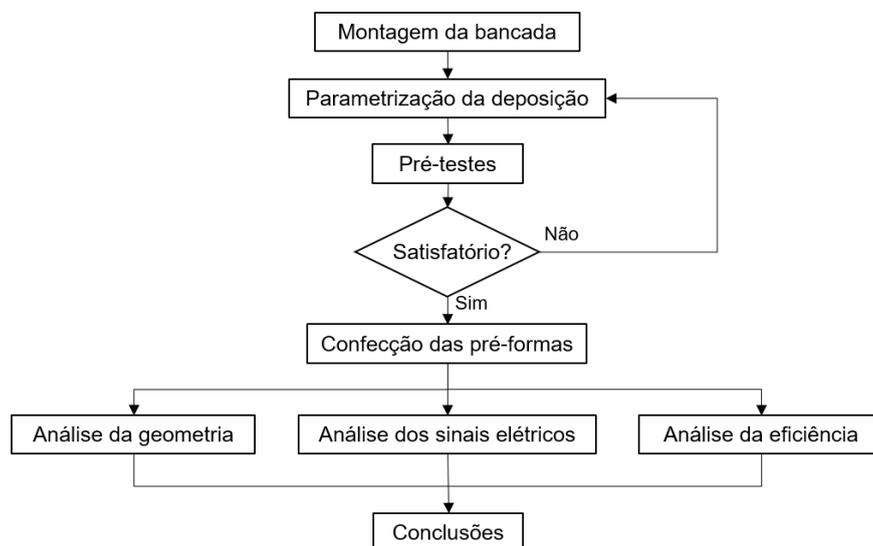


Figura 14. Fluxograma do procedimento metodológico

3.2 BANCADA

Para a montagem da bancada, foram utilizados os seguintes componentes:

- Duas fontes de soldagem modelo MTE digitec 600 da marca IMC;
- Dois alimentadores de arame;
- Tocha MIG/MAG duplo arame
- Um extrator de fumos;
- Um mini chiller da marca Mecalor;
- Mesa e computador;
- Mesa de coordenadas cartesianas controlada por código G;
- Cuba com sistema de resfriamento ativo;
- Um cilindro de gás de proteção;

Os componentes da bancada foram dispostos conforme a Fig. 15 abaixo.

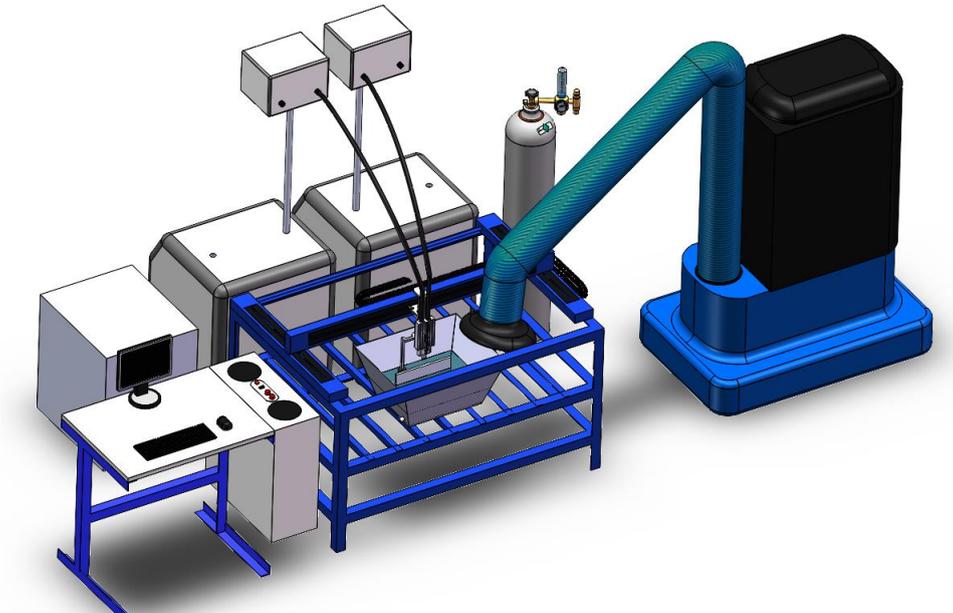


Figura 15. Disposição geral da bancada de deposição em MADA duplo arame.

3.3 SISTEMA DE RESFRIAMENTO ATIVO PARA MADA DUPLO ARAME

A técnica escolhida para resfriamento das pré-formas foi a de RAQI (Resfriamento Ativo por Quase-Imersão). Este gerenciamento térmico consiste no resfriamento da pré-forma por meio de sua quase imersão, onde o nível do líquido de resfriamento (no caso do estudo em questão, a água em temperatura

ambiente) é mantido a uma distância fixa do topo da pré-forma durante todo o tempo de fabricação. O gerenciamento térmico da referida técnica é representado a seguir pela Fig. 16.

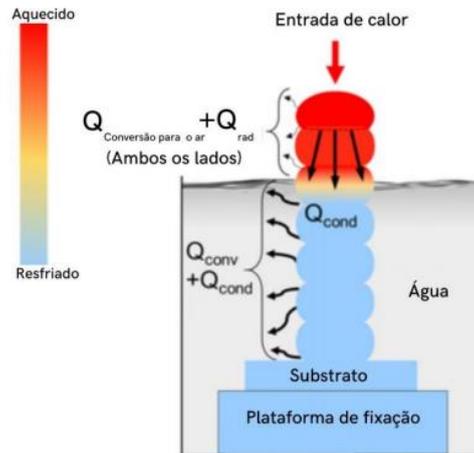


Figura 16. Ilustração esquemática do fluxo de calor no sistema de RAQI

Fonte: Adaptado de DA SILVA *et al.* (2020)

Para viabilizar tal técnica, o aparato contou com uma cuba para reter a água responsável pela troca de calor com a peça em deposição. Além disso, o sistema também dispôs de um sensor de nível fixado na tocha que controla de maneira automatizada uma válvula solenoide 12 V, responsável por abrir e fechar a entrada de água na cuba. O primeiro sistema montado foi utilizado na deposição da parede ER70S-3/ER80S-G, e é descrito na Fig. 17.

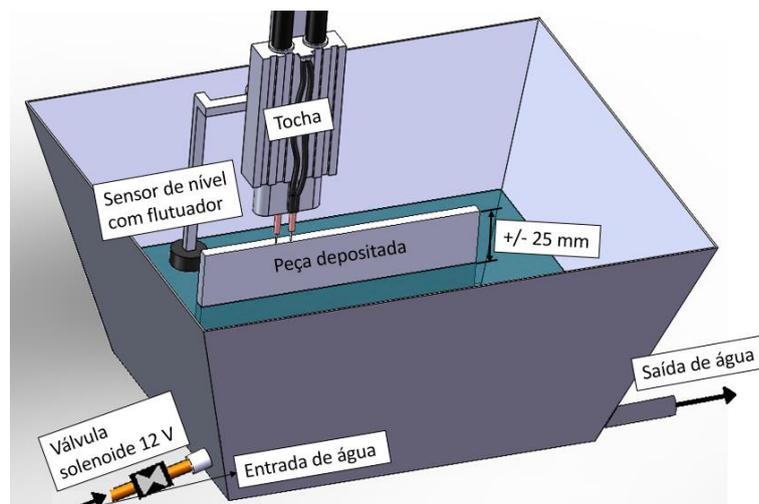


Figura 17. Configuração esquemática do aparato inicial de RAQI

Após notar diferenças consideráveis na temperatura da água em regiões distintas da cuba, o sistema de resfriamento foi aprimorado a fim de distribuir melhor a água que entra no recipiente, melhorando a troca térmica. Para tal, foi necessário a utilização de um circuito de tubos de PVC dotados de furos que dispersavam a entrada de água no sistema. A referida mudança, é apresentada na Fig. 18.

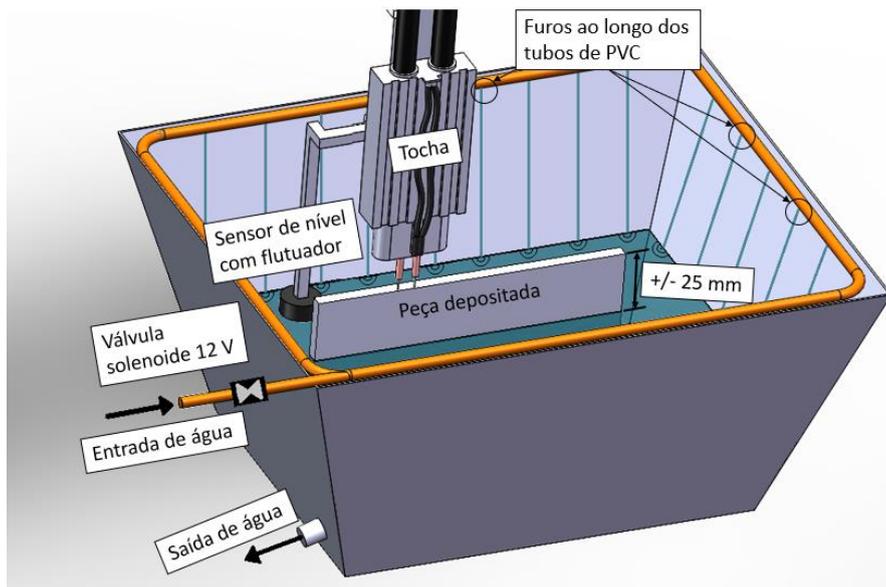


Figura 18. Configuração esquemática do aparato de RAQI após melhoria

3.3 ARAMES DE DEPOSIÇÃO

Optou-se pelo uso de 3 diferentes arames de aço carbono para realizar as combinações de materiais a serem depositados por MADA pela técnica de deposição em duplo arame tandem. Os arames escolhidos foram o ER70S-3 classificado pela norma AWS A5.18/A5.18M (2005), o ER80S-G e ER110S-1 ambos classificados pela norma AWS A5.28/A5.28M (2005). As combinações formadas para deposição são ER70S-3/ER70S-3, ER70S-3/ER80S-G e ER70S-3/ER110S-1, sendo todas elas na condição 50/50%. Além disso, o diâmetro de todos os arames empregados é de 1,2 mm, e as composições são resumidas na Tab. 2

Tabela 2. Composições das pré-formas

Pré-formas depositadas		
Composição	Material 1	Material 2
1	70S-3 (50%)	80S-G (50%)
2	70S-3 (50%)	110S-1 (50%)
3	70S-3 (50%)	70S-3 (50%)

3.4 GÁS DE PROTEÇÃO

O gás de proteção conhecido como “free” que é composto por uma mistura de 98% de argônio (Ar) e 2% de dióxido de carbono (CO₂) foi utilizado para todas as deposições. Após os testes realizados, a vazão 40 l/min no bocal, ou seja, 20 l/min para cada arame se mostrou a mais apropriada, e foi mantida durante as deposições.

3.5 SUBSTRATO

Os substratos de aço carbono são os elementos sobre os quais foram depositadas as paredes. Os mesmos, foram fixados ao fundo da cuba mencionada anteriormente, de maneira a manter o seu lado com maior momento inercial no sentido da deposição, tendo um papel de contraposição aos esforços de distorção provocados pela entrada de altos níveis de energia durante o processo. A Fig. 19 mostra as visões lateral e superior do modelo de substrato utilizado.



Figura 19. Substrato de deposição

3.6 ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO

A seguir, serão apresentadas as estratégias base de deposição utilizadas durante a pesquisa. O tecimento cruzado, foi aplicado apenas na fase de pré-testes, enquanto as demais também foram utilizadas na deposição das paredes. As alterações pontuais realizadas nas estratégias de tecimento para construção das paredes, são mais bem detalhadas na descrição de cada parede.

3.6.1 Sem uso de tecimento

Nesta estratégia, a tocha se move apenas na direção X durante cada deposição. Se tratando de duplo arame, o bico líder (posicionado mais à frente em relação ao sentido de deposição) abre o arco primeiro, enquanto o bico seguidor abre seu arco apenas ao chegar na posição de abertura do arco líder. O trajeto descrito é exemplificado na Fig. 20.

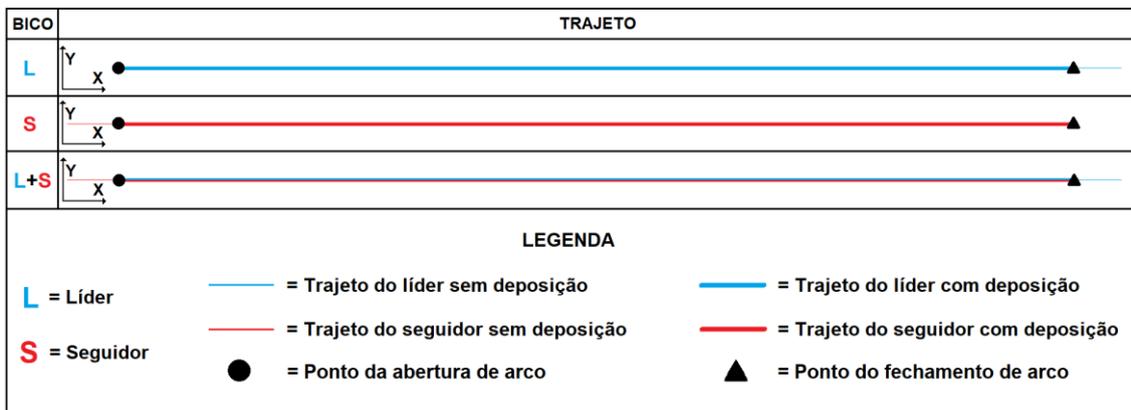


Figura 20. Deposição em modo tandem sem tecimento

3.6.2 Tecimento retangular

Diferentemente da estratégia anterior, os bicos se movem em relação aos dois eixos, mas apesar disso, não se movimentam em relação aos eixos X e Y de maneira simultânea (primeiro se conclui a movimentação em um eixo para se mover no próximo, e assim sucessivamente). Além das velocidades em ambos os eixos, o passo e a amplitude são parâmetros que caracterizam o tecimento retangular, precisando ser implementados no código G que controla a mesa articulada.

A Fig. 21 representa o comportamento dos bicos para um exemplo de tecimento retangular que inicia a deposição em uma extremidade e finaliza na extremidade oposta, e a Fig. 22 demonstra o passo e a amplitude no tecimento referido.

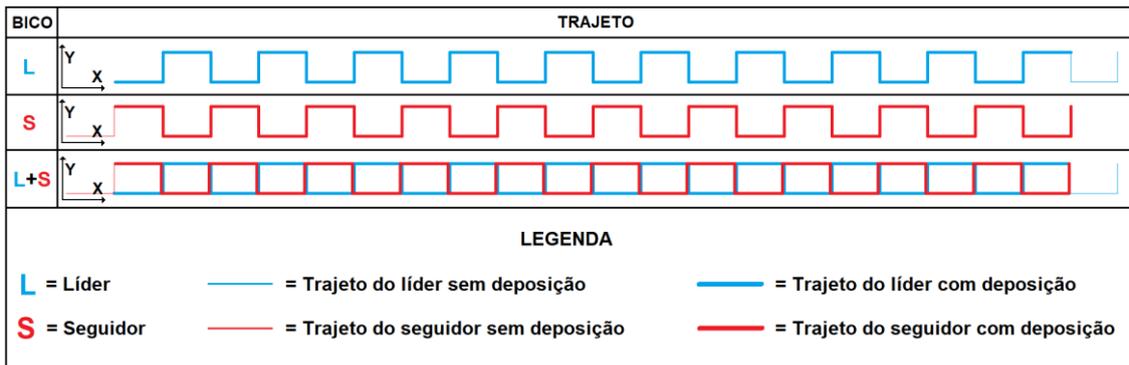


Figura 21. Representação do tecimento retangular em duplo arame

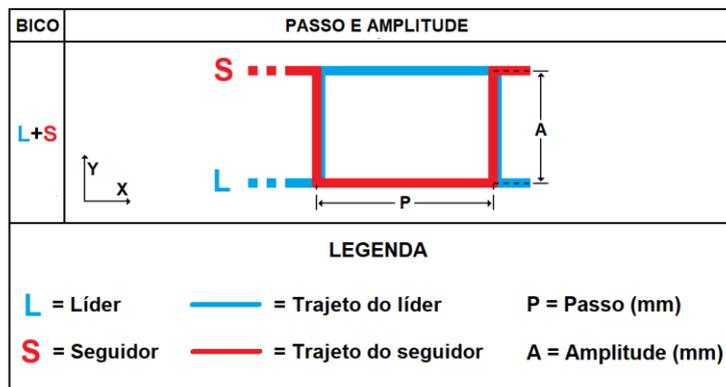


Figura 22. Demonstração de passo e amplitude tecimento retangular em duplo arame

3.6.3 Tecimento cruzado

Além do tecimento retangular, uma outra estratégia de deposição oscilatória foi aplicada na fase de pré-testes, sendo ela, o tecimento cruzado. Neste tecimento, a trajetória dos bicos se intercepta de maneira cruzada, e diferentemente do tecimento retangular, não há movimentação puramente no eixo Y, aumentando a velocidade efetiva no deslocamento diagonal. A trajetória dos bicos no tecimento cruzado bem como a representação do passo e amplitude são apresentados respectivamente nas Fig. 23 e 24.

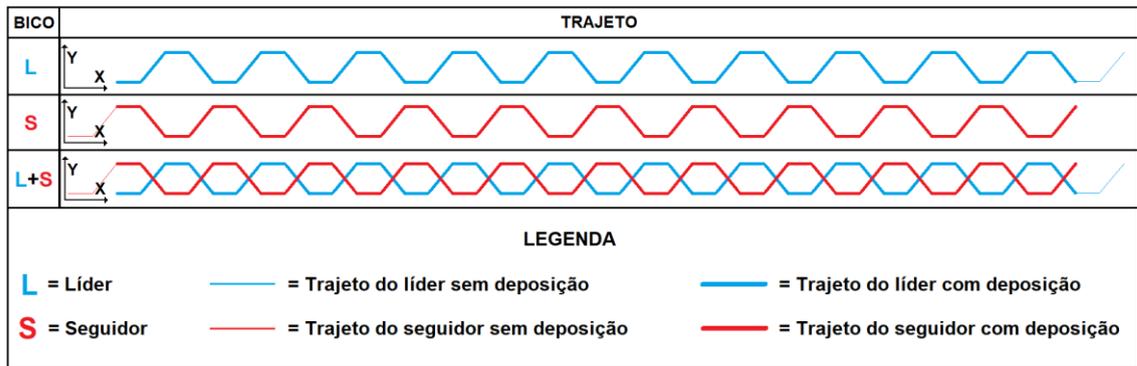


Figura 23. Representação do tecimento cruzado em duplo arame

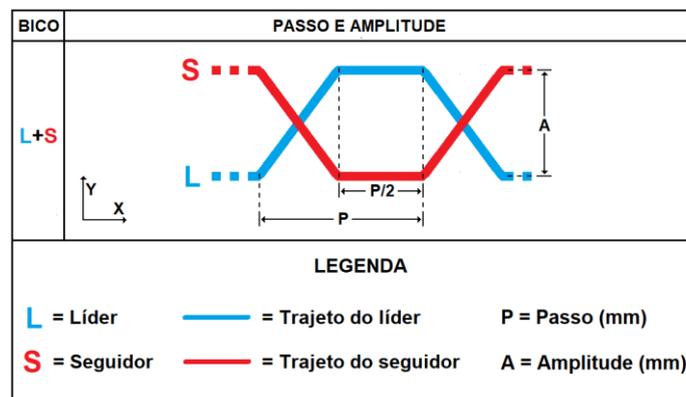


Figura 24. Demonstração de passo e amplitude tecimento cruzado em duplo arame

3.7 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para a coleta dos sinais elétricos, foi utilizado o sistema de aquisição de dados SAP V4 IMC, que é capaz de ler e armazenar dados de corrente, tensão, velocidade de alimentação, vazão de gás e potência média. Durante as deposições, os valores instantâneos de corrente e tensão foram lidos e armazenados em uma frequência de 5000 Hz pelo sistema SAP.

3.8 PAREDE 1 EM ER70S-3/ER80S-G

A pré-forma foi fabricada em modo Tandem sem a utilização de tecimento, conforme a demonstração da Fig. 20, sendo que as funções líder e seguidor se alternam a cada nova camada (o arame que era líder passa a ser seguidor e vice-versa), uma vez que a estratégia adotada realiza deposição nos dois

sentidos da direção de manufatura, mantendo a abertura e fechamento dos arcos sempre nas extremidades da peça. A tocha foi posicionada perpendicularmente aos bicos, com distância entre bicos de 16 mm e DBCP de 18 mm. Para essa pré-forma, foi utilizado o primeiro sistema de resfriamento descrito (sem o circuito de tubos de PVC).

As fontes foram configuradas com uma tensão de 30,5V e a velocidade de avanço da tocha foi de 1000 mm/min, enquanto a velocidade de alimentação dos dois arames foi de 8 m/min. Com o auxílio de um pirômetro ótico, a temperatura de interpasse foi mantida abaixo dos 100°C, sendo necessárias 136 camadas até a conclusão da pré-forma.

3.9 PAREDE 2 EM ER70S-3/ER110S-1

A pré-forma foi fabricada em modo Tandem com a utilização do tecimento retangular demonstrado na Fig. 21, e com passo de 16 mm e amplitude de 8 mm. Mantem-se a alternância das funções líder e seguidor, por realizar deposição nos dois sentidos da direção de manufatura. Diferentemente das anteriores, as paradas foram realizadas em pontos intermediários do sentido de deposição. A tocha foi posicionada perpendicularmente ao bico, mantendo a distância entre bicos em 16 mm (coincidindo com o passo) e DBCP de 18 mm, passando a utilizar o segundo sistema de resfriamento descrito (com o circuito de tubos de PVC).

As fontes foram configuradas com uma tensão de 31 V e as velocidades de avanço da tocha foram de 1750 mm/min no eixo x e 2150 mm/min no eixo y, com velocidade de alimentação dos dois arames de 8 m/min. A temperatura de interpasse foi mantida abaixo dos 100 °C, sendo necessárias 190 camadas até a conclusão da pré-forma.

3.10 PAREDE 3 EM ER70S-3/ER70S-3

Também fabricada em modo Tandem com a utilização do tecimento retangular, essa pré-forma seguiu uma estratégia diferente para abertura e fechamento dos arcos. Inicialmente a camada zero foi depositada, e consistia em 20 % do comprimento total da peça (L). Em seguida, iniciaram-se os ciclos de deposição que são representados na Fig. 25.

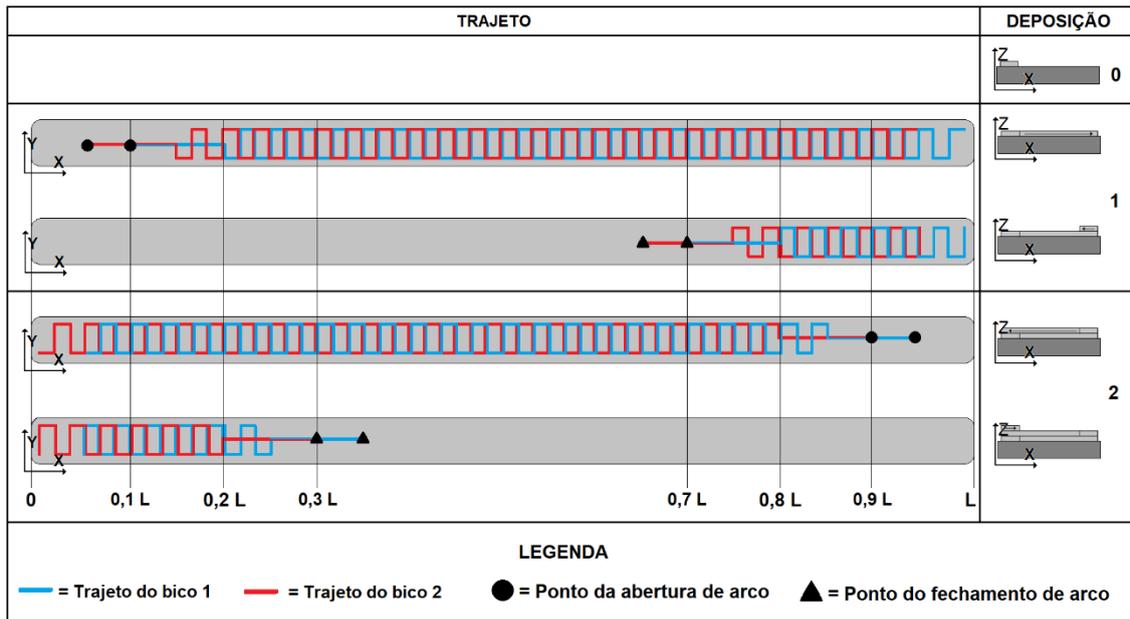


Figura 25. Estratégia de deposição da parede ER70S-3/ER70S-3

Como é possível ver na Fig. 25, os bicos iniciam a trajetória posicionados no centro da amplitude de tecimento, com o bico 1 distando $0,1 L$ da extremidade à esquerda. Em seguida, os bicos iniciam a abertura dos arcos se movendo apenas no eixo X a uma velocidade de 3620 mm/min até atingir a posição $0,2 L$, onde finalmente inicia o tecimento retangular com velocidades de 2300 mm/min nos dois eixos.

Ao atingir o comprimento L , é realizado um incremento em Z de $1,15 \text{ mm}$, e o tecimento muda apenas o sentido de deposição, mantendo o comportamento até atingir o ponto $0,8 L$, quando inicia o processo de fechamento dos arcos seguindo a mesma estratégia de abertura. Passado o tempo de espera, segue-se para a parte dois do ciclo. Os ciclos de deposição se repetiram até atingir a altura desejada.

Para esta pré-forma utilizou-se o método de resfriamento aprimorado com os tubos de PVC. Inicialmente havia uma espera de 40 segundos entre camadas, porém, com o aumento da coluna de água e área de resfriamento, este valor passou a 10 segundos de espera nas últimas deposições. Como a coluna de água é responsável pela troca térmica, ela aumenta proporcionalmente à altura da peça, e se mostra suficiente para a retirada de calor em um processo de alta energia como o de duplo arame.

A tocha foi posicionada em um ângulo neutro, e teve a distância entre bicos

alterada para 21 mm. Respeitando uma e DBCP de 18 mm, o tecimento contou com um passo de 7 mm e amplitude de 9,8 mm. As fontes foram configuradas com uma tensão de 29,8 V e velocidade de alimentação dos arames de 7,6 m/min, sendo necessárias 163 camadas até a conclusão da pré-forma.

3.11 PRINCIPAIS DIFERENÇAS OPERACIONAIS ENTRE AS PRÉ-FORMAS

A Tab. 3 apresenta de forma resumida as principais diferenças entre as paredes em termos operacionais.

Tabela 3. Principais configurações operacionais

	ER70S-3/ER80S-G	ER70S-3/ER110S-1	ER70S-3/ER70S-3
Tecimento	Sem tecimento	Retangular	Retangular
Distância entre bicos	16 mm	16 mm	21 mm
Passo	-	16 mm	7 mm
Amplitude	-	8 mm	9,8 mm
Abertura e fechamento dos arcos	Nas extremidades	Em pontos intermediários (durante o tecimento)	Em pontos intermediários (à parte do tecimento)
Resfriamento	Sem difusor na entrada de água	Com difusor na entrada (tubos de PVC)	Com difusor na entrada (tubos de PVC)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. São apresentados nesta seção aspectos geométricos e rendimento de deposição dos processos e sinais das três paredes estudadas.

4.1 ASPECTOS GEOMÉTRICOS E RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO DOS PROCESSOS

A seguir, serão apresentados os aspectos geométricos obtidos em cada processo. Como as características de oxidação após a deposição e o aspecto pós usinagem são semelhantes para todas as paredes, serão apresentados apenas para o primeiro estudo que se refere à deposição ER70S-3/ER80S-G.

A eficiência alcançada na operação, também será apresentada para cada deposição realizada, sendo esta, calculada pela razão entre a massa final da pré-forma e a massa do material requerido para sua construção.

4.1.1 Parede em ER70S-3/ER80S-G

Por ter sido a primeira pré-forma depositada, foi extremamente importante para a implementação de melhorias nos processos subsequentes. Na figura 26 é possível ver o aspecto bruto da parede após a deposição, onde nota-se elevada oxidação, possivelmente justificada pelo contato da peça em elevadas temperaturas com a água utilizada no processo de RAQI. Além disso, com a utilização de um pirômetro ótico, foi possível observar que a água fria que entrava na cuba não se distribuía de maneira eficiente, o que diminuiu consequentemente o rendimento de deposição do sistema de RAQI.

O rendimento de deposição do processo de deposição foi de 83,5 %, o que representa inicialmente uma perda de 16,5 % do material empregado na construção da pré-forma, e resultou na menor eficiência dentre as três deposições. Como é possível notar na figura 26, existem diversos defeitos nas extremidades da peça, possivelmente atribuídos ao fato de as aberturas e fechamentos dos arcos se darem nesta região, podendo justificar o fato de ser a menor dentre as três eficiências estudadas. Em contrapartida, a parede apresentou poucas ondulações, como é possível observar de maneira mais clara

na Fig. 27 que mostra a parede depositada após limpeza da camada de oxidação gerada na deposição.



Figura 26. Parede em ER70S-3/ER80S-G em seu aspecto bruto após deposição

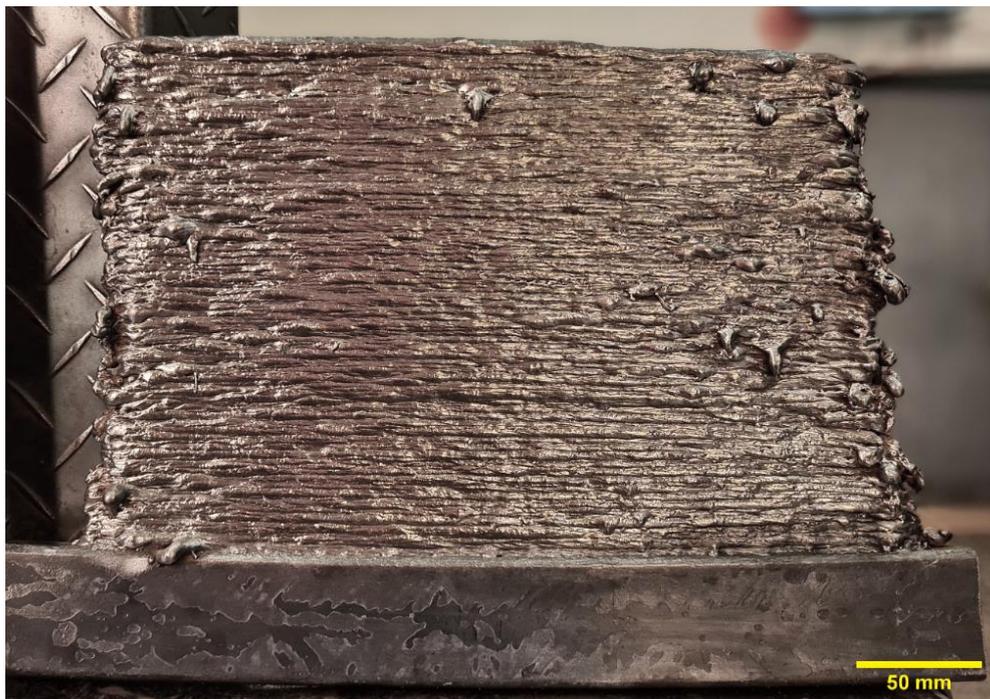


Figura 27. Parede em ER70S-3/ER80S-G após limpeza

A seguir, a Fig. 28 apresenta, o aspecto após o corte do substrato e das

extremidades da parede depositada. Além disso, foram retirados os respingos e defeitos de escorrimento da poça de fusão e rugosidade mais grosseira. Após limpeza e retirada dos respingos, a parede passou por processos de usinagem (faceamento) e seu aspecto pode ser observado na Fig. 29.



Figura 28. Parede em ER70S-3/ER80S-G após remoção de respingos e corte das extremidades e substrato



Figura 29. Parede em ER70S-3/ER80S-G após operação de faceamento

4.1.2 Parede em ER70S-3/ER110S-1

A segunda parede depositada, apresentou 89,5 % de eficiência no processo. A evolução pode ser observada na Fig. 30, que apresenta menos defeitos nas extremidades da pré-forma e menos escorrimientos ao longo da peça.

A evolução no rendimento de deposição e no aspecto, possivelmente é atribuída à estratégia de abertura e fechamento dos arcos em pontos intermediários da peça, bem como à melhoria no sistema de RAQI. Além disso, o segundo sistema de gerenciamento térmico por RAQI se mostrou mais eficiente nas subsequentes deposições, por causa disso.



Figura 30. Parede em ER70S-3/ER110S-1

4.1.3 Parede em ER70S-3/ER70S-3

A terceira parede depositada apresentou um rendimento de deposição de 92,7 %, o que representa o melhor resultado dentre os três processos estudados. A deposição que manteve a técnica melhorada de RAQI, operou com passos menores (7 mm) e amplitude maior (9,8 mm) no tecimento, o que possivelmente foi responsável por uma parede com ondulações menores se comparadas com a anterior, além de menor escorrimento de material.

Na Fig. 31 é possível notar as características citadas, que também podem ser atribuídas à nova estratégia que procurou mitigar os efeitos negativos dos regimes transientes (abertura e fechamento dos arcos). Estes regimes, se mostraram mais suscetíveis a escorrimientos quando comparados ao regime quase-estacionário de deposição.

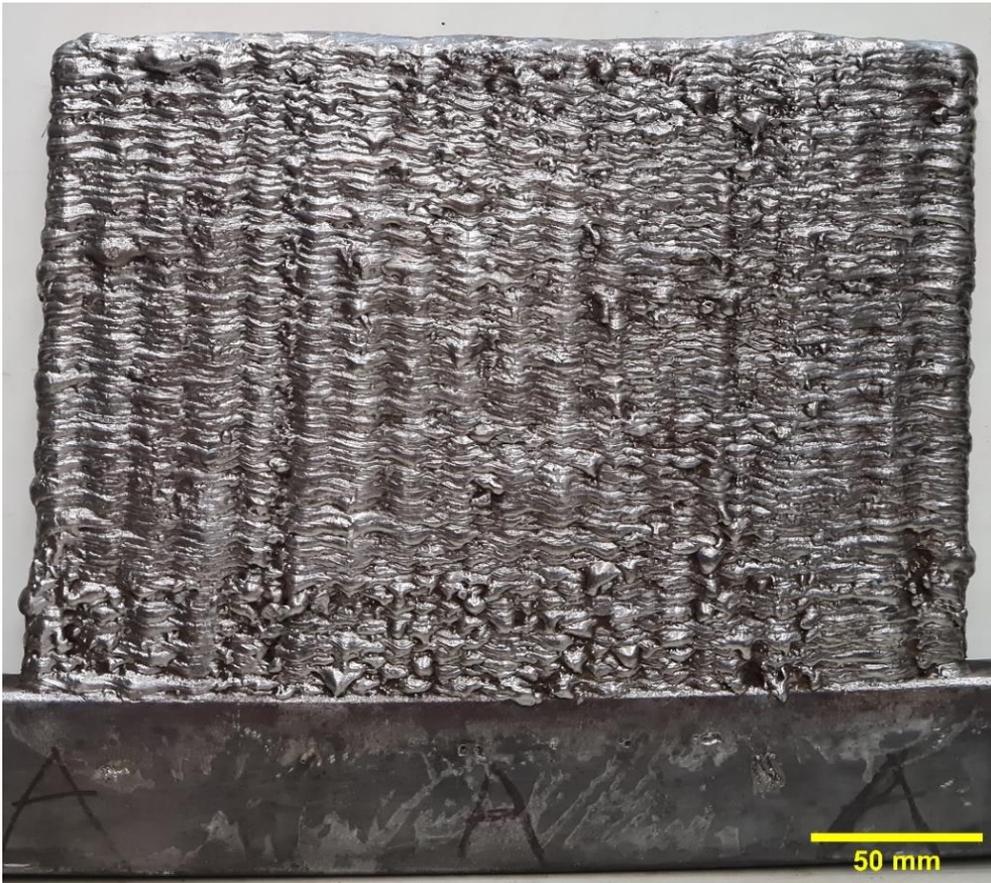


Figura 31. Parede em ER70S-3/ER70S-3

4.2 SINAIS ELÉTRICOS

Para todas as camadas depositadas, foram adquiridos os valores dos sinais elétricos durante toda a deposição. Apesar disso, devido ao comportamento similar em todas as camadas de uma mesma parede, será apresentada somente a aquisição de uma camada escolhida ocasionalmente. Além disso, será apresentado também o aspecto geral de valores médios durante o processo.

4.2.1 Sinais elétricos ER70S-3/ER80S-G

Para esta pré-forma, os valores de corrente instantânea adquiridos foram

coletados em camadas escolhidas de forma aleatória. Na camada 129 são apresentados na Fig. 32 abaixo:

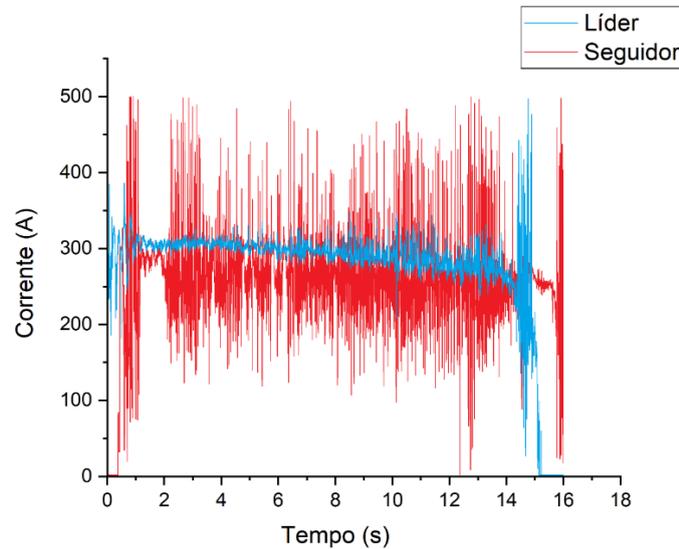


Figura 32. Corrente instantânea na camada 129 da deposição ER70S-3/ER80S-G

Os valores de corrente em regime quase-estacionário (excluindo-se as regiões de abertura e fechamento do arco elétrico) do arame líder, não apresentam grandes variações, dando indícios de uma transferência metálica integralmente goticular. Os valores de corrente do arame seguidor, por sua vez, apresentam grandes variações, indicando uma transferência metálica por curto-circuito. As mesmas observações, podem ser feitas no gráfico de tensão instantânea representado na Fig. 33.

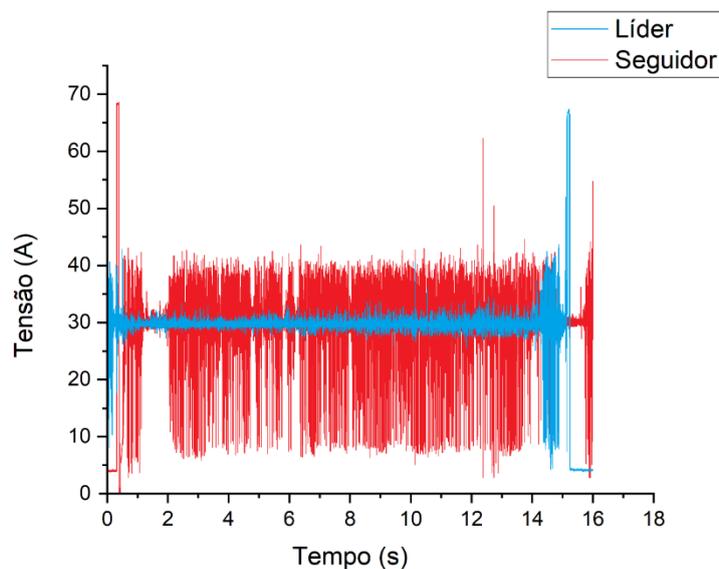


Figura 33. Tensão instantânea na camada 129 da deposição ER70S-3/ER80S-G

Para o arame líder, a média das correntes obtidas em todas as camadas foi de 270 A, enquanto a média das correntes do arame seguidor foi de 254 A. A Fig. 34 mostra as correntes médias adquiridas para cada camada durante a deposição.

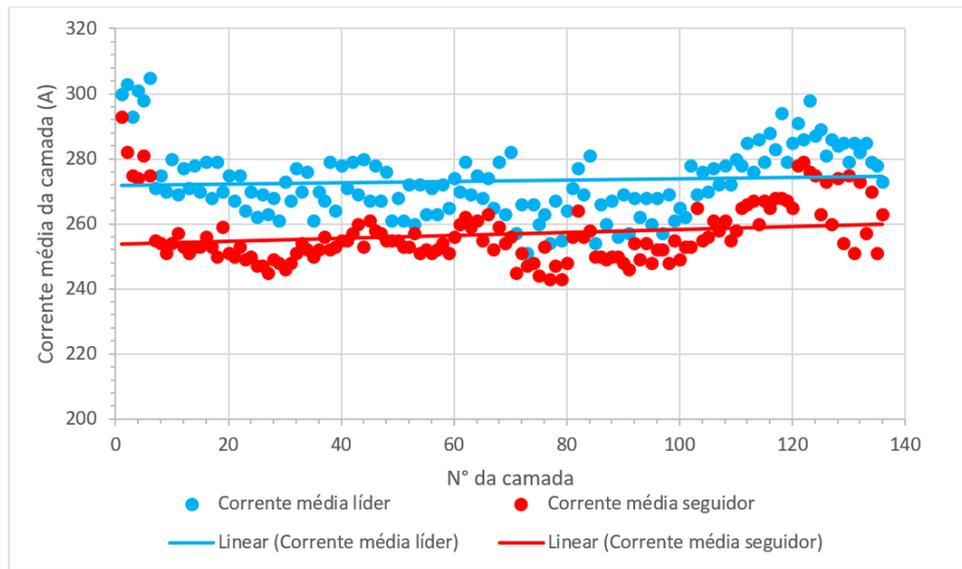


Figura 34. Corrente média ao longo da deposição ER70S-3/ER80S-G

Já para a tensão, a média obtida para todas as camadas foi de 30,5 V para o arame líder, e 30,4 V para o arame seguidor. A Fig. 35 mostra as tensões médias adquiridas para cada camada durante a deposição.

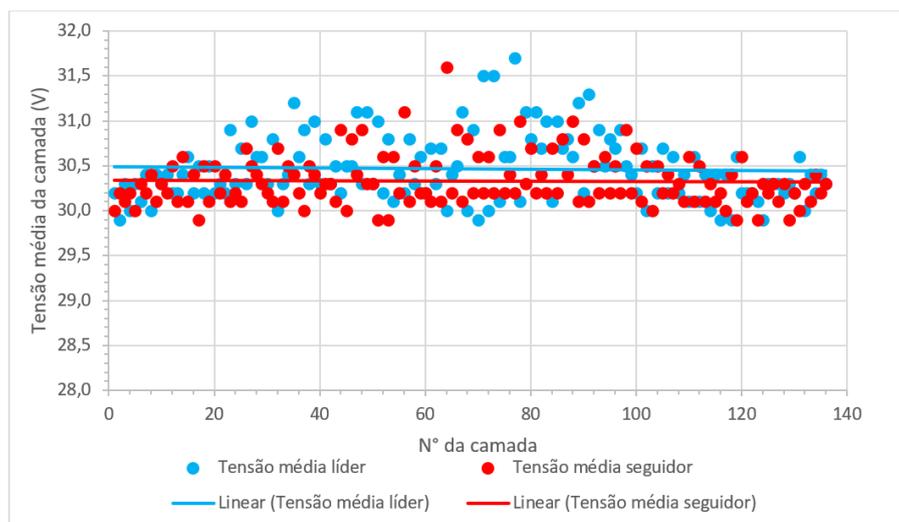


Figura 35. Tensão média ao longo da deposição ER70S-3/ER80S-G

É possível notar uma diferença entre os valores médios de tensão entre arame líder e seguidor, mas principalmente, uma diferença considerável entre os valores médios de corrente entre os dois arames. Isto provavelmente será atribuído à estratégia de deposição, uma vez que o arame seguidor realiza deposição sobre a poça de fusão depositada pelo arame líder, o que altera drasticamente questões térmicas do processo, DBCP e outros, alterando o modo de transferência metálica, e conseqüentemente, os valores dos sinais elétricos.

4.2.2 Sinais elétricos ER70S-3/ER110S-1

Para esta pré-forma, os valores de corrente instantânea adquiridos na camada 59, também escolhida de forma aleatória, são apresentados na Fig. 36 abaixo:

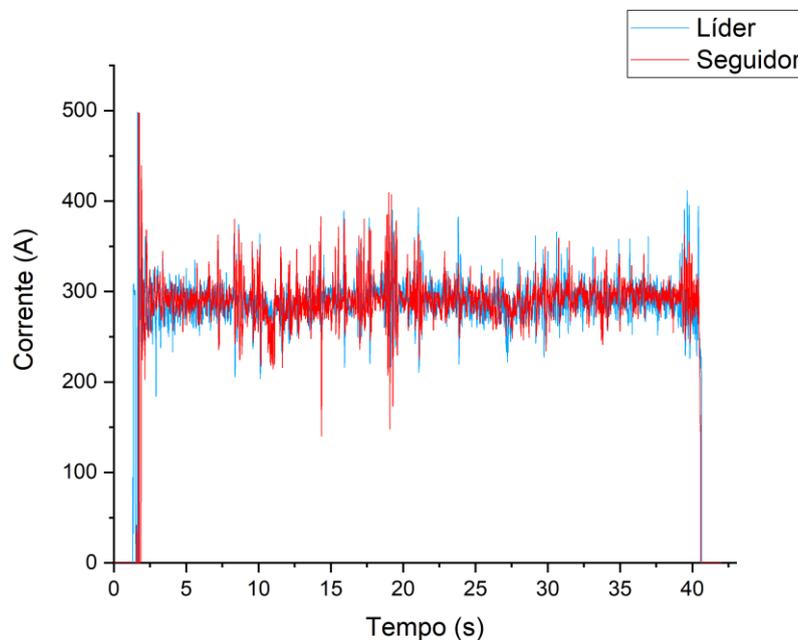


Figura 36. Corrente instantânea na camada 59 da deposição ER70S-3/ER110S-1

Desta vez, é possível notar que o comportamento das correntes em regime quase-estacionário de deposição de ambos os arames, são semelhantes e se mantêm sem grandes variações, indicando uma transferência metálica quase que totalmente goticular. O mesmo comportamento pode ser observado no gráfico de tensão instantânea da Fig. 37 a seguir.

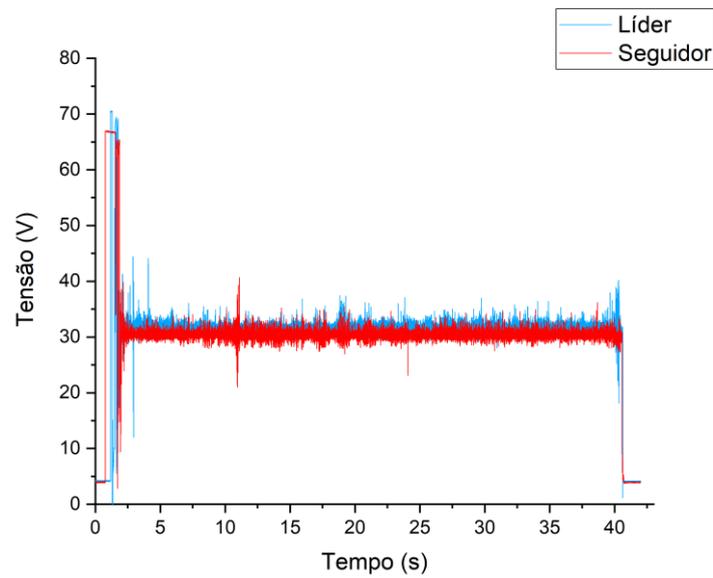


Figura 37. Tensão instantânea na camada 59 da deposição ER70S-3/ ER110S-1

Para o arame líder, a média das correntes obtidas em todas as camadas foi de 280 A, enquanto a média das correntes do arame seguidor foi de 276 A. A Fig. 38 mostra as correntes médias adquiridas para cada camada durante a deposição.

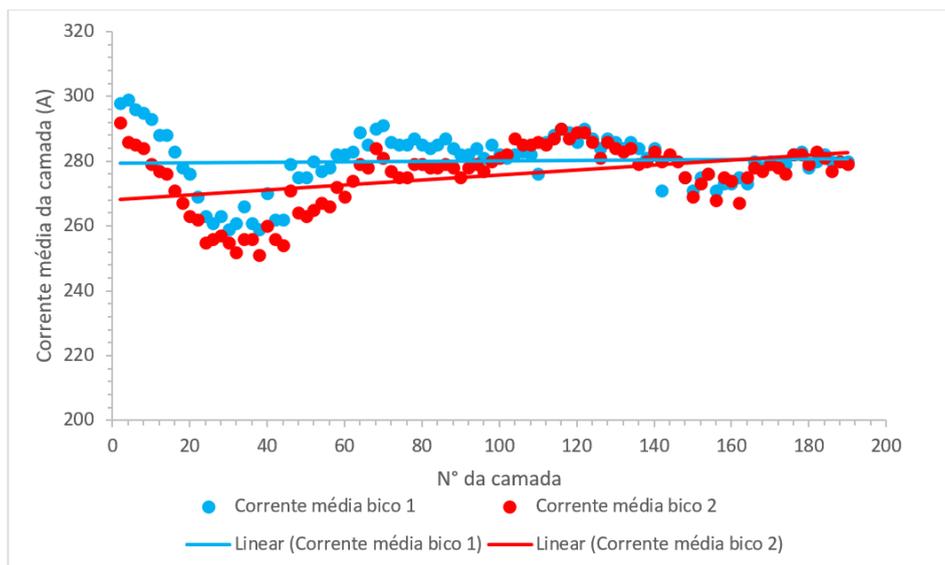


Figura 38. Corrente média ao longo da deposição ER70S-3/ ER110S-1

Já para a tensão, a média obtida para todas as camadas foi de 31,1 V para o bico 1, e 31,4 V para o bico 2. A Fig. 39 mostra as tensões médias adquiridas para cada camada durante a deposição.

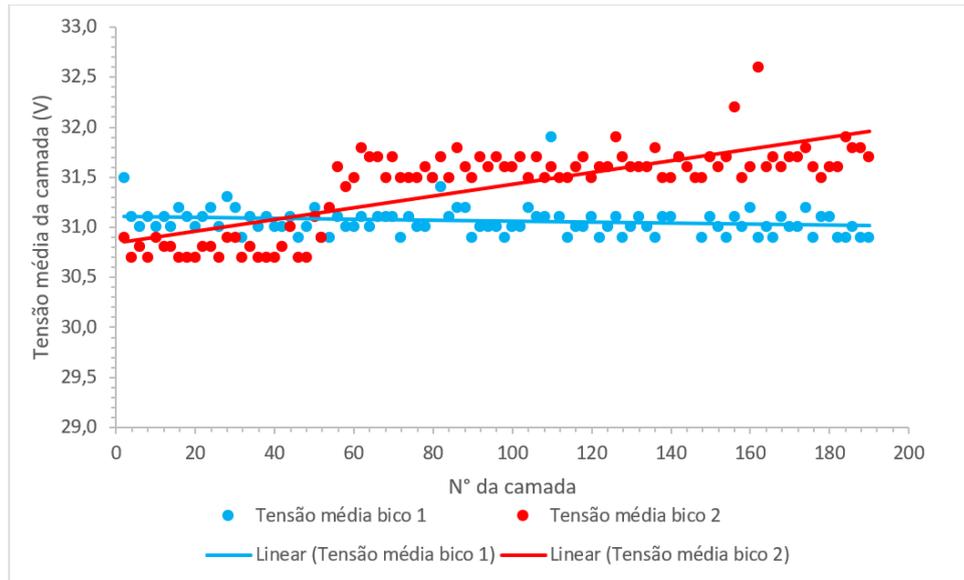


Figura 39. Tensão média ao longo da deposição ER70S-3/ER110S-1

A estratégia de tecimento, possivelmente foi responsável pelas pequenas diferenças entre os valores médios de corrente entre arame líder e seguidor. Nos gráficos, também é possível observar uma alteração no comportamento durante a deposição para os valores de sinais elétricos médios de cada camada a partir da camada 56, e isto pode ser atribuído a uma alteração realizada no valor da tensão que foi reajustado para 31,6 V durante a operação de deposição para o arame em ER110S-1 (bico 2), com o objetivo de compensar um histórico de corrente média menor que o outro arame em ER70S-3 para uma mesma tensão.

4.2.3 Sinais elétricos ER70S-3/ER70S-3

Para esta parede, os valores de corrente instantânea adquiridos na camada 37 são apresentados na Fig. 40 abaixo:

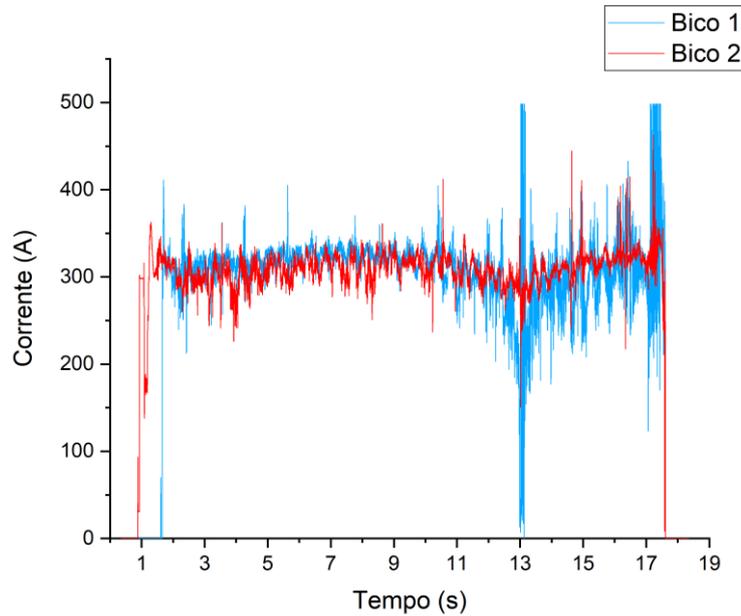


Figura 40. Corrente instantânea na camada 37 da deposição ER70S-3/ER70S-3

É possível perceber que a estabilização dos arcos se deu de maneira mais suave durante a abertura, se comparada com as duas deposições anteriores. Esta mudança pode ser atribuída à nova estratégia de abertura e fechamento dos arcos adotada.

Também foi observado que no tempo transcorrido entre a abertura dos arcos e treze segundos, as correntes se comportaram de maneira semelhante ao que foi observado na parede anterior, com predominância de transferência goticular e arcos mais estáveis. Isso já era esperado, uma vez que foi utilizado o mesmo tipo de tecimento (com diferenças apenas no passo e amplitude).

Imediatamente após os treze segundos, é possível notar uma mudança repentina nos sinais elétricos. Apesar disso, o arco do bico 2 se estabiliza mais facilmente, enquanto o bico 1 se mantém instável por mais tempo (e continua com mais oscilações que o bico 2) até o fechamento dos dois arcos. A alteração nos sinais elétricos aos 13 segundos coincide com a chegada do bico 1 à extremidade da peça, que culmina na mudança repentina do sentido de deposição juntamente com um acréscimo no eixo Z. O incremento em Z é suficiente para ajustar a DBCP do bico 2 (que retorna sobre a recente deposição dos dois arames), enquanto o bico 1 fica sujeito a uma DBCP maior, submetendo-se a iniciar o retorno sobre (apenas) a própria deposição que

acabou de efetuar (como é demonstrado na deposição 1 da Fig. 25).

O mesmo comportamento pode ser observado no gráfico de tensão instantânea da Fig. 41 a seguir.

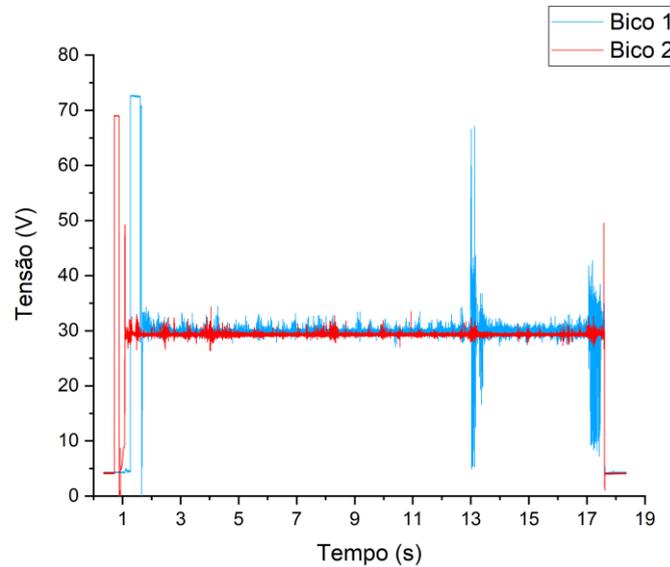


Figura 41. Tensão instantânea na camada 37 da deposição ER70S-3/ER70S-3

Para o bico 1, a média das correntes obtidas em todas as camadas foi de 297 A, enquanto a média das correntes do arame seguidor foi de 306 A. A Fig. 42 mostra as correntes médias adquiridas para cada camada durante a deposição.

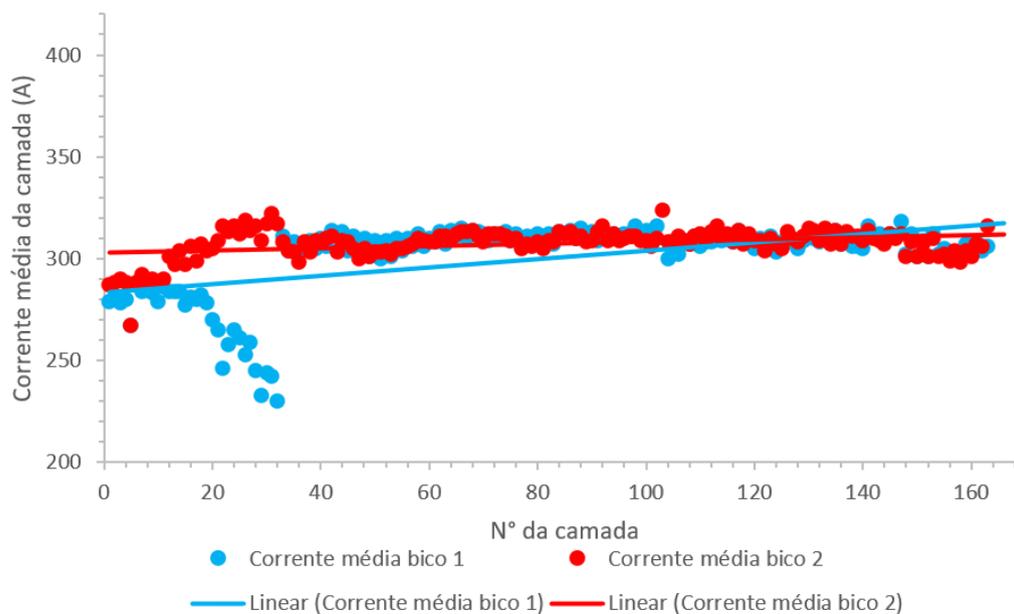


Figura 42. Corrente média ao longo da deposição ER70S-3/ER70S-3

Já para a tensão, a média obtida para todas as camadas foi de 29,8 V tanto para o bico 1 quanto para o bico 2. A Fig. 43 mostra as tensões médias adquiridas para cada camada durante a deposição.

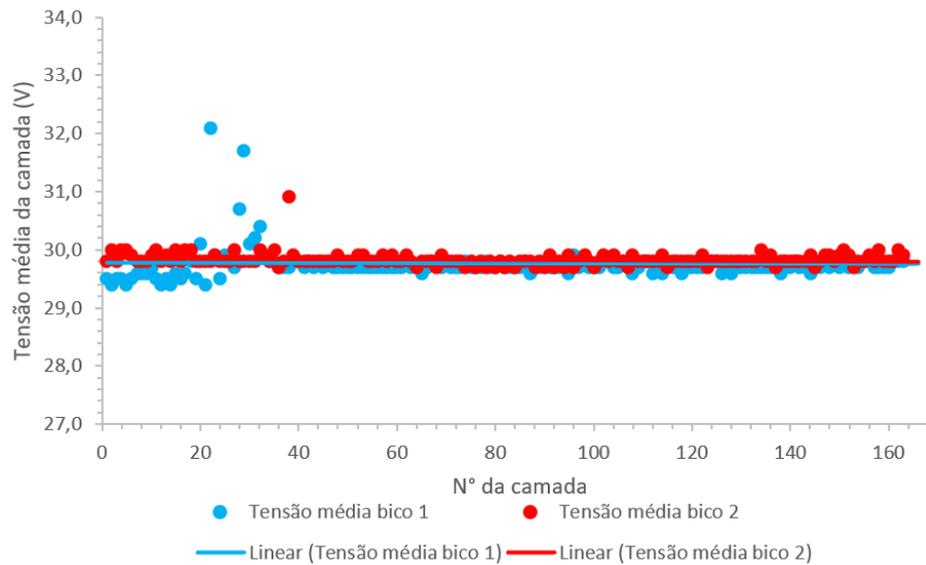


Figura 43. Tensão média ao longo da deposição ER70S-3/ER70S-3

5 CONCLUSÃO

A partir das deposições realizadas, observou-se muita oxidação nas pré-formas em seu aspecto bruto após a deposição, devido ao efeito do seu contato com a água na técnica de RAQI em altas temperaturas. Apesar disso, a estratégia de RAQI se mostrou satisfatória devido a sua característica de manter o nível da água sempre próximo da superfície de deposição. Observou-se ainda, uma maior troca térmica com a melhoria implementada que dispersou a entrada de água no sistema.

Além disso, os pontos de abertura e fechamento dos arcos elétricos se mostraram regiões críticas, sendo mais suscetíveis a escorrimentos e necessitando de estratégias para mitigar seus efeitos indesejados.

Quanto ao aspecto geométrico das formas, a estratégia de deposição da Parede 1 resultou em muitas falhas nas extremidades da peça, o que foi atribuído à abertura e fechamento dos arcos nestas regiões. Apesar do resultado falho nas extremidades, a ausência de tecimento garantiu um aspecto com menos ondulações na porção medial da Peça 1.

Comparando as duas paredes que foram depositadas com tecimento em relação a eficiência resultante, observou-se que a utilização do maior passo (Parede 2), resultou em maiores ondulações. Todavia, a estratégia de abertura e fechamento dos arcos adotada na construção da Parede 3 resultou em menos escorrimentos.

Em relação aos sinais elétricos, o processo de deposição sem tecimento resultou em um arco elétrico estável para o bico líder com transferência metálica predominantemente goticular, o que é desejável, já que é uma transferência mais estável e com menos respingos.

Enquanto o bico seguidor apresentou sinais elétricos característicos de uma transferência metálica por curto-circuito, o que é indesejável, por apresentar respingos que diminuem o aproveitamento da deposição, gerando mais escorrimento. Isso é atribuído ao fato de ele realizar deposição sobre a poça de fusão do outro arame.

Já no caso das deposições com tecimento, os sinais elétricos foram, semelhantes e pouco oscilatórios para os dois bicos, caracterizando uma transferência metálica predominantemente goticular para ambos, o que

novamente, é desejável pelos mesmo motivos apresentados anteriormente. A estratégia de abertura de arco elétrico da Parede 3 resultou nos sinais elétricos de abertura mais suaves observados.

Por fim, em relação ao rendimento de deposição processos, os escorrimientos nas extremidades da peça causados pela estratégia de deposição, juntamente com os respingos ocasionados pela transferência em curto-circuito do arame seguidor, renderam à parede em ER70S-3/ER80S-G a pior eficiência dentre as três, com 83,5 % de aproveitamento. A segunda parede em ER70S-3/ER110S-1 apresentou uma melhora significativa no rendimento de deposição, com um aproveitamento de 89,5 % atribuído principalmente à abertura dos arcos em pontos intermediários da peça, além da transferência goticular por parte dos dois arames. A última parede depositada apresentou o melhor rendimento de deposição obtida no estudo. Tendo como principal diferença operacional em relação à Parede 2 a estratégia adotada para abertura e fechamento dos arcos, a peça em ER70S-3/ER70S-3 alcançou um aproveitamento de 92,7 %, validando a eficiência da estratégia.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprimorar a metodologia do estudo realizado e ampliar os estudos à cerca da MADA por duplo arame, são sugeridas as seguintes possibilidades para trabalhos futuros:

- Tendo em vista que as diferentes estratégias de deposição foram aplicadas com diferentes combinações de materiais, seria importante avaliar os 3 métodos de deposição para uma mesma combinação de arames.
- Utilizar um braço robótico ou ferramenta acoplada à mesa de coordenadas que permita variar o ângulo de ataque da tocha de acordo com o sentido de deposição, uma vez que no estudo realizado o ângulo se mantém fixo durante todo o processo.
- Realizar mensuramento da variação de macro texturização superficial com uso de equipamento específico.
- Realizar deposições com diferentes velocidades de alimentação relativas entre os arames, buscando obter diferentes constituições de liga a partir de dois materiais.
- Realizar estudos metalográficos para avaliar as ligas formadas nas diferentes combinações.
- Realizar deposições em modo twin com combinações de aço carbono e aço inoxidável, estudando a viabilidade na constituição de peças que necessitam de resistência à corrosão em regiões específicas.

REFERÊNCIAS

BINTAO, W.; ZENGXI, P.; DONGHONG, D.; DOMINIC, C.; HUIJUN, L.; JING, X.; JOHN, N. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 35, 2018, Pages 127-139, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.

Europe Defence Agency. Additive manufacturing feasibility study & technology demonstration. 2018. Disponível em: <https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report_v6.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2022.

DING, D., PAN, Z., CUIURI, D. *et al.* Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int J Adv Manuf Technol* 81, 465–481 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>

DEBROY, T.; WEI, H. L.; ZUBACK, J. S.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J. W.; MILEWSKI, J. O.; BEESE, A. M.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, v. 92, p. 112–224, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172>>.

HERDERICK, E.D. *Progress in Additive Manufacturing*. *JOM* 67, 580–581 (2015).

LIRA, V. M. *Princípios dos processos de fabricação utilizando metais e polímeros / Valdemir Martins Lira. — São Paulo : Blucher, 2017. 240 p. : il. color.*

GIBSON, I.; STUCKER, B.; ROSEN, D. W. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, 2010.

KHOT, S. (2017). *A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing*.

KININAMI, C. S.; OLIVEIRA, M. F. de; DE CASTRO, W. B. *Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. 1 v. Blucher, 2013.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, janeiro de 2012.

Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM Int 2013; F2792-12a

VOLPATO, Neri. Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. Editora Blucher, 2017.

XIONG, J., ZHANG, G., HU, J. *et al.* Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis. J Intell Manuf 25, 157–163 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0682-1>

APÊNDICE A

Este apêndice reúne alguns dos principais pré-testes realizados após a montagem da bancada para viabilizar a construção das pré-formas, alvo central do estudo.

A.1. Teste de abertura de arco

Durante os testes de abertura e fechamento de arco, observou-se um atraso na abertura do arco elétrico. A programação gráfica solicitava o acionamento da fonte, e a abertura efetiva do arco elétrico só era realizada algum tempo depois, causando problemas geométricos na fabricação. Com os testes realizados, verificou-se uma abertura de arco em média 22 mm depois da referência solicitada. Para isso, uma constante de correção no valor desta diferença passou a ser adotada.

A seguir, é possível observar as bordas irregulares nos testes sem correção. Também é possível notar uma melhora gradual com correções insuficientes (8 mm e 16 mm), até atingir a constante de correção satisfatória que foi utilizada em todas as deposições, igual a 22 mm.

Sem Correção



Correção de 8 mm



Correção de 16 mm**Correção ótima de 22 mm**

A.2. Modo tandem sem tecimento (com velocidades de alimentação dos arames iguais)

Realizados os ajustes no atraso da abertura de arco elétrico, iniciou-se a observação do comportamento em função dos parâmetros com o método de soldagem Tandem sem tecimento. Para os testes a seguir, manteve-se uma velocidade de alimentação igual para os dois bicos, fixada em 8000 mm/min. A velocidade de avanço da tocha variou entre 1000 mm/min e 1200 mm/min, enquanto a tensão de alimentação das fontes ficou entre 30 V e 31 V.

Velocidade de Soldagem 1000 mm/min; Tensão de Alimentação 30 V**Velocidade de Soldagem 1000 mm/min; Tensão de Alimentação 31 V**

Velocidade de Soldagem 1500 mm/min; Tensão de Alimentação 31 V



Velocidade de Soldagem 2000mm/min; Tensão de Alimentação 31 V



Velocidade de Soldagem 1200 mm/min; Tensão de Alimentação 31 V



Velocidade de Soldagem 1200 mm/min; Tensão de Alimentação 30 V



A.3. Modo tandem sem tecimento (com velocidades de alimentação dos arames distintas)

Na segunda fase de testes, ainda no modo Tandem, foram utilizadas velocidades de alimentação diferentes entre os arames. A alimentação do Primeiro arame (líder) foi fixada em 14.000 mm/min enquanto a do segundo

arame (seguidor) foi mantida em 8000 mm/min. Nos testes a seguir, a velocidade de avanço da tocha variou entre 500 mm/min e 2000 mm/min, enquanto a tensão de alimentação das fontes foi de 31 V.

Velocidade de Soldagem 500 mm/min



Velocidade de Soldagem 1000 mm/min



Velocidade de Soldagem 1200 mm/min



Velocidade de Soldagem 1500 mm/min



Velocidade de Soldagem 2000 mm/min



A.4. Testes de estratégias de deposição oscilatória (tecimento)

Foram realizados testes com dois tipos de tecimento diferentes no modo tandem. Ambas as estratégias, foram detalhadas na metodologia deste estudo.

A.4.1. Tecimento Retangular

A seguir, são apresentados os resultados para diferentes parâmetros do tecimento retangular:

Amplitude 10 mm; Passo 16 mm; parada de 0,2 s no meio de cada passo



Amplitude 8 mm; Passo 16 mm; parada de 0,2 s no meio de cada passo



Amplitude 8 mm; Passo 16 mm; parada de 0,2 s no meio de cada passo



A.4.2. Tecimento Cruzado

A seguir, são apresentados os resultados para diferentes parâmetros do tecimento cruzado:

Amplitude 8 mm; passo 8 mm; sem paradas



Amplitude 8 mm Passo 8 mm; paradas de 0,2 s no fim de cada passo



A.5. Testes de tempo de espera entre camadas

Com o objetivo de otimizar o tempo de manufatura, o tempo de espera entre camadas deve ser mínimo, mas de maneira que a geometria da peça não seja prejudicada por excesso de calor. Os testes a seguir, foram realizados sem o sistema de resfriamento ativo. Com o acúmulo gradual de energia na peça, o tempo de espera aumentava consideravelmente, apontando a necessidade da utilização de um sistema de RAQI.

Sem tempo de espera entre camadas



30 s de espera entre camadas



50 s de espera entre camadas



A.6. TESTE DE VELOCIDADE NO TECIMENTO RETANGULAR

A utilização de parâmetros errados no tecimento, ocasiona falhas como camadas sem preenchimento homogêneo ou com escorrimento de material da poça. A seguir, são apresentados os resultados para alguns testes de velocidade no tecimento retangular, onde foram fixados os seguintes parâmetros: amplitude = 10mm; passo = 16mm; parada de 0,2 s a meio passo. As definições dos parâmetros encontram-se na seção.

Nos testes representados a seguir, temos que V_p = Velocidade no sentido do passo e V_a = Velocidade no sentido da amplitude.

$V_p = 1000 \text{ mm/mim}$; $V_a = 1000 \text{ mm/mim}$



$V_p = 1000 \text{ mm/mim}; V_a = 2500 \text{ mm/mim}$



$V_p = 1000 \text{ mm/mim}; V_a = 2500 \text{ mm/mim}$ (houve perda de referência)



$V_p = 1000 \text{ mm/mim}; V_a = 2500 \text{ mm/mim}$ (problema de resfriamento na última camada)

