

Bruno Henrique Sousa Silva

Avaliação e Aplicabilidade de  
Arame Ultrafino em Manufatura  
Aditiva por Deposição a Arco  
(MADA)



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Mecânica

2020

# Bruno Henrique Sousa Silva

## Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Uberlândia - MG

2020

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2020	<p>Silva, Bruno Henrique Sousa, 1992- Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) [recurso eletrônico] / Bruno Henrique Sousa Silva. – 2020</p> <p>Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet.</p> <p>Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.279">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.279</a> Inclui bibliografia</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p>CDU: 621</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## 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](http://www.posgrad.mecanica.ufu.br) - [secposmec@mecanica.ufu.br](mailto:secposmec@mecanica.ufu.br)

### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 565, COPEM				
Data:	31/03/2020	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:45
Matrícula do Discente:	11812EMC003				
Nome do Discente:	Bruno Henrique Sousa Silva				
Título do Trabalho:	Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco (MASA) para Fabricação de Componentes Metálicos de Simples, Média e Alta				

Reuniu-se na sala de reuniões do Bloco 5H, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores Ruham Pablo Reis (FEMEC/UFU); José Antonio Esmerio Mazzaferro (UFRGS) e Louriel Oliveira Vilarinho (FEMEC/UFU), orientador do candidato. Ressalta-se que o Prof. José Antonio Esmerio Mazzaferro e o Prof. Ruham Pablo Reis participaram da defesa por meio de teleconferência desde a cidade de Porto Alegre/RS e Uberlândia/MG, respectivamente, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, e o orientador e o aluno participaram *in loco*.

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

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

Aprovado.

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/03/2020, às 16:58, 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 **Ruham Pablo Reis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/03/2020, às 16:58, 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 31/03/2020, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1966411** e o código CRC **D309A823**.

## AGRADECIMENTOS

E mais uma etapa vai chegando ao fim. E nossa vida é cheia de ciclos, que são como ondas de oportunidades para evoluirmos. Termina um e começa outro com novas oportunidades de aprendizado. Agradeço a Deus pela dádiva da vida, por me permitir realizar tantos sonhos e chegar até aqui. Que ele permita que novos ciclos venham a seguir para que possa sempre evoluir.

Agradeço à minha família, minha mãe Maria, meu pai José, meu irmão Wellington, por todas as lições que me passaram até aqui. Vocês são fonte de inspiração, me espelhei em vocês para ser quem eu sou hoje, e me sinto privilegiado por ter uma família tão especial.

Agradeço também a todos meus tios e tias, primos e primas, que também são minha família e me ensinaram muita coisa nessa vida. Sei que sempre torceram e se orgulharam de mim. Agradeço também a meu primo e melhor amigo Tiago, que faleceu a poucos dias de minha apresentação do mestrado. Você foi muito importante durante toda minha caminhada, aprendi muito com você e sinto muita falta de conversar com você, como fazíamos todos os dias.

Agradeço a Franciele, minha companheira que esteve comigo durante toda essa jornada, com muito amor, carinho e apoio.

Ao meu orientador, o professor Louriel a quem admiro muito por seu profissionalismo, competência e dedicação. Cresci muito durante esse ciclo graças a essa grande pessoa a quem tenho muito a agradecer.

A todos os colegas que também tiveram fundamental importância para a conclusão desse trabalho. Me ensinaram, ajudaram, deram dicas preciosas que me fizeram chegar aos resultados encontrados.

A equipe do LAPROSOLDA fica um agradecimento especial, pois foram essenciais me ajudando a utilizar os equipamentos, emprestando alguns materiais e ensinando muita coisa também.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Manufatura Aditiva.....	3
2.2 Processo MIG/MAG.....	17
2.3 Arames Ultrafinos.....	24
CAPÍTULO III – METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS .....	26
3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados .....	26
3.2 Metodologia.....	30
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1 Deposição com arame de 0,6 mm, transferência goticular.....	36
4.2 Deposição com arame de 0,6 mm, transferência curto-circuito .....	42
4.3 Deposição com arame de 0,9 mm, transferência curto-circuito .....	52
4.4 Deposição com arame de 1,2 mm, transferência curto-circuito .....	59
4.5 Comparação entre as paredes fabricadas .....	65
4.6 Projeto da trajetória e fabricação de peça-padrão.....	72
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES .....	82
CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85
APÊNDICE A.....	90

## SIMBOLOGIA

<b>Aa:</b>	Área da seção transversal do arame
<b>Ae:</b>	Área Efetiva
<b>C:</b>	Comprimento total
<b>d:</b>	Diâmetro do arame
<b>d<sub>g</sub>:</b>	Diâmetro da gota
<b>DBCP:</b>	Distância bico de contato-peça
<b>ED:</b>	Eficiência de deposição
<b>IV<sub>cc</sub>:</b>	Índice de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito
<b>Le:</b>	Largura efetiva
<b>MADA:</b>	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
<b>MAG:</b>	Metal Active Gas
<b>MIG:</b>	Metal Inert Gas
<b>V<sub>a</sub>:</b>	Velocidade de alimentação
<b>V<sub>d</sub>:</b>	Velocidade de deslocamento da tocha
<b>VE:</b>	Volume Efetivo
<b>VT:</b>	Volume Total



Silva, B. H. S; *Avaliação e Aplicabilidade de Arame Ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)*, 2020. 102 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

## RESUMO

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é especialmente importante para a fabricação de peças em aços ao carbono. Adicionalmente, destaca-se a boa taxa de deposição que os processos a arco elétrico possuem. Por outro lado, o processamento a Laser confere melhor resolução dimensional. Assim, embora o processo Laser, utilizando pó, seja mais caro, ele proporciona uma superfície final com melhor qualidade e tolerância dimensional. Ainda com relação ao processamento a Laser, há a possibilidade do uso de arames, que seria um concorrente com o uso do processamento a arco, mas o Laser possui menor taxa de deposição. Dessa forma, surge o questionamento: qual seria a melhor resolução possível de ser atingida pelos processos a arco? Dessa forma, nesse trabalho utilizou-se arame ultrafino de 0,6 mm de diâmetro de aço carbono depositando material por MADA. O objetivo é demonstrar que o processo a arco com arames ultrafinos poderia atingir resoluções próximas às aquelas obtidas por processamento a Laser. A partir do estudo paramétrico do MADA do arame de 0,6 mm, foi possível depositar peças com pequenas espessuras, mas ainda não foi possível obter resoluções da ordem de milímetros. O principal limitante foi o efeito de *humping* somado ao uso de equipamento convencional de soldagem, que limita o processo em termos de alimentabilidade do arame. O arame de 0,9 mm apresentou melhor resultado que o de 0,6 mm, tanto em resolução quanto em eficiência de deposição.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva, MADA, Arame Ultrafino, Aço Carbono, GMAW, Deposição com Energia Direcionada, Gerenciamento Térmico.

Silva, B. H. S; *Evaluation and Applicability of Ultrafine Wire in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*, 2020. 102 p. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia.

## ABSTRACT

Arc-deposition Additive Manufacturing is especially important for the manufacture of carbon steel parts. Additionally, electric-arc processes provide good deposition rate. On the other hand, Laser processing delivers better dimensional resolution. Thus, while the Laser process using powder is more expensive, it provides a better-quality final surface and dimensional tolerance. Still with regard to Laser processing, there is the possibility of using wires, which would be a competitor against the use of arc processing, but the laser has lower deposition rate. Thus, a question arises: what would be the best possible resolution to be achieved by arc processes? Thus, in this work was used ultra-thin wire of 0.6 mm diameter carbon steel depositing material by Arc-deposition Additive Manufacturing. The objective is to demonstrate that the ultrafine wire arc process could reach resolutions close to those obtained by laser processing. From the parametric study of the 0.6 mm wire, it was possible to deposit parts with small thickness, but it was not possible to obtain resolutions of the order of millimeters. The main limiting factor was the humping effect added to the use of conventional welding equipment, which limits the process in terms of wire feedability. The 0.9 mm wire showed better results than the 0.6 mm one, both in terms of resolution and deposition efficiency.

**Keywords:** Additive Manufacturing, WAAM, Ultrathin Wire, Carbon Steel, GMAW, Directed Energy Deposition, Thermal Management.

# CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

A maneira de fabricar produtos vem mudando ao longo dos últimos anos. A manufatura subtrativa tem sido uma das maneiras mais populares de fabricação. Um exemplo é a usinagem, que se baseia na remoção de material até que o formato desejado seja alcançado. Isso faz com que um gasto elevado de material ocorra. Visando manter a qualidade e reduzir custo e tempo de fabricação, os processos que se baseiam na adição de material vem ganhando espaço nos últimos anos. Os processos de Manufatura Aditiva vêm sendo usados desde os anos 1980 e se desenvolvem fortemente desde então.

A ISO/ASTM 52900 (2015) define a Manufatura Aditiva (MA) como um processo de união de materiais para a fabricação de peças a partir de um modelo 3D, que geralmente utiliza uma abordagem de camada sobre camada. Assim, a Manufatura Aditiva tem seu princípio baseado no fato de que todo objeto pode ser decomposto em diversas camadas e reconstruído com as mesmas, independentemente de sua complexidade geométrica. Inicialmente a Manufatura Aditiva era utilizada para a criação de protótipos, a partir da técnica conhecida como Prototipagem Rápida (*Rapid Prototype*). Entretanto, suas aplicações se expandiram e, atualmente na indústria, a Manufatura Aditiva não se limita mais a modelos simplificados, mas sim a produtos finais de grande complexidade, expandindo seus horizontes. Pode ser usado para fabricação com diversos tipos de materiais, como polímeros, cerâmicos e metálicos.

A principal vantagem da MA é a possibilidade de fabricar peças de geometrias complexas, que seriam difíceis de se produzir por outras técnicas, economizando-se, assim, material (DEBROY, 2018). Dessa forma, não é necessária a utilização de matrizes ou moldes, tal como em fundição ou metalurgia do pó e nem de ferramentas de alto custo ou número elevado de etapas do processamento, tal como em usinagem.

A Manufatura Aditiva pode ser utilizada em diferentes setores industriais e aplicações, tais como na indústria aeronáutica na produção de bicos injetores de combustíveis, na área da saúde na produção de implantes médicos e dentários, na indústria automobilística na fabricação de pistões e discos de freio (MILEWSKI, 2017).

Diferentes processos e técnicas podem ser utilizados na MA. Dentre eles, chama-se a atenção o uso de processos convencionalmente utilizados para a soldagem a arco, tais como MIG/MAG e TIG, já que conseguem fundir e depositar diferentes materiais

metálicos com um relativo baixo custo. Dessa forma, uma das possíveis abordagens para a deposição de materiais metálicos seria o uso do processo MIG/MAG, que utiliza diferentes diâmetros de arame, dando origem a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Essa característica permite ponderar que diferentes espessuras de peças, com diferentes características geométricas (precisão, resolução, rugosidade, etc) poderiam ser obtidas ao se utilizar diferentes diâmetros de arame, especialmente em aços ao carbono, que contam com maior diversidade de opções. Outro processo que se destaca em MA é o processo de leito em pó que geralmente usa laser como fonte de calor. A principal vantagem em relação aos processos a arco é a resolução dimensional alcançada, porém apresenta baixa taxa de deposição e alto custo.

Dessa maneira busca-se explorar os limites da MADA. Assim como hipótese principal do trabalho tem-se os seguintes questionamentos: seria possível encontrar bons resultados em deposições com arames ultrafinos, como o de 0,6 mm de diâmetro? Qual seria a melhor resolução encontrada na fabricação de peças utilizando tal arame? Tal processo com o arame ultrafino seria capaz de substituir os processos a laser, igualando ou até superando a principal vantagem deste, a resolução dimensional?

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade de arames finos e ultrafinos na fabricação de peças em aço ao carbono por meio da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, utilizando o processo MAG convencional para adição de material. Uma comparação entre os arames de 0,6; 0,9 e 1,2 mm de diâmetro será realizada, para analisar se o uso do arame ultrafino é viável.

## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manufatura Aditiva

Manufatura Aditiva (MA ou *Additive Manufacturing* – AM) é um processo de união de materiais, utilizado para fabricar peças, a partir de dados de um modelo tridimensional, normalmente por meio de uma abordagem camada sobre camada (ISO/ASTM 52900, 2015). Diferentemente de outros processos, como na usinagem onde há a remoção de material para se chegar à geometria desejada, na Manufatura Aditiva ocorre a adição de material, depositando camada a camada até se chegar à forma final.

A MA se desenvolveu bastante desde a introdução na indústria em 1986 (ZHANG, 2018). Isso ocorreu devido suas vantagens, já que se torna atrativa quando o custo do material é alto, ou quando a peça tem uma geometria complexa e quando muito material precisa ser removido. Outra vantagem a ser destacada refere-se ao tempo de comercialização do produto final, que pode ser diminuído significativamente devido à redução ou até eliminação de etapas, como usinagem e montagem das peças (TOWNSEND, 2016), assim como a eliminação de moldes (ZHANG, 2018). Há também uma projeção de redução nos impactos ambientais, já que existe uma redução no consumo de energia e na emissão de carbono (FRAZIER, 2014). Todas essas vantagens trazem especial atenção à MA. Segundo Huang (2013), uma publicação da revista *Economist* traz a MA como a tecnologia de produção do futuro, chamando-a de terceira Revolução Industrial, por ser altamente provável que a MA traga impactos significativos em um futuro próximo. Townsend (2016) diz que apesar de a MA certamente ter vantagens significativas em relação aos métodos de fabricação convencionais, talvez seja muito cedo para dizer que a MA seja a terceira Revolução Industrial. Uma desvantagem do processo é a limitação do controle dimensional da peça, sendo necessário um tratamento superficial subsequente (TOWNSEND, 2016).

Em 1984, Chuck Hull, conhecido como o inventor da impressão 3D e fundador da *3D System Corporation*, usou a estereolitografia usando laser ultravioleta para transformar polímeros em formas 3D, com uma tecnologia que usava comandos de

máquinas (MILEWSKI, 2017). O desenvolvimento de processos de MA para metais se deu logo em seguida nos anos 80 e 90 em laboratórios de universidades e de P&D em indústrias (MILEWSKI, 2017). Essa evolução tem sido demonstrada e adotada pelas indústrias atualmente (DEBROY, 2018). De acordo com o material utilizado a MA inclui principalmente as quatro categorias a seguir: materiais poliméricos, compósitos, cerâmicos e metálicos (ZHANG, 2018).

As aplicações para a MA são várias. Em implantes médicos, na indústria aeroespacial (DEBROY, 2018), indústria automotiva (pistões), artes (anéis e esculturas), personalizações, como criar um quadro de bicicleta com formato diferente, entre outras (MILEWSKI, 2017). Algumas aplicações são de grande risco, o que exige que o processo de fabricação seja livre de falhas, o que nos mostra que a MA já teve uma grande evolução.

Geralmente a poça de fusão é menor em MA que em soldagem (DEBROY, 2018). Isso ocorre devido ao fato que apenas uma pequena parcela da camada anterior deve ser fundida, para que ocorra uma coalescência entre as camadas. Uma poça de fusão grande causaria problemas na camada anterior.

Os processos de Manufatura Aditiva se enquadram em sete categorias segundo a ASTM F2792: *binder jetting*, *directed energy deposition* (deposição com energia direcionada), *material extrusion*, *material jetting*, *powder bed fusion* (leito em pó), *sheet lamination* e *vat photopolymerization*. A Tabela 2.1 resume os processos de manufatura aditiva em função dos materiais possíveis de processar. Os processos mais usados para a deposição de metais são *directed energy deposition (DED)* e *powder bed fusion (PBF)*. Enquanto no primeiro a energia é utilizada para fundir o material (na forma de arame ou pó) a medida em que ele é depositado, no segundo processo o material (pó) é depositado e posteriormente a fonte de calor funde seletivamente as partículas depositadas. O processo *PBF* tem como vantagem principal em relação a *DED* a precisão dimensional, não sendo necessário, na maioria das vezes, tratamento superficial subsequente, mas perde no tempo de produção e no volume da peça a ser fabricada (DEBROY, 2018).

Tabela 2.1 - Processos de Manufatura Aditiva (ALBERTI et al., 2014)

<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Método de MA</b>	<b>Material</b>
Fotopolimerização	Um polímero fotocurável é curado seletivamente usando uma fonte de luz	Laser	Polímero fotocurável
Modelagem por extrusão	Material é depositado de forma seletiva através de um cabeçote extrusor	Aquecimento por uma resistência elétrica	Polímeros, cerâmicas e metais
Fusão de pós pré-depositados	Um feixe eletrônico funde seletivamente regiões de um leito com pó pré-depositado	Laser e feixe de elétrons	Polímeros, cerâmicas e metais
Cladding 3D	O material de adição na forma de pós é injetado diretamente no feixe/poça	Laser e PTA	Metais e cerâmicas
Arco elétrico	Fonte de energia é um arco elétrico que funde o material de adição (pó/arame)	PTA, Plasma, arame, TIG, MIG/MAG	Metais

Os sistemas *DED* tem como características a habilidade de construir peças de grandes volumes ( $>1000 \text{ mm}^3$ ), possibilidade de usar taxas de deposição relativamente altas e eficiência energética. O material é depositado diretamente na poça de fusão, podendo ser depositado em componentes existentes (ASTM F3187, 2016). Um sistema *DED* é composto por 4 subcomponentes principais: uma fonte de calor, um posicionador para manipular a fonte de calor ou o substrato ou ambos, um mecanismo de alimentação do material, e um sistema de controle computacional (ASTM F3187, 2016). Um esquema de um sistema *DED* é mostrado na Figura 2.1, com uma fonte, um posicionador (robô), um alimentador e um sistema de controle. O material é depositado camada por camada sobre um substrato.

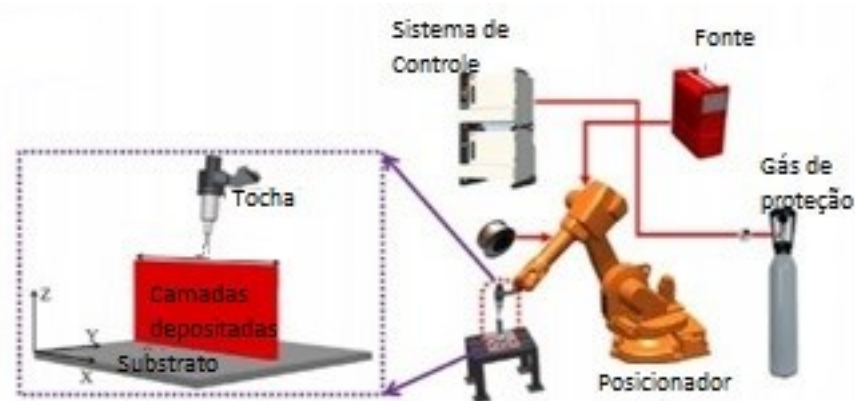


Figura 2.1 - Esquema de um Sistema DED (GE, 2018)

Os sistemas DED compreendem várias categorias de máquinas que utilizam feixe de elétrons (Electron Beam, EB), laser (Laser Beam, LB) e arco elétrico (Arc System) como fontes de energia (ASTM F3187, 2016). São usados arames ou pós, que normalmente são depositados em uma atmosfera inerte (sistemas a arco e a laser) ou a vácuo (sistemas a feixe de elétrons). Outros métodos utilizando diferentes fontes, matérias-primas e atmosferas também se enquadram nessa categoria (ASTM F3187, 2016). A gama de metais já aplicada pelas técnicas de manufatura aditiva inclui ligas de titânio, alumínio, níquel, cobalto, aços (inoxidável, ferramentas e baixa liga) e metais preciosos (ALBERTI et al., 2014).

Em geral, os processos de deposição a laser são famosos por apresentarem alta precisão, porém têm baixa eficiência energética. Já os processos de feixe de elétrons apresentam uma eficiência energética um pouco maior, porém o ambiente de vácuo exigido no processo limita sua aplicação (ASTM F3187, 2016). Os processos a arco apresentam uma boa taxa de deposição, mas não têm boa precisão.

Cada uma dessas três rotas possui características e nichos específicos e não excludentes. Conforme mostrado na Tabela 2.2, a rota por deposição a arco apresenta um conjunto de características que se sobressai frente às outras abordagens para se realizar a Manufatura Aditiva, sendo, portanto, objeto desta pesquisa.



Tabela 2.2 - Notas comparativas (quanto maior, melhor) entre as técnicas de deposição direta de energia (valores atribuídos pela ASTM F3187, 2016)

Processo	Volume	Resolução	Deposição	Acoplamento	Contaminação	Final
Laser	3	2	2	1	2	10
Feixe de elétrons	4	1	3	4	1	13
Arco	3	1	3	4	3	14

- *Volume: Volume da peça a ser fabricada e que reflete a quantidade de material a ser depositado*
- *Resolução: Menor dimensão possível de ser controlada e que reflete a tolerância dimensional.*
- *Deposição: Capacidade mássica possível de ser depositada e que reflete a produção do processo.*
- *Acoplamento: Eficiência do processo para transferir energia da fonte para o substrato.*
- *Contaminação: Robustez do processo contra contaminação, tais como sujeira e gases (atmosfera).*
- *Final: Somatória simples das notas obtidas, destacando-se que quanto maior, melhor é a nota.*

Dessa forma, a união dessas características confere à rota de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) a propriedade de estar mais próxima à fabricação de peças tradicionalmente produzidas por fundição e forjamento, p.ex., e será aquela utilizada neste trabalho. Destaca-se que a MADA é especialmente importante para o uso de aços ao carbono, uma vez que o emprego de pós desse material é de extrema dificuldade em função da grande reatividade com o oxigênio da atmosfera. Certamente, o aço carbono é o material mais tecnologicamente utilizado (DAYTON, 2018) e, portanto, reforça a importância do trabalho.

Por outro lado, conforme mostrado na Tabela 2.2, o processamento a Laser confere melhor resolução dimensional. DebRoy (2018) afirma que o processo Laser, utilizando pó, é mais caro, porém entrega uma superfície final com melhor qualidade, enquanto os processos a arco, usando arames, necessitam de usinagem. Entretanto, de nada adianta ter um processo de alta resolução se não consegue trabalhar com pós de aço ao carbono, embora haja também o processamento a Laser com uso de arames (LMD), que seria um concorrente com o uso do processamento a arco, que possui maior taxa de deposição, mas pior resolução dimensional.

Na Figura 2.2 é apresentado um esquema com os processos em MA, de acordo com a fonte de calor e a matéria-prima. Entre esses, destacam-se os processos a arco, que usam os processos TIG, MIG/MAG ou Plasma, usando arame como material a ser depositado. Surge, então, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco - MADA (do inglês, *Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM*). A MADA se tornou uma alternativa

promissora à manufatura subtrativa na fabricação de grandes componentes de geometria complexa e no uso de materiais mais caros. Os processos de MADA geralmente envolvem altas tensões residuais e distorções devido ao alto calor fornecido e as altas taxas de deposição. A influência de algumas condições de processo, como taxa de alimentação, velocidade de soldagem, padrões de deposição e sequência de deposição, no ciclo térmico e nas tensões residuais ainda precisam ser melhores compreendidos. Além disso, a baixa precisão e o baixo acabamento superficial são desvantagens do processo, limitando sua utilização (DING, 2015b).

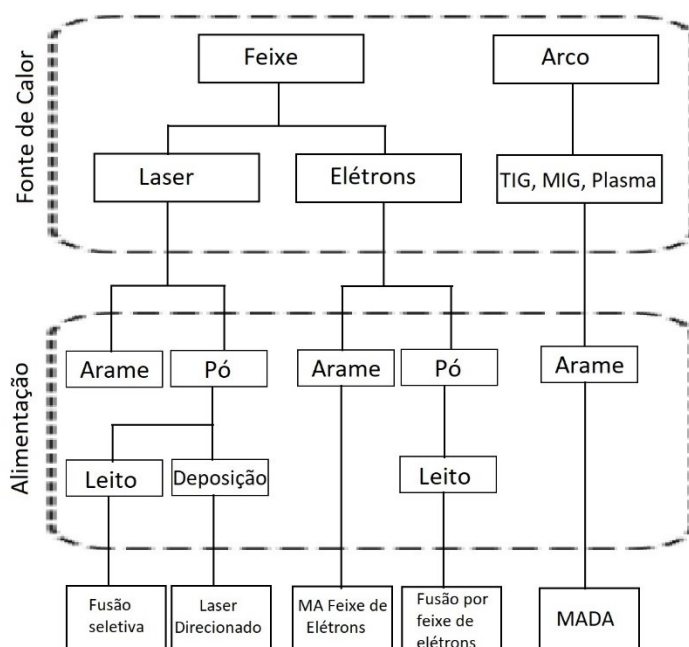


Figura 2.2 - Esquema com os processos em Manufatura Aditiva classificados de acordo com a fonte de calor e alimentação (MARTINA; WILLIAMS, 2015)

A seleção do processo a ser utilizado depende fortemente da geometria a ser fabricada. Enquanto que para peças pequenas, com design complexo e baixas taxas de deposição, são usados os processos a laser e de feixe de elétrons, para o processamento de componentes de maiores dimensões, com maiores taxas de deposição, são utilizados os processos a arco (ALBERTI et al., 2014). A Figura 2.3 apresenta a largura de cordões sobrepostos para a construção de uma parede fina para diferentes processos. As paredes mais finas são conseguidas nos processos a laser e plasma, com larguras que chegam a ser menores que 1 mm, enquanto que para os processos a arco com MIG, as paredes apresentam larguras a partir de 4 mm (ALBERTI et al., 2014).

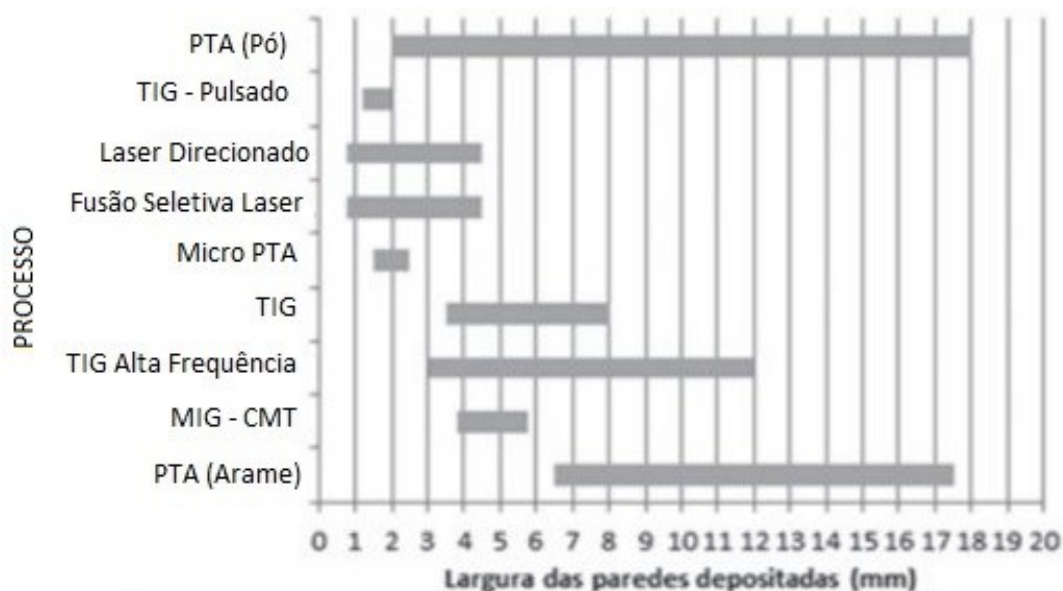


Figura 2.3 - Largura de cordões sobrepostos depositados por diferentes processos (ALBERTI et al., 2014)

Em MA alguns processos híbridos já são utilizados, como o uso de MIG/MAG combinado com TIG (YANG, 2016), e MIG/MAG combinado com laser (ZHANG, 2018). Tais processos visam melhorar a qualidade do depósito, oferecendo menos calor à peça, e aumentando a qualidade geométrica da forma construída. Tanto Yang (2016) quanto Zhang (2018) mostram que o processo MIG/MAG combinado com TIG e com laser, respectivamente, são viáveis, e que em certos níveis de corrente em TIG e de potência em laser, a eficiência da deposição é aumentada em até 15% com TIG e 16% com laser, conseguindo uma parede com menor largura e mais regular.

Uma das maiores vantagens da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, a elevada taxa de deposição, é acompanhada por elevado aporte térmico, que pode ocasionar acúmulo de calor, causando problemas na deposição da peça (SILVA, 2018). À medida que as camadas vão sendo depositadas, o acúmulo de calor passa a ser mais significativo (YANG, 2017). E esse acúmulo de calor apresenta vários impactos em MADA, como o aumento na largura do cordão, alterações geométricas e oxidação excessiva, além de alterações metalúrgicas (WU, 2017).

Com o objetivo de suavizar os efeitos do acúmulo de calor, algumas abordagens tem sido propostas. Uma delas é a definição de um tempo de espera até que a temperatura de interpasse seja atingida, com a camada sendo resfriado naturalmente (LEI, et al., 2018; YANG, et al., 2017). A principal desvantagem é que o resfriamento natural acontece muito lentamente, e o tempo de interpasse acaba sendo muito elevado, o que torna

inviável o uso dessa técnica para aplicações de larga escala, já que acaba comprometendo a produtividade. Outra abordagem utiliza um fluxo direcionado de  $N_2+5\%H_2$  durante a deposição (HENCKELL, 2017). Dessa forma, o fluxo pode perturbar o arco. Uma outra forma seria a utilização da técnica denominada Resfriamento Ativo por Quase-Imersão - RAQI (SILVA, 2018). Nessa abordagem o material é depositado num substrato no interior de uma cuba com água, onde o nível de água sobe a medida em que as camadas são depositadas. Um esquema representando o processo é apresentado na Figura 2.4.

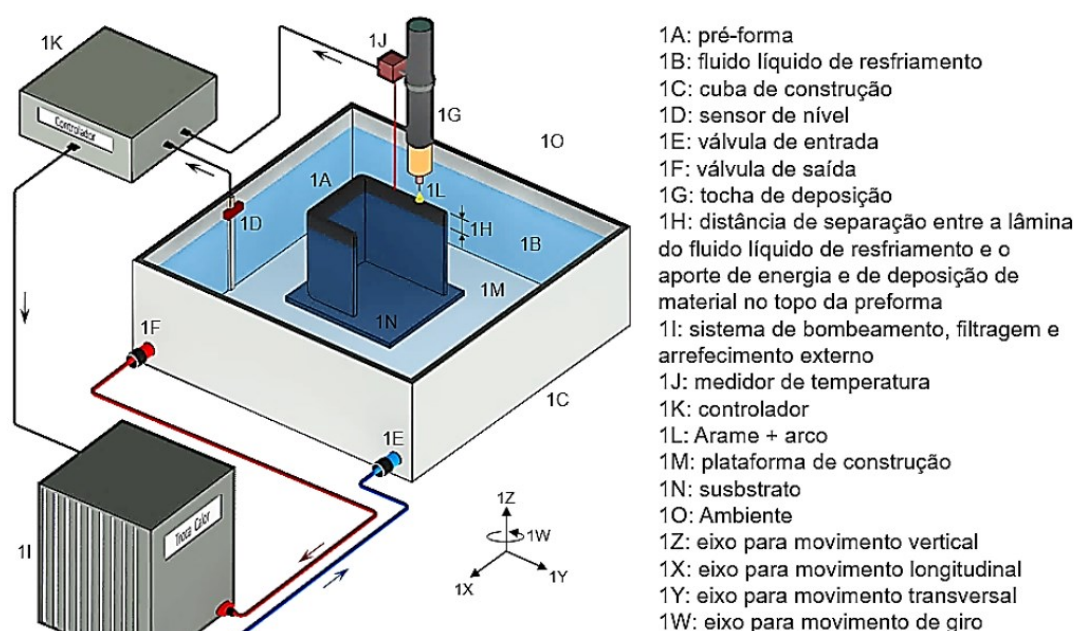


Figura 2.4 - Montagem esquemática para funcionamento do RAQI (SILVA, 2018)

O RAQI é uma técnica de resfriamento ativo que se baseia na quase imersão da peça em um líquido de resfriamento durante a sua construção. O fluido líquido utilizado normalmente é a água, e a distância entre a lâmina d'água, e o topo da peça deve ser controlado, já que uma distância muito pequena pode causar vaporização excessiva da água, o que pode ocasionar problemas no arco elétrico. Como o nível da água sobe a medida em que as camadas são depositadas, a maior parte da peça fica imersa, atingindo equilíbrio térmico com a água, sendo que a parte restante resfria rapidamente por condução. Silva (2019) mostra que, para a deposição de alumínio, distâncias entre a lâmina d'água e o topo da camada a ser depositada menores que 10 mm causam problemas de porosidades, que tendem a crescer, enquanto que em distâncias maiores não há variação significativa nas porosidades.

Silva (2018) faz uma comparação entre as deposições utilizando RAQI, resfriamento natural, e um resfriamento passivo, onde um nível de água é ajustado na cuba e mantido fixo ao longo de toda a deposição. Ele mostra que a peça depositada com RAQI apresenta menor largura e maior altura que as demais, enquanto a que usou resfriamento natural foi a mais baixa e mais larga. Além disso a peça depositada por RAQI foi a que apresentou menor variação dimensional ao longo das camadas, o que indica que menos usinagem é requerida. As peças depositadas com RAQI foram as que apresentaram menor diferença entre os deslocamentos total horizontal e vertical nos ensaios de tração, o que indica menor anisotropia.

Além do acúmulo de calor, outros problemas são comuns na Manufatura Aditiva. Os grandes problemas em MA indicados por DebRoy (2018) são:

- Perdas de elementos de liga: a vaporização de elementos de liga ocorre na poça de fusão, quando a temperatura está elevada. Pode ser um grande problema, já que altera composição e propriedades da liga depositada;
- Porosidade e falta de fusão: causados por contaminações e aprisionamento de gases, além de penetração inadequada. Devem ser minimizados ou eliminados;
- Rugosidade superficial: depende do processo utilizado, dos materiais usados e de parâmetros selecionados. Aplicações de ponta requerem baixas rugosidades. Para processos a laser normalmente não é realizado um pós-processamento na peça depositada, por isso requer baixa rugosidade. Enquanto que nos processos a arco geralmente o pós-processamento é feito para dar um melhor acabamento a superfície;
- Trincas e delaminação: são três tipos principais em Manufatura Aditiva:
  - Trincas de solidificação: ocorre ao longo do contorno de grão. A temperatura da camada anterior é menor do que a que está sendo depositada. Logo a contração da camada que está sendo depositada é maior do que a camada de baixo, gerando tensões de tração que podem gerar trincas;
  - Trincas de liquação: é observada na zona parcialmente fundida (entre zona fundida e zona termicamente afetada), que sofre forças de tração podendo causar trincas;
  - Delaminação: separação de duas camadas consecutivas, o que é causado por tensões residuais.

Se uma peça for construída livre de defeitos, como porosidades ou defeitos superficiais, uma falha poderá ocorrer de maneira catastrófica, por fadiga, após um certo número de ciclos. Entretanto, a existência de um concentrador de tensão causa uma diminuição drástica no número de ciclos até a falha (DEBROY, 2018). DebRoy (2018) e Frazier (2014) mostram que a rugosidade superficial é um dos maiores problemas em MA, já que esta fornece concentradores de tensão onde ocorrerá a nucleação da trinca. Sendo assim, peças com melhores acabamentos e que passaram por processos de usinagem e polimento, por exemplo, apresentam melhores resultados em fadiga do que peças com rugosidades maiores.

Um defeito que ocorre com frequência nas operações de soldagem é o *humping*, que são corcundas que se formam ao longo do cordão de solda. O *humping* pode ser descrito como uma ondulação periódica do cordão de solda, com uma sequência típica que consiste de uma corcunda e um vale (NGUYEN, 2005). O aspecto do *humping* é mostrado na Figura 2.5. Este defeito limita a melhoria da produtividade da soldagem e deteriora a homogeneidade das propriedades do cordão de solda (MENG, 2016).

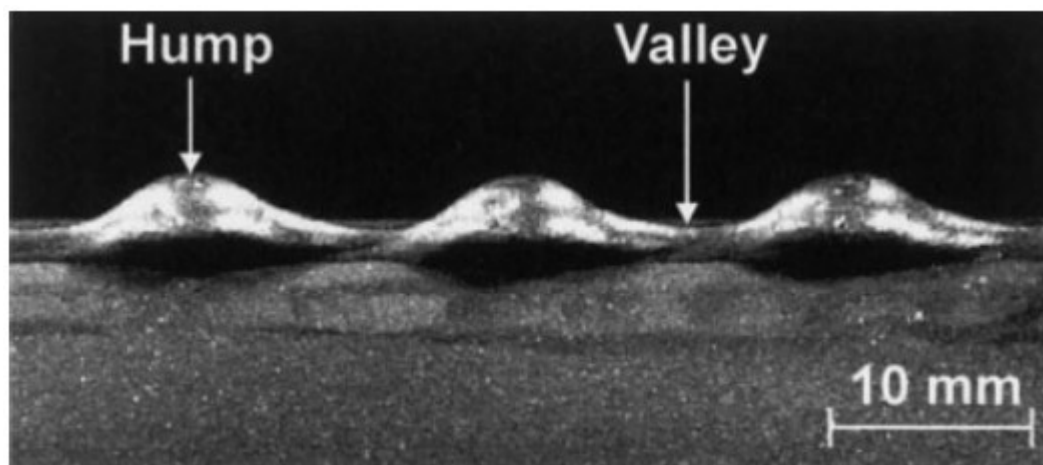


Figura 2.5 - Cordão de solda com *humping* (NGUYEN, 2005).

Badstreet (1968), foi o primeiro a reportar a formação de *humping* em um aço carbono usando Gas Metal Arc (GMA) com modo de transferência goticular. Mostrou que o *humping* é causado principalmente por elevadas velocidades de soldagem. Além disso sugeriu que outros fatores influenciam na ocorrência desse fenômeno. São eles a tensão, a condição da superfície a ser soldada, composição do metal de base e ângulo do eletrodo em relação a peça. Mostrou também que a utilização de algumas misturas, como Ar-CO<sub>2</sub> e Ar-O<sub>2</sub> aumentam significativamente a velocidade de soldagem que pode ser utilizada até a ocorrência do *humping*.

Algumas análises podem ser feitas para calcular o aproveitamento de material em MADA. Uma delas é a chamada razão *Buy-to-Fly* (BTF), que é definida como a razão entre o volume ou massa da peça inicial de trabalho e da peça acabada (MARTINA, 2015) aplicada a indústria aeronáutica, ou de forma genérica *Buy-to-Apply*. A BTF depende de quão próximo o formato da peça depositada (no caso da manufatura aditiva) é do formato da peça acabada, após a usinagem. Ou seja, quanto mais o BTF for próximo a 1, mais material está sendo aproveitado. A usinagem trabalha com remoção de material de uma forma inicial, então, normalmente muito material é desperdiçado, ao contrário da manufatura aditiva, em que a forma depositada já é muito próxima da forma final, necessitando apenas de um acabamento superficial. Martina (2015) mostra em seu estudo valores de BTF para MADA de 1,5 a 3, enquanto para usinagem esses valores estão entre 6 e 50, mostrando que as economias de material em MADA estão entre 7 e 69% em relação a usinagem.

Outra forma para analisar o aproveitamento em MADA seria calcular a eficiência da deposição. Os cálculos são apresentados por Yang (2016) e Zhang (2018). Eles consistem em calcular o volume total depositado, e o volume efetivo, após a usinagem. As equações 1 a 3 apresentam os cálculos a serem utilizados.

$$ED = \frac{VE}{VT} * 100 \quad (2.1)$$

$$VE = Ae * Le \quad (2.2)$$

$$VT = C * Va * \frac{Aa * n^{\circ} \text{ de camadas}}{Vd} \quad (2.3)$$

Onde:

ED = Eficiência de Deposição;

VE = Volume Efetivo;

VT = Volume Total;

Ae = Área Efetiva;

Le = Largura Efetiva;

C = Comprimento total de cada camada;

Va = Velocidade de alimentação do arame;

Aa = Área da seção do arame;

Vd = Velocidade de deslocamento da tocha.

O volume efetivo é uma estimativa que mostra o maior volume que pode ser obtido a partir do volume total. A Figura 2.6 mostra um esquema de como são estimadas as dimensões efetivas de uma parede. A altura e comprimento efetivo são calculados a partir do retângulo de maior área que pode ser inscrito na parede depositada. Para cálculo da largura efetiva o mesmo procedimento é realizado. A razão entre o volume efetivo e volume total indica a porcentagem de material depositado que pode ser aproveitado.

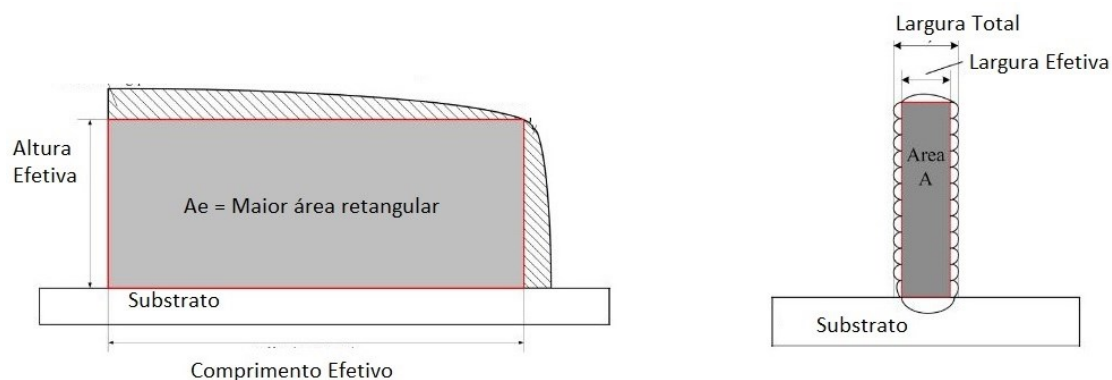


Figura 2.6 - Esquema que demonstra o cálculo da área efetiva e largura efetiva. Adaptado de Yang (2016)

Ding (2015a) apresenta em seu estudo uma trajetória que se mostra interessante para ser usada como testes em manufatura aditiva de paredes finas, por possuir cantos, curvas e cruzamentos, o que simula a construção de peças na vida real. A Figura 2.7 apresenta a trajetória depositada pelo autor.



Figura 2.7 - Trajetória depositada por Ding (2015a)



O projeto da trajetória de execução da deposição é de extrema importância em MA. Uma peça depositada por duas trajetórias diferentes pode resultar em peças com qualidades extremamente distintas. De acordo com Hu (2018), a geometria do cordão de solda geralmente é mais irregular nas porções inicial e final do que na região do meio, o que também é válido para Manufatura Aditiva. Em seu trabalho, o autor indica duas possíveis formas de deposição para trajetórias abertas, que começam e terminam em diferentes pontos. A primeira forma é a “zig”, em que o material é depositado em todas as camadas sempre no mesmo sentido. A segunda forma é a “zig zag”, em que o material é depositado sempre alternando o sentido ao mudar para a camada seguinte. A Figura 2.8 apresenta um esquema das formas “zig” e “zig zag” de deposições. A Figura 2.8a apresenta uma parede depositada pelo método “zig”, sendo que existe um grande erro acumulado após as 16 camadas. Segundo o autor, o metal fundido na poça de fusão tende a se deslocar para trás, no sentido oposto ao da deposição, fazendo com que haja um acúmulo de material na porção inicial da deposição e uma geometria mais inclinada no ponto final onde o arco é desligado. Sendo assim a geometria do cordão, que é volumoso no início e mais inclinado no final, provocou o fluxo do metal fundido para baixo, causando esse resultado na parede. O autor sugere que ao usar o método “zig zag”, com o depósito mostrado na Figura 2.8b, a porção inicial de uma camada, que é mais volumosa, acaba compensando a geometria inclinada da porção anterior, fazendo com que o efeito acumulado existente no método “zig” não ocorra neste método, e portanto essa abordagem é mais eficaz para essa configuração de deposição. Entretanto, para o depósito de placas planas com um cordão ao lado do outro, como mostrado nas Figuras 2.8c e 2.8d, o método “zig” se mostrou mais eficaz que o método “zig zag”, pois a falta de material na porção final do cordão não pode ser compensado pela camada seguinte, como na parede vertical. Segundo o autor a corrente do processo e a velocidade de deposição influenciam mais na geometria das porções inicial e final do depósito que a tensão, DBCP e ângulo da tocha. Uma corrente baixa e velocidade de deslocamento elevada são recomendadas para uma parede com boa geometria do início ao fim.

Hu (2018) também estuda as melhores formas de depositar trajetórias fechadas, que começam e terminam no mesmo ponto. Mais duas abordagens são apresentadas pelo autor: a primeira com o incremento de altura no ponto inicial da deposição, e a segunda com o incremento em forma de uma rampa. Na primeira abordagem a deposição é realizada com pausas. A primeira camada é depositada começando no ponto inicial e a

trajetória é executada até que a tocha retorne ao ponto inicial, por se tratar de uma trajetória fechada. Nesse ponto há um incremento na altura e após isso a segunda camada é depositada, e assim sucessivamente. Segundo o autor, a porção final da deposição de cada camada possui o padrão inclinado, porém isso é compensado pela porção inicial, que é mais volumosa, sendo que essa estratégia pode resultar em um depósito de sucesso. Já a segunda abordagem a deposição é realizada de forma contínua, sem pausas. Dessa forma a primeira camada começa a ser depositada no ponto inicial e desde o início a altura é incrementada continuamente, como uma rampa, em pequenos valores, sendo que ao retornar ao ponto inicial o incremento passa a ser o equivalente a uma camada, e a deposição continua sem paradas. Segundo o autor as superfícies geradas por esses padrões são mais suaves e consistentes.

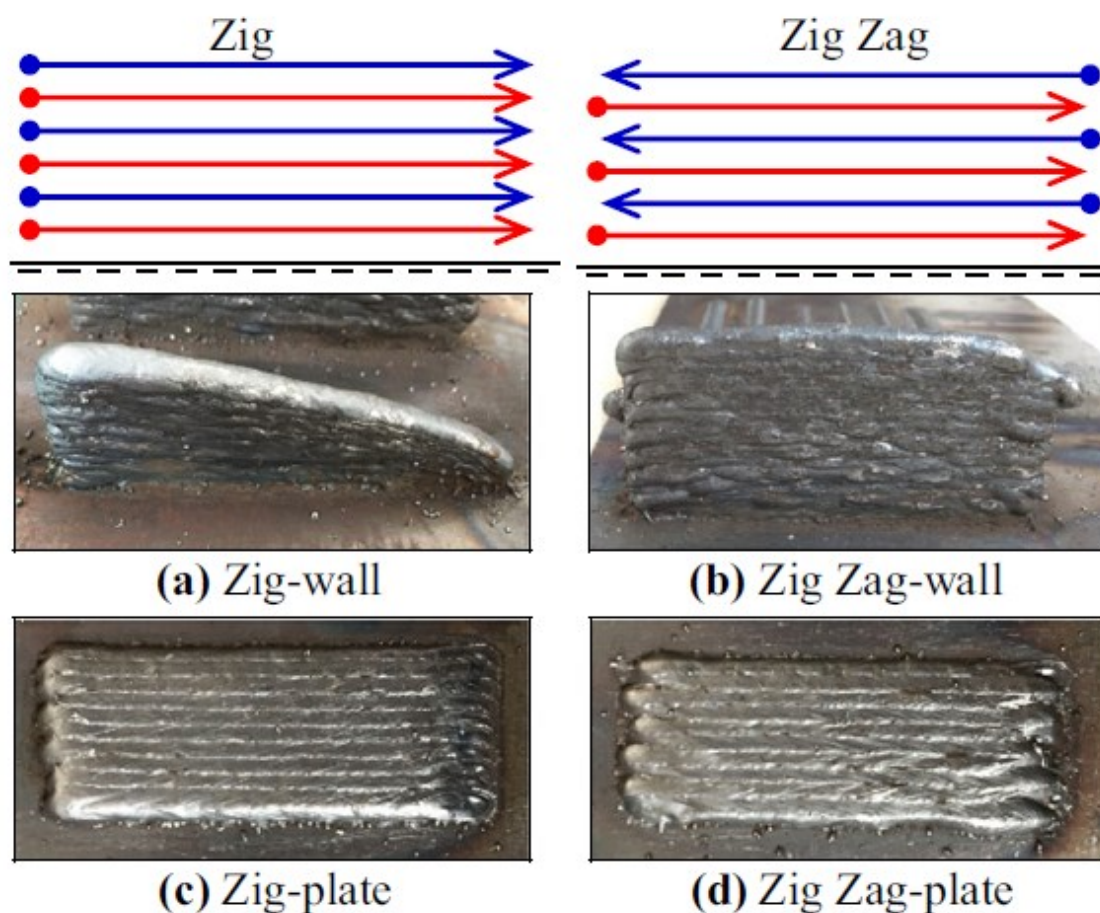


Figura 2.8 – Deposições em trajetória aberta com os métodos “zig” e “zig zag” (HU, 2018)

## 2.2 Processo MIG/MAG

Segundo a ASTM F3187 (2016), o termo “soldagem” refere-se a união de duas ou mais peças. Então, quando se trata de Manufatura Aditiva, esse termo deve ser usado com ressalvas, já que não há união de peças. Nesta seção é discutido o método de soldagem MIG/MAG, método que também é utilizado na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

O processo *Gas Metal Arc Welding* – GMAW (nomenclatura usada pela *American Welding Society*), também conhecido como MIG/MAG, é o processo de soldagem mais usado nas indústrias devido a sua versatilidade e suas vantagens específicas como taxa de deposição, baixo custo, operação simples e fácil automação (WANG, 2016).

De acordo com Scotti e Ponomarev (2014), o processo de MIG/MAG se baseia em uma fonte de calor elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e na peça a se soldar. A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (MIG – *Metal Inert Gas*), ou ativo ou ainda uma mistura entre eles (MAG – *Metal Active Gas*). O processo MIG/MAG pode ser aplicado de duas maneiras: automática, quando o deslocamento da tocha é realizado por meio de uma máquina, ou semiautomática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo soldador.

Com uma correta parametrização, a soldagem MIG/MAG pode ser aplicada em todas as posições, proporcionando estabilidade de arco, altas velocidades de soldagem, e podendo ser utilizada em diferentes metais e ligas.

Os principais equipamentos para a soldagem MIG/MAG são: a fonte de soldagem, alimentador de arame, tocha e o cabo, cilindro com gás de proteção, o bocal e o bico de contato, além do arame-eletrodo.

As principais vantagens do processo MIG/MAG são a relativamente elevada taxa de fusão do arame-eletrodo, a possibilidade de variar o modo em que a transferência metálica ocorre, o que permite soldar em diferentes posições, e a portabilidade da tocha, de baixa massa e fácil de manusear. Entre as dificuldades é possível citar uma alta emissão de calor e luz, a relativa dificuldade de manuseio do equipamento como um todo em comparação ao processo de eletrodo revestido, e o conhecimento para se regular os parâmetros de soldagem (SCOTTI E PONOMAREV 2014).

O modo de transferência metálica, ou seja, o modo como o metal fundido se transfere da ponta do eletrodo até a poça de fusão, é um dos pontos mais importantes no

processo de soldagem por MIG/MAG. O tipo de transferência afeta diretamente em vários fatores durante a soldagem. Marques (2011) indica que o tipo de transferência afeta a estabilidade do arco elétrico, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, a aplicabilidade do processo em algumas posições de soldagem, além dos níveis de respingos gerados durante o processo. Machado (1996) indica que o gás de proteção, a polaridade, o tipo de corrente, a densidade de corrente, a extensão do eletrodo após o bico de contato, a composição química do eletrodo e o diâmetro do eletrodo, irão determinar qual modo o metal irá se transferir até a poça.

O modo de transferência nada mais é do que o comportamento característico da gota durante sua transferência da ponta do eletrodo até a poça de fusão. Os modos de transferência são divididos em dois grupos: por contato e por voo livre. No primeiro há o contato da gota com a poça de fusão antes dela se destacar. Já no segundo grupo, a gota destaca-se antes de entrar em contato com a poça de fusão (SCOTTI E PONOMAREV 2014). Dentro desses grupos temos três principais modos de transferência:

- **Curto-Circuito:** Este modo de transferência se enquadra no primeiro grupo, por contato. Nele a ponta do eletrodo é formada por uma gota de metal líquido em crescimento, que atinge periodicamente a poça de fusão. Quando isso acontece ocasiona um curto-circuito elétrico e a extinção momentânea do arco. Esse modo de transferência geralmente ocorre em correntes e tensões de soldagens mais baixas. Sendo assim, o calor transferido a peça é reduzido, tornando esse modo de transferência aplicável para chapas finas e para soldagem fora da posição plana (SCOTTI E PONOMAREV, 2014). Uma imagem apresentando o modo de transferência por curto-circuito é apresentado na Figura 2.9;
- **Globular:** Este modo de transferência se enquadra no segundo grupo, por voo livre. Nesse modo a gota permanece no eletrodo à medida que vai crescendo. Quando ela se torna grande o suficiente, ela se destaca do arame-eletrodo antes de tocar a poça de fusão. A principal força responsável por esse destacamento é a força gravitacional. Este modo ocorre quando se utilizam tensões moderadas a altas e correntes baixas. As gotas se transferem de maneira irregular e em frequência muito baixa. Devido a força gravitacional ser a dominante neste tipo de transferência, a soldagem é aplicada apenas na posição plana. Estas desvantagens fazem com que este modo de transferência seja pouco desejado e aplicado na soldagem por MIG/MAG, com raras exceções, como a soldagem de alumínio em chapas finas (SCOTTI E PONOMAREV,

2014). Uma imagem apresentando o modo de transferência globular é apresentado na Figura 2.10;

- Goticular: Este modo de transferência também se enquadra no segundo grupo, por voo livre. Também é conhecida como *spray*. Nesse modo, pequenas gotas são transferidas de forma sequencial, em alta frequência. Este modo ocorre com altas correntes e tensões elevadas. Por isso esse modo não é aplicado a chapas finas e fora da posição plana. As principais aplicações são a união e o enchimento de chanfros em chapas mais espessas. Esse modo apresenta alta taxa de deposição, solda com bom aspecto superficial e não gera respingos. Uma condição crucial para a ocorrência desse modo de transferência é que a corrente de soldagem ultrapasse um valor denominado de corrente de transição. Até a corrente atingir o valor de transição, o tamanho das gotas se reduz lentamente e a frequência aumenta, também lentamente. Quando a corrente de transição é superada, o tempo de formação da gota diminui significativamente, ocasionando um aumento súbito na frequência de transferência das gotas. Isso ocorre pela mudança do fenômeno que governa o modo de transferência, onde a principal força deixa de ser a gravitacional e se torna a eletromagnética, o que impede que as gotas atinjam grandes dimensões (SCOTTI E PONOMAREV, 2014). Uma imagem apresentando o modo de transferência goticular é apresentado na Figura 2.11. A Tabela 2.3 mostra faixas de corrente de transição para arames de diferentes diâmetros.

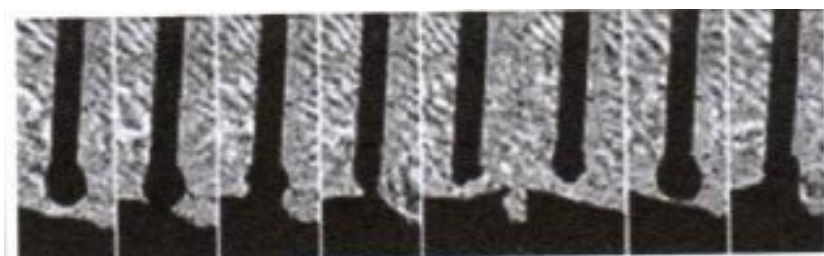


Figura 2.9 - Transferência por curto-circuito (SCOTTI E PONOMAREV, 2014).

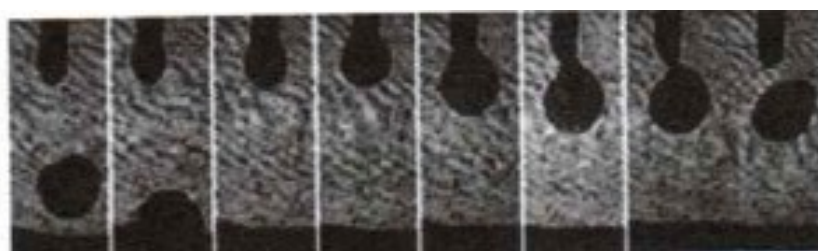


Figura 2.10 - Transferência globular (SCOTTI E PONOMAREV, 2014).



Figura 2.11 - Transferência goticular (SCOTTI E PONOMAREV, 2014)

Tabela 2.3 - Faixas de corrente de transição típicas para diferentes atmosferas e diâmetros de arames (SCOTTI E PONOMAREV, 2014)

Material do arame-eletrodo	Atmosfera protetora	Diâmetro de arame-eletrodo, mm	Corrente de transição, A
Aço-carbono	98%Ar + 2%O <sub>2</sub>	0,6	130 - 135
		0,8	150 - 160
		0,9	160 - 170
		1,0	180 - 190
		1,1	210 - 230
		1,2	220 - 240
		1,6	260 - 280
	95%Ar + 5%CO <sub>2</sub>	0,8	135 - 145
		1,0	180 - 190
		1,2	230 - 250
		1,6	270 - 285
	92%Ar + 8%CO <sub>2</sub>	0,8	145 - 155
		1,0	190 - 200
		1,2	240 - 260
		1,6	280 - 295
	85%Ar + 15%CO <sub>2</sub>	0,8	150 - 160
		1,0	195 - 205
		1,2	250 - 270
		1,6	285 - 300
	80%Ar + 20%CO <sub>2</sub>	0,8	155 - 165
		1,0	200 - 210
		1,2	265 - 280
		1,6	320 - 345

Os gases de proteção são utilizados com o principal objetivo de proteger a poça de fusão e também para dar estabilidade ao arco. Os principais gases usados no processo de MIG/MAG são o argônio, o hélio, o dióxido de carbono e o oxigênio. Esses gases normalmente são misturados para atender às exigências específicas da qualidade da solda. A mistura mais usada no processo MIG/MAG é a de argônio – CO<sub>2</sub>. Existem três faixas

típicas para essa mistura. A primeira com adição entre 18 a 25% de  $\text{CO}_2$ . Nessa faixa o modo de transferência predominante é o por curto-circuito. Na segunda faixa, o teor de  $\text{CO}_2$  varia entre 8 e 15%, com a operação no modo curto-circuito, apesar de a transferência goticular também ser possível. A terceira faixa conta com adição de 3 a 5% de  $\text{CO}_2$ , e é usada para atingir o modo de transferência goticular. Outras misturas comuns em MIG/MAG são  $\text{Ar} + \text{O}_2$  (adições entre 2 e 5%), que é usada no modo de transferência goticular, para melhorar a estabilidade do arco, e  $\text{Ar} + \text{He}$  (adições entre 5 e 25%), utilizados em materiais mais espessos, já que o hélio conduz melhor o calor. A eficiência da proteção depende da capacidade do sistema em excluir os gases do meio ambiente. Para isso, não somente o gás é importante, mas também a configuração do bocal da tocha e da junta, além da vazão do gás de proteção. O fluxo adequado para praticamente todas as condições de soldagem estão entre 10 e 16 L/min. Valores superiores a esse podem causar turbulência por uma vazão muito elevada, o que facilita a inclusão de elementos contaminantes, e valores abaixo do limite inferior pode ocasionar a falta de proteção. Não há uma forma adequada para se determinar a vazão apropriada para cada condição de soldagem, sendo que o operador deve utilizar sua experiência e bom senso para chegar ao valor ideal. Normalmente como regra prática, a vazão utilizada em L/min é igual a 10 vezes o diâmetro do arame (SCOTTI E PONOMAREV, 2014).

Desde sua criação o processo MIG/MAG vem sofrendo várias inovações tecnológicas. São vários novos processos que visam um maior controle da transferência metálica. Entre essas inovações pode-se destacar os processos de MIG/MAG pulsado, MIG/MAG com corrente alternada e MIG/MAG com curto-circuito controlado. No processo pulsado a corrente varia em dois níveis, a corrente de base e a corrente de pulso. A corrente de base tem como objetivo manter o arco aberto com baixa energia, enquanto a corrente de pulso tem como meta formar a gota na ponta do arame e atuar em seu destacamento. Esse processo tem como objetivo reunir as melhores características das transferências por curto-circuito e goticular em um só processo, ou seja, obter transferência estável e regular, com baixo nível de respingos, bom acabamento, a um valor de corrente baixa. Já no processo com corrente alternada, a corrente sofre inversão em sua polaridade em um curto espaço de tempo, seguindo os mesmos conceitos do processo pulsado. Enquanto isso, os processos de curto-circuito controlado buscam características como estabilidade térmica e diminuição de respingos (SCOTTI E PONOMAREV, 2014). Vários fabricantes de equipamentos desenvolveram diferentes patentes, cada um com seu método de controle de transferência. Um desses métodos é o

*Cold Metal Transfer* (CMT), da empresa Fronius. Nesse processo há um controle da forma da onda da corrente, da velocidade e sentido de avanço do arame. O processo acaba sendo muito mais estável que MIG/MAG convencional (DUTRA, 2013).

Para a deposição dos cordões de solda, alguns métodos são utilizados para encontrar as melhores condições de trabalho. Entre esses métodos pode-se citar o Critério Laprosolda para Regularidade de Transferência MIG/MAG com Curto-Circuito (FERNANDES, 2010). Nesse critério, uma velocidade de alimentação é ajustada em um valor fixo, e a tensão é variada progressivamente, normalmente de 1 em 1 volt, proporcionando arcos curtos e arcos mais longos, até que se encontre a condição com melhor regularidade através da análise dos dados. A análise dos dados é feita a partir de dois parâmetros:

- Índice de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito ( $IV_{cc}$ ): é o somatório da relação entre desvio padrão de tempo de arco aberto e tempo de arco aberto e a da relação entre desvio padrão de tempo de curto-circuito e tempo de curto-circuito, dado pela Equação 2.4. Quanto menor o valor de  $IV_{cc}$ , melhor é a regularidade da transferência metálica.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{t_{ab}} \quad (2.4)$$

- Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota para Transferência por Curto-Circuito ( $F_c$ ): estabelece a frequência máxima de curtos-circuitos para o tamanho máximo da gota admitido, formada na extremidade do arame fundido, em função da velocidade de alimentação (m/min) e na bitola do arame (mm) utilizado. Para cálculo da frequência de corte é utilizada a equação 2.5, em função da velocidade de alimentação, diâmetro do arame-eletrodo e diâmetro da gota (SOUZA, 2011).

$$F_c = \frac{3V_a d^2}{2d_g^3} \quad (2.5)$$

O ajuste de tensão que resultar no menor  $IV_{cc}$  dentro da frequência de corte, será a condição com melhor regularidade. A condição de melhor regularidade também fornece a melhor estabilidade do processo. E ao se trabalhar com a melhor estabilidade de transferência é de se esperar que o resultado da soldagem também seja o melhor. Sempre que a velocidade de alimentação ou o diâmetro de um arame forem alterados, novos cálculos são feitos para encontrar a melhor condição.



Normalmente, para encontrar os diâmetros das gotas durante a transferência metálica é necessário realizar a filmagem do processo, para obtenção de valores mais exatos. Em seu trabalho Soderstrom (2008) calcula os tamanhos de gota médios formados em função da corrente e dos gases utilizados. Os gráficos obtidos são mostrados na Figura 2.12. Esse tema também é abordado por Scotti e Ponomarev (2014). Segundo eles, diâmetros de gota devem ter valores entre 1,1 e 1,25 vezes o diâmetro do arame para arames de 1,2 mm de diâmetro com uso de misturas de Ar + CO<sub>2</sub> como gás de proteção e na posição plana para garantir uma transferência dominada pela tensão superficial.

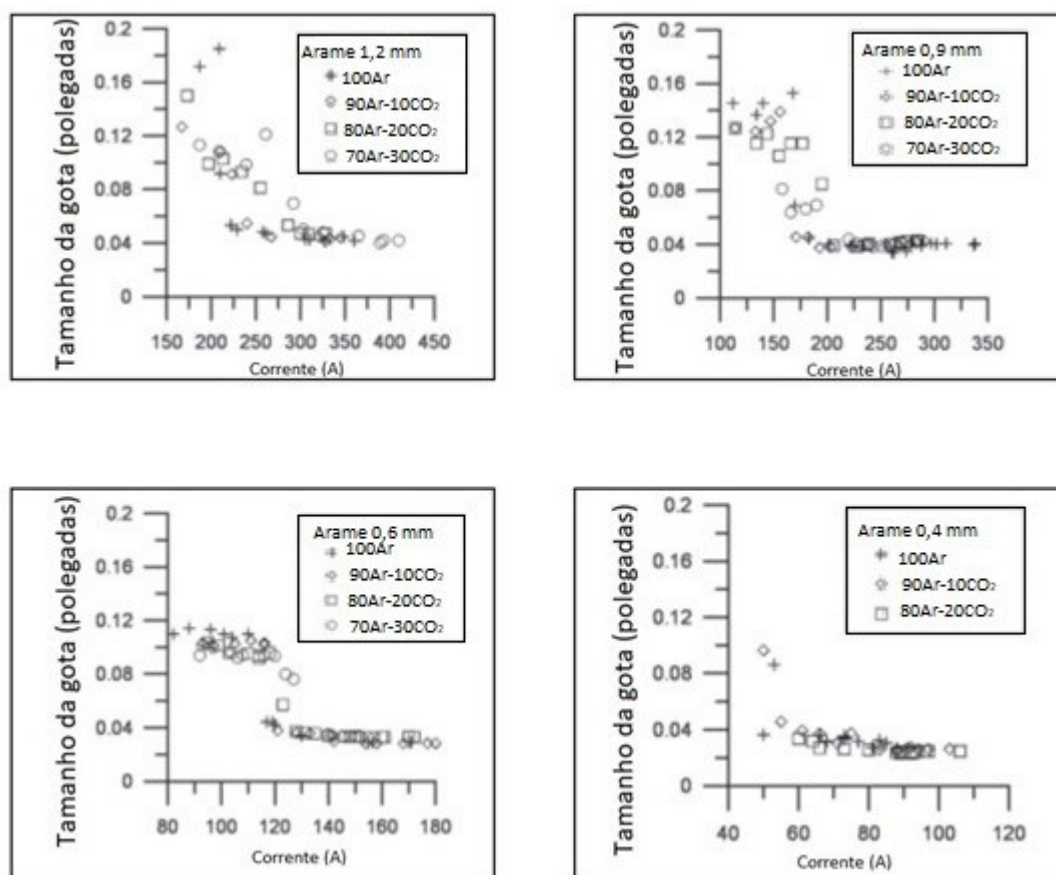


Figura 2.12 - Tamanho das gotas formadas em função da corrente e do gás utilizado (SODERSTROM, 2008)

Neste trabalho, ao utilizar arames de diferentes diâmetros, será buscado trabalhar com uma relação entre a velocidade de alimentação ( $V_a$ ) e a velocidade de deslocamento da tocha ( $V_d$ ) constante, para que haja uma comparação justa entre os arames. Sendo assim, a relação entre tais velocidades é encontrada a partir dos volumes do arame ( $Vol_a$ ) e de material ( $Vol_{sold}$ ) depositado. O volume do arame nada mais é do que a área da seção do arame ( $A_a$ ) vezes o comprimento total de arame depositado ( $h$ ), e o volume de material

depositado é a área da seção depositada ( $A_s$ ) vezes seu comprimento ( $L$ ). Considerando condições ideais, em que não haja respingos e todo o arame é depositado no cordão, esses volumes são iguais. O comprimento total de arame depositado pode ser entendido como o produto entre a velocidade de alimentação e o tempo de alimentação ( $t$ ), e o comprimento depositado pode ser entendido como o produto entre a velocidade de deposição pelo tempo de deposição ( $t$ ). Tais fórmulas são apresentadas nas equações a seguir.

$$Vol_a = A_a \cdot h \quad (2.6)$$

$$Vol_{sol} = A_s \cdot L \quad (2.7)$$

Igualando (2.6) e (2.7):

$$Vol_a = Vol_{sol} \Rightarrow \frac{h}{L} = \frac{A_s}{A_a} \quad (2.8)$$

$$h = V_a \cdot t \quad (2.9)$$

$$L = V_d \cdot t \quad (2.10)$$

Substituindo (2.9) e (2.10) em (2.8) temos:

$$\frac{V_a \cdot t}{V_d \cdot t} = \frac{A_s}{A_a} \Rightarrow \frac{V_a}{V_d} = \frac{A_s}{\frac{\pi \cdot d_e^2}{4}} \quad (2.11)$$

Onde  $d_e$  é o diâmetro do eletrodo. Como a área do depósito será constante para a deposição de diferentes arames, temos apenas o diâmetro do arame do lado direito que é uma variável na Equação 2.11. Logo tudo que é variável na Equação 2.11 é isolado em um lado e tudo que é constante é isolado em outro, como na Equação 2.12:

$$\frac{V_a \cdot d_e^2}{V_d} = cte \quad (2.12)$$

### 2.3 Arames Ultrafinos

Os arames ultrafinos (diâmetro 0,6 mm ou menor) são escassos e difíceis de trabalhar, e por isso são pouco utilizados em Manufatura Aditiva e até em soldagem. Com isso normalmente são usados arames com diâmetros superiores a 0,8 mm em MADA, o que resulta em uma superfície com um acabamento mais irregular (DEBROY, 2018).

Em seu estudo, Martins (2018) faz uma comparação da soldagem em chapas finas entre o arame de 0,6 mm no modo de transferência gótica e o arame de 1,0 mm no modo de transferência por curto-circuito. Ela cita vários problemas em se trabalhar com o arame de 0,6 mm. Entre eles a literatura escassa acerca do uso de tal arame. Outro problema é a dificuldade em se encontrar materiais adequados para realizar a solda com

esse arame, como o bico de contato, e com isso realizou a solda de cordões com bicos de 0,8 mm adaptados. Outros problemas são a fusão do bico de contato e o arame que embola no alimentador com frequência. Em seus resultados mostrou que o uso do arame de 0,6 mm não é viável em relação ao de 1,0 mm, pois atinge bons resultados apenas em condições muito específicas. Falta de penetração ocorre com frequência, exceto em velocidades de alimentação mais altas e velocidades de soldagem mais baixas.

Uma comparação entre os arames de 1,2; 0,9; 0,6 e 0,4 mm é feita por Soderstrom (2008). Segundo ele a definição da transferência goticular se baseia na comparação entre o diâmetro do arame e o tamanho das gotas durante a transferência metálica. Mas ele conclui que essa definição não é aplicável para arames muito finos, de diâmetro inferior a 0,9 mm. Ele mostra que abaixo desse diâmetro o tamanho das gotas não diminui proporcionalmente com o tamanho do arame, sendo que o tamanho das gotas nesses casos é sempre maior que o diâmetro do eletrodo.

## CAPÍTULO III – METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

### 3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

A seguir serão apresentados todos os materiais e equipamentos usados e a metodologia utilizada durante os ensaios, além de todas as dificuldades encontradas durante a execução deste trabalho.

O objetivo principal desse trabalho é a avaliação da aplicabilidade do arame ultrafino de 0,6 mm em comparação aos arames de 0,9 mm e 1,2 mm na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, utilizando o processo MAG convencional. Para isso foi montada a bancada experimental apresentada na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Bancada experimental (1-Fonte de Soldagem, 2-Posicionador, 3-Alimentador, 4-Sistema de controle, 5-Gás de adição, 6-Sistema de Aquisição de Dados, 7-Cuba)

Como observado na Figura 3.1 os principais equipamentos utilizados durante os ensaios são a fonte de energia (1), o posicionador (2), o alimentador (3), o sistema de controle (4), os gases de adição (5), o sistema de aquisição de dados (6) e a cuba (7). Além desses, os consumíveis e constituintes do equipamento de soldagem também foram utilizados para a realização dos experimentos, como o arame, bicos de contato, roletes, conduítes, tocha, bocal e difusores.

A fonte de energia utilizada nos experimentos foi a IMC Inversal 300 e o alimentador de arame IMC STA-20.

O posicionador utilizado consiste de uma mesa e uma guia onde é conectada a tocha. A referida mesa se movimenta nos eixos X e Y, na horizontal, fazendo com que a cuba, e consequentemente o substrato, se movam na mesma direção. A guia movimenta a tocha na vertical, pelo eixo Z. Os movimentos são realizados pelo sistema de controle, um sistema CNC controlado por um software Mach3. A linguagem de programação é baseada no código G. Com isso é feito um programa para realizar a trajetória desejada em uma velocidade definida, criando uma forma para a deposição de material.

A cuba é utilizada para a fixação do substrato. Também possui como função armazenar o fluido líquido responsável pelo resfriamento do material que está sendo depositado. Trata-se do Resfriamento Ativo por Quase-imersão (RAQI), uma técnica de gerenciamento térmico aplicado à MADA, que tem como base a quase imersão contínua da pré-forma em um fluido líquido de resfriamento durante a sua construção. Nesse caso é utilizada a água como fluido de resfriamento. À medida que as camadas são depositadas, o nível da água deve aumentar para que o resfriamento se mantenha eficaz. O controle do nível de água para esses ensaios foi feito manualmente, sendo que a cada camada depositada, um determinado volume de água foi adicionado à cuba com o objetivo de manter o nível entre a lâmina d'água e a camada a ser depositada entre 10 e 15 mm. Sendo assim, a maior parte da pré-forma fica imersa, estando em equilíbrio com a temperatura da água. A parte sobre a lâmina d'água é resfriada rapidamente durante a deposição, trocando calor com a parte mais fria.

O sistema de aquisição de dados é composto por uma placa de aquisição e um condicionador de sinal, mostrados na Figura 3.2, além de um computador com software para leitura e armazenamento dos dados. Os valores de corrente e tensão são medidos para cada um dos testes. Os dados são tratados para cálculo de corrente e tensão médias, e para cálculos de frequência de curto-circuito e  $IV_{cc}$ , para os casos em que é usado o modo de transferência por curto-circuito.

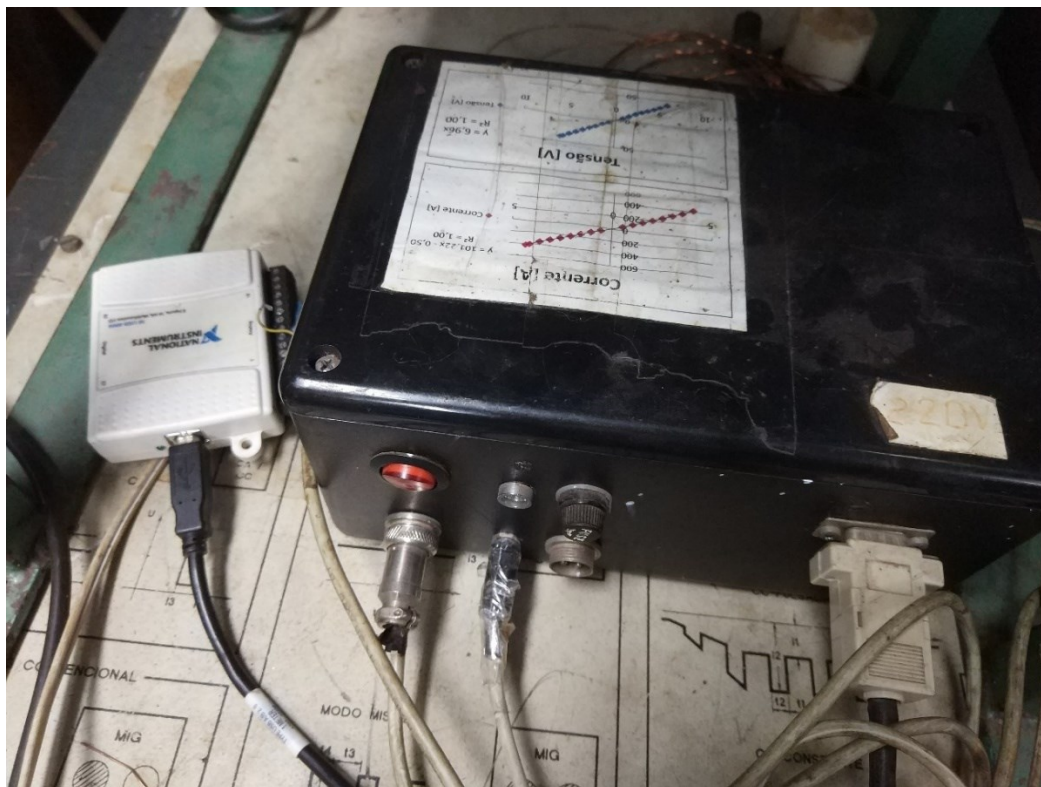


Figura 3.2 - Condicionador de Sinal e Placa de Aquisição de Dados

Os gases utilizados foram  $\text{Ar} + 8\%\text{CO}_2$  para os testes em que se buscava o modo de transferência goticular, e  $\text{Ar} + 25\%\text{CO}_2$  para os testes com o modo de transferência por curto-circuito. A vazão de gás foi de 10 L/min para os testes com os arames de 0,6 e 0,9 mm, enquanto que para o arame de 1,2 mm foi utilizada a vazão de 12 L/min.

Os arames utilizados possuem três diâmetros diferentes: 0,6 mm, 0,9 mm e 1,2 mm. O arame de 0,6 mm é cobreado com especificação ER70S-3, enquanto os arames de 0,9 e 1,2 mm também são cobreados e possuem especificação ER70S-6.

Uma tocha com mangueira de grande comprimento poderia trazer problemas durante a deposição do arame de 0,6 mm, pois esse pode embolar em mangueiras com comprimentos maiores. Por isso foi utilizada uma mangueira com 1 m de comprimento, refrigerada à água. Normalmente, para a deposição de cordões de solda o arco fica aberto por pouco tempo. Entretanto na Manufatura Aditiva é comum o arco ficar aberto durante longos períodos, principalmente quando na fabricação de uma peça o material é depositado continuamente, sem pausas. Com isso o resfriamento da tocha é utilizado, para evitar problemas com superaquecimento.

O resfriamento foi utilizado em todos os testes, tanto na deposição de cordões para parametrização, como na Manufatura Aditiva, na fabricação de paredes e outras geometrias. Além disso, foi tomado o cuidado de deixar a mangueira na posição mais reta possível, com curvas suaves, como visto na Figura 3.1, para evitar que o arame dobre dentro da tocha.

Os roletes e bicos de contato (com rosca do tipo M6) utilizados eram adequados para os arames de 0,6; 0,9 e 1,2 mm. Foi usado um conduíte para os arames de 0,6 e 0,9 mm e um outro conduíte de maior diâmetro para o arame de 1,2 mm. Durante a deposição com o arame de 0,6 mm um dos grandes problemas enfrentados foi o fato de o arame embolar dentro do alimentador, ao sair do rolete e entrar no tubo guia a caminho da tocha. Para diminuir o número de vezes que esse problema ocorria foi necessário adaptar um tubo guia para que ele ficasse o mais próximo possível do rolete.

Como foi usada uma cuba para a deposição de material e o processo foi todo automático, o operador teve, indiretamente, uma proteção a mais, já que os efeitos de radiação chegam até ele com menor intensidade. Sendo assim, o processo aqui foi diferente do que ocorre em soldagem, que a depender do processo utilizado as queimaduras ocorrem mais facilmente.

Os substratos utilizados são de aço carbono e possuem dimensões de 150 mm x 150 mm x 13 mm e 200 mm x 100 mm x 13 mm. Durante a deposição, a temperatura de interpasse era monitorada por meio de um pirômetro digital, e o passe seguinte só era depositado após a temperatura atingir 50°C.

Em Manufatura Aditiva é necessário que haja um controle do tempo do arco aberto. Inicialmente a bancada de trabalho contava com o acionamento do arco elétrico de forma manual, por meio de uma botoeira, que era acionada no momento de abertura e fechamento do arco. Com o objetivo de ter um melhor controle do tempo de arco aberto e eliminar alguns problemas que poderiam acontecer, a mesa de trabalho foi adaptada para que a abertura e fechamento do arco ocorra em tempos programados, de forma automática. Para isso, foi necessária a instalação de um módulo relé, e a confecção e instalação de cabos com os conectores, adequados para que o sinal de abertura e fechamento do arco seja enviado automaticamente para a fonte. O funcionamento consiste no envio de um sinal elétrico a partir de um comando enviado pelo programa computacional. Esse sinal, ao chegar ao módulo, fecha o circuito, permitindo o envio do sinal até a fonte de soldagem, o que ocasiona a abertura do arco elétrico. Ao fim do

processo um comando é enviado pelo computador, causando a interrupção do sinal, abrindo o circuito e fechando o arco elétrico. O esquema é mostrado na Figura 3.3.

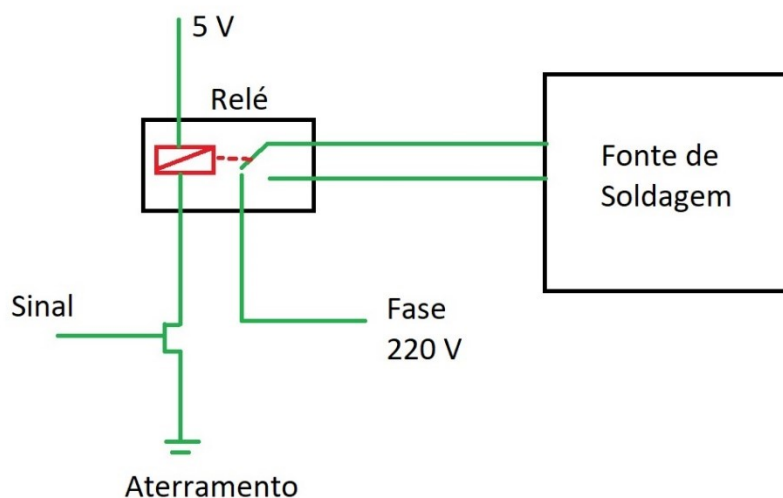


Figura 3.3 –Esquema da montagem do módulo na fonte de soldagem.

### 3.2 Metodologia

Dentre os arames utilizados nesse trabalho, o arame de 0,6 mm foi o mais difícil de se trabalhar. Os principais problemas enfrentados foram o arame embolar no alimentador e o bico de contato se fundir durante a deposição. A seleção correta dos parâmetros na fonte é muito importante para que esses problemas não ocorram. Por isso os testes foram iniciados por esse arame. A partir dos resultados e parâmetros utilizados para esse arame, foram calculados os parâmetros para os outros arames.

Inicialmente, os testes foram feitos utilizando o modo de transferência goticular. Para isso foi utilizado o gás Ar + 8%CO<sub>2</sub>. A regra prática para a seleção da vazão de gás de proteção sugere uma vazão de 10 vezes o diâmetro do eletrodo e valores entre 10 e 16 L/min. Como o arame utilizado é o de 0,6 mm, a vazão a ser utilizada seria de 6 L/min. Entretanto, essa vazão seria abaixo do comumente utilizado e, portanto, foi usada a vazão de 10 L/min para evitar falta de proteção. Todos os testes foram feitos usando o processo MAG convencional.

Foram realizados testes preliminares para identificar os parâmetros necessários para conseguir a transferência goticular. Poucos são os trabalhos que tratam o arame de



0,6 mm como objeto de estudo. Entretanto, o trabalho de Martins (2018) usa o arame de 0,6 mm como fonte de estudo, e busca uma comparação entre esse arame no modo de transferência goticular, com o arame de 1,0 mm no modo de transferência por curto-circuito. Os valores de tensão e alimentação utilizados do trabalho de Martins (2028) foram utilizados como ponto de partida para definição dos parâmetros a serem utilizados nos testes. Cordões foram depositados e a aquisição de dados foi feita por meio do sistema de aquisição.

Normalmente as tensões e correntes no modo de transferência goticular são elevadas, por isso a tensão e alimentação são aumentados durante os testes. Uma análise dos dados é feita para verificar se os oscilogramas de corrente e tensão produzidos se comportam como deveriam no modo goticular, ou seja, sem grandes variações significativas nos sinais. Isso não garante a ocorrência do modo de transferência goticular, mas é um forte indício de que ela foi alcançada. Para saber precisamente o modo de transferência, seria necessária a utilização de filmagem em alta velocidade do processo, de forma a visualizar o fenômeno da transferência metálica. Entretanto, em função de limitações de tempo, não foi possível realizar tais filmagens.

Com os oscilogramas indicando que o modo de transferência desejado foi alcançado, os parâmetros de deposição para esse modo de transferência foram definidos. Com os parâmetros definidos, cordões foram depositados um a um sobre o substrato, e a velocidade de deslocamento da tocha foi aumentada em cada teste, até que um cordão não tenha uma qualidade aceitável, ou seja, com baixo desvio geométrico, medido através de um paquímetro. Os parâmetros utilizados para o melhor cordão depositado foram utilizados para a confecção de uma parede, depositando camada sobre camada no substrato.

Todas as paredes foram depositadas por “zig zag”, com paradas em cada camada para atingir a temperatura de interpasse de 50 °C, monitorada pelo pirômetro. A cada parada um volume de água predefinido foi adicionado à cuba, já que está sendo utilizada a técnica de gerenciamento de calor RAQI. Tal procedimento teve como objetivo manter constante a distância entre a lâmina d’água e a camada onde é depositado o cordão seguinte. Nos experimentos buscou-se manter essa distância entre os valores de 10 e 15 mm.

Fazendo uma analogia com a soldagem manual, o soldador abre o arco e espera um pequeno tempo até que o arco se estabilize e a poça de fusão se forme, para após isso deslocar a tocha na direção desejada para realizar a solda. Na realização dos experimentos

foi encontrado um problema relacionado a essa etapa nos primeiros testes, pois quando o processo é automático, como é no caso da Manufatura Aditiva, o arame começa a ser alimentado ao mesmo tempo em que a tocha começa a se deslocar. Isso faz com que a poça de fusão não se forme corretamente e, ou o arco se apaga, ou o cordão depositado acaba não apresentando bom aspecto. Para corrigir isso, basta programar um tempo de espera da tocha, até que ela comece a se movimentar. Assim o arame começa a ser alimentado, e após o tempo programado, que na maioria dos testes foi utilizado um tempo de espera de 2 segundos, a tocha começa a se movimentar, o que garante que o arame entre em contato com o substrato permitindo que o arco abra e se forme adequadamente.

Os problemas aconteceram apenas na abertura no arco, sendo que no fechamento não acontecia esse problema, apenas o pequeno rechupe que normalmente se forma após a poça de fusão se solidificar e contrair. Entretanto, como nos experimentos foram confeccionadas paredes, o ponto onde o arco se apagava na primeira camada, era o ponto onde ele era aberto na segunda camada, fazendo com que não houvessem problemas com falta ou acúmulo de material. Na porção final outro problema foi verificado. Ao chegar ao final da deposição e apagar o arco, o arame apresentava colamento por mergulho na poça de fusão em solidificação. Para solucionar esse problema a fonte apresenta uma regulação de defasagem entre o corte de energização do arco e do motor de alimentação do arame, o que permitiu que tal problema fosse eliminado. Ao fim da deposição de cada camada, uma gota esférica normalmente se forma na ponta do arame. Essa gota causa dificuldade na reabertura do arco, e no caso do arame de 0,6 mm essa dificuldade quase sempre ocasiona o embolamento do arame no alimentador. Por isso, ao final da deposição de cada camada a gota é removida manualmente, com um pequeno corte na ponta do arame com o uso de um alicate de corte.

Um parâmetro que tem importância na Manufatura Aditiva é a altura programada de subida a cada camada. A cada passe adicionado a tocha sobe uma determinada altura, que por questão de programação geralmente é constante. E foi observado que encontrar o valor ideal de subida para cada parâmetro utilizado acaba sendo um desafio. Isso normalmente é feito por tentativa e erro: um valor de altura do passe é definido, a DBCP é medida, e a parede é depositada com pelo menos 5 camadas. Ao final do depósito a DBCP é medida novamente. Se a DBCP for maior que a inicial, significa que a altura ajustada foi maior que a ideal, e deve ser reduzida. Se der menor, a altura deve ser reduzida. Para encontrar o quanto alterar na altura, deve-se medir a altura da parede e dividir pelo número de camadas depositadas, sendo que o valor encontrado é a nova altura

a ser usada. Com essa nova altura outra parede é depositada e o procedimento é repetido para conferir se a DBCP se manteve constante. Caso não seja constante o processo é feito novamente até que haja uma convergência no valor da altura. Para os experimentos realizados com cada um dos arames, as alturas foram ajustadas entre 1 e 1,3 mm a cada camada.

Após os testes com o modo de transferência goticular, o gás foi trocado, passando a ser utilizada a mistura de Ar + 25%CO<sub>2</sub>, com o objetivo de utilizar o modo de transferência por curto-circuito. Como aconteceu nos testes anteriores a vazão utilizada foi de 10 L/min. Para estes testes foram utilizados dois níveis de velocidade de alimentação, um maior e um menor. Para cada um desses níveis deve-se encontrar as melhores condições experimentais. Isso foi feito, ao depositar cordões, fixando um valor de velocidade de alimentação e variando os valores de tensão.

Para determinar qual a melhor condição utiliza-se o Critério Laprosolda para Regularidade de Transferência MIG/MAG com Curto-Circuito. Esse critério consiste em encontrar o menor IV<sub>cc</sub> e uma frequência de curto-circuito dentro da frequência de corte. O IV<sub>cc</sub> é calculado por meio dos dados coletados, usando a Equação 2.4. A frequência de curto-circuito é calculada por meio dos dados obtidos como o número de curto-circuito pelo tempo de arco aberto. Por fim a frequência de corte foi calculada a partir dos parâmetros utilizados, por meio da Equação 2.5.

Para esse cálculo é necessário estimar o valor do diâmetro da gota. Isso pode ser feito utilizando a Figura 2.12 que correlaciona o tamanho da gota ao nível de corrente utilizado. Entretanto os níveis de corrente utilizados durante os experimentos não estão contidos no gráfico. Por isso foi utilizada a recomendação de Scotti e Ponomarev (2014) em que o diâmetro da gota para o arame de 1,2 mm está entre 1,1 e 1,25 vezes o diâmetro do arame. Assume-se que esta relação também é válida para os arames de diâmetro 0,6 e 0,9 mm. Sendo assim o diâmetro da gota foi estimado, o que permite calcular a frequência de corte para cada uma das condições utilizadas. Com isso encontra-se a regulagem que fornece a melhor regularidade para uma determinada velocidade de alimentação, regulagem essa que é usada para a construção de paredes.

É importante destacar que sempre que a velocidade de alimentação é alterada é necessária uma nova parametrização. As paredes são depositadas seguindo o mesmo procedimento usado anteriormente, no modo “zig zag”, com paradas a cada camada para adição de um volume definido de água e para aguardar até que a temperatura de interpasse seja atingida.

Os testes realizados com o arame de 0,6 mm são repetidos para os outros arames, de 0,9 e 1,2 mm, mas os parâmetros utilizados não foram os mesmos. Isso porque será buscada uma área da seção de deposição constante para todos os arames. Isso é feito mantendo uma relação entre a velocidade de alimentação e velocidade de deslocamento entre os processos de acordo com o arame utilizado, como visto na Seção 2.2. Então antes do início dos testes para os outros arames, tais cálculos foram realizados, utilizando a Equação 2.12, para definir os parâmetros a serem utilizados.

Definidas as velocidades de deslocamento e de alimentação, os mesmos procedimentos realizados para o arame de 0,6 mm foram realizados com os arames de 0,9 e 1,2 mm para encontrar as condições de melhor regularidade, condições essas utilizadas para a deposição de paredes para tais arames. A vazão de gás de proteção, Ar + 25%CO<sub>2</sub>, foi mantida em 10 L/min para o arame de 0,9 mm, respeitando o que a regra prática sugere, enquanto que para o arame de 1,2 mm foi usada uma vazão de 12 L/min, ou seja, um valor de 10 vezes o valor do diâmetro do arame. Ao modificar o diâmetro do arame, outros consumíveis também são substituídos para que haja uma deposição adequada. O bico de contato e os roletes são substituídos sempre que o diâmetro do arame é alterado. O conduíte usado na tocha, por recomendação do fabricante é o mesmo para os arames de 0,6 e 0,9 mm. Portanto ele só é trocado ao ser utilizado o arame de 1,2 mm. Os conduítes são limpados com uma certa frequência com o uso de ar comprimido.

Ao fim dos testes, é necessária uma comparação entre as paredes depositadas. Dois fatores são levados em consideração. A largura da parede e a eficiência da deposição. O objetivo deste trabalho é conseguir uma parede mais fina para fazer frente aos processos a laser. No entanto, de nada adianta conseguir uma parede muito fina, mas bastante irregular, com baixo aproveitamento de material. Daí a importância de se calcular a eficiência da deposição, para saber qual porcentagem da deposição será aproveitada.

Para o cálculo da eficiência é necessário estimar os valores do volume total depositado e do volume efetivo, que realmente é aproveitado após usinagem. Tais valores são obtidos a partir das Equações (2.1) a (2.3), onde o volume total é estimado a partir de parâmetros utilizados, como diâmetro do arame, comprimento depositado e velocidade de alimentação. Com isso foi constatada a necessidade de verificar se os valores selecionados de alimentação realmente são reais, pois é comum que haja algumas variações durante a deposição. Isso foi feito com todos os três arames em alguns níveis de velocidade de alimentação. O processo consiste em alimentar o arame, sem ligar o

arco, e medir o ponto inicial e final da alimentação e o tempo gasto para isso. A relação entre o comprimento alimentado e o tempo gasto fornece a velocidade de alimentação. Algumas diferenças entre a velocidade indicada no alimentador e a velocidade medida foram encontradas e os resultados obtidos são apresentados no capítulo seguinte. Sendo assim, os valores reais, que foram medidos, são utilizados para cálculo do volume total. Já a largura efetiva é calculada através de valores estimados de comprimento, largura e altura efetivos, ou seja, o maior volume que a parede teria após processo de usinagem. A eficiência de deposição é calculada pela relação entre volume efetivo e volume total, sendo que quanto maior a eficiência melhor, pois mais material é aproveitado.

Por fim, é fundamental saber se o processo é aplicável em chão de fábrica, ou seja, analisar se tais materiais e parâmetros podem ser usados na confecção de peças com maior complexidade. Geometrias comuns de peças incluem curvas, cruzamentos e cantos, e com isso a trajetória proposta por Ding (2015a), indicada na Figura 2.7, foi depositada, usando os melhores parâmetros obtidos para os arames de 0,6, 0,9 e 1,2 mm. Os resultados são apresentados e analisados no capítulo seguinte. Além disso, uma breve análise é feita para discussão do caminho para deposição do material, para mostrar que dependendo da geometria, caminhos diferentes podem implicar resultados diferentes, ressaltando a importância do projeto da trajetória a ser depositada.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todo o procedimento de deposição é feito de forma automática nesse experimento, ou seja, a alimentação e o deslocamento são realizados roboticamente. Entretanto, durante os primeiros testes, realizados usando o gás Ar + 8%CO<sub>2</sub> para o arame de 0,6 mm, o acionamento da tocha para abertura e fechamento do arco era feito manualmente, com o auxílio de um gatilho conectado à fonte. Mas para os testes seguintes uma adaptação foi feita na mesa para que a abertura e fechamento do arco fosse controlada por programação no computador. A temperatura de interpasse foi monitorada a cada camada, de modo que a camada seguinte só fosse depositada quando tal temperatura atingisse o valor de 50° C. Sendo assim o tempo de espera em cada camada não era constante, e o programa computacional era pausado ao fim de cada camada e o depósito só acontecia novamente após uma ordem do operador.

### 4.1 Deposição com arame de 0,6 mm, transferência goticular

A bancada é preparada para o início dos experimentos, sendo que inicialmente é utilizado o arame de 0,6 mm. Martins (2018) também trabalha com o arame de 0,6 mm com modo de transferência goticular. Os valores utilizados em seu trabalho são usados como ponto de partida para esse trabalho. Para atingir o modo de transferência goticular, Martins (2018) utiliza os valores de 26,0 e 28,0 V de tensão e 15,3 e 17,3 m/min de velocidade de alimentação.

Os primeiros testes consistiam na deposição de cordões que permitem encontrar a condição ideal para a confecção de uma parede. Para identificar o modo de transferência alcançado em cada teste foi feita uma análise dos oscilogramas de tensão e corrente pelo tempo. Com os parâmetros utilizados por Martins (2018), tal modo de transferência não foi alcançado. A transferência com modo goticular foi obtida ajustando o valor de tensão na fonte em 30,5 V e a velocidade de alimentação em 14,6 m/min. A distância bico de contato à peça (DBCP) utilizada foi de 15 mm. A vazão do gás Ar + 8%CO<sub>2</sub> foi de 10 L/min. Então os experimentos são iniciados depositando os cordões um a um no substrato de 200 mm x 100 mm x 13 mm, montado na cuba, aumentando-se gradualmente a

velocidade de deslocamento a cada cordão. Na Tabela 4.1 apresenta-se o resumo das velocidades consideradas em cada um dos testes realizados.

À medida que se aumenta a velocidade de deslocamento o cordão tende a ficar com uma espessura menor. Isso pode ser observado na Figura 4.1. Porém, ao aumentar a velocidade de deslocamento, defeitos começam a aparecer no cordão depositado, o chamado *humping* que ocorre principalmente quando se utiliza velocidades de deslocamento elevadas. Após medição com paquímetro, os Cordões 6 e 7 foram descartados, por apresentarem grandes variações na largura ao longo do cordão.

Velocidades de deslocamento menores implicam em larguras maiores, e o objetivo deste trabalho é encontrar a parede mais fina possível. Por isso o Cordão 5 foi considerado ideal para a sequência dos testes. Então os parâmetros utilizados para o Teste 5 foram ajustados para fazer a primeira parede, com especificações definidas na Tabela 4.2. O substrato utilizado tem dimensões de 150 mm x 9 mm x 30 mm.

Tabela 4.1 – Velocidades de deslocamento utilizadas para os 7 testes considerados

Teste	Velocidade de deslocamento (mm/min)
1	380
2	450
3	550
4	650
5	750
6	850
7	950



Figura 4.1 – Cordões (1 a 7) com o arame de 0,6 mm e mistura gasosa Ar + 8%O<sub>2</sub>, para diferentes velocidades de deslocamento. Testes com as condições 1 e 6 foram repetidos.

Tabela 4.2 - Parede depositada utilizando arame de 0,6 mm e mistura gasosa Ar + 8%O<sub>2</sub>, com modo de transferência goticular

Parede	Tensão (V)	Velocidade de deslocamento (mm/min)	Velocidade de alimentação (m/min)
1	30,5	750	14,6

Utilizando o procedimento e os parâmetros definidos anteriormente, tem-se o resultado da primeira parede apresentado na Figura 4.2. Verificou-se que as duas primeiras camadas dessa parede ficaram boas. Porém, a partir da terceira camada alguns defeitos foram observados, e estes acabaram se agravando ao longo das camadas seguintes. Foram depositadas 5 camadas, e grandes irregularidades no formato de corcundas foram observadas na Parede 1 (Código G Programa “Parede” no Apêndice A. Esse programa foi utilizado na confecção de todas as paredes do trabalho, com alterações em apenas alguns parâmetros, como velocidade de deslocamento).





Figura 4.2 - Parede 1 com arame 0,6 mm e mistura gasosa Ar + 8%O<sub>2</sub>

Os resultados da Parede 1 mostram que a deposição de um cordão regular não garante que a parede terá bons resultados, pois alguns problemas podem ocorrer nas camadas seguintes. Sendo assim, para este caso não faz sentido depositar mais cordões para tentar encontrar uma condição ideal. Com isso passa-se a depositar apenas paredes para esse modo de transferência.

A real causa do problema ocorrido na Parede 1 ainda não é conhecida. Com isso, dois parâmetros passaram a ser investigadas como possíveis causas desse defeito na parede: velocidade de deslocamento (acreditando se tratar de *humping*) e a velocidade de alimentação (acreditando se tratar de falta de alimentação). Para investigar a primeira opção, a velocidade de deslocamento foi diminuída, com testes com 650 e 550 mm/min, e os outros parâmetros mantidos constantes. Com isso mais duas paredes foram depositadas (Paredes 2 e 3). A segunda opção também foi analisada. Para isso todos os parâmetros utilizados na deposição da Parede 3 foram mantidos constantes, e a velocidade de alimentação foi aumentada para 16 m/min (Parede 4). Entretanto, após inúmeras tentativas, o arame sempre embolava no alimentador, o que não permitiu a deposição de uma parede da forma desejada com esses parâmetros. Os dados dos parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Paredes com arame de 0,6 mm e mistura gasosa Ar + 8%O<sub>2</sub>

Parede	Tensão (V)	Velocidade de deslocamento (mm/min)	Velocidade de alimentação (m/min)
2	30,5	650	14,6
3	30,5	550	14,6
4	30,5	550	16,0

A Parede 2 apresentou resultado semelhante à Parede 1. Até a terceira camada a parede estava adequada, porém na quarta camada corcundas começaram a aparecer e essas aumentaram na quinta camada, ao longo de toda a parede. Ao diminuir ainda mais a velocidade de deslocamento, para o valor de 550 mm/min, os resultados apresentaram uma leve melhora.

Na Parede 3 foram depositadas 10 camadas, e as corcundas foram observadas de forma mais acentuada apenas na porção inicial e final da parede, que apresentava uma largura considerável. Ainda um outro teste foi feito, aumentando o valor da velocidade de alimentação para 16 m/min, para a fabricação da Parede 4. Foram feitas 8 camadas, porém o arame embolou no alimentador durante a deposição da última camada. Novamente foi possível observar as corcundas apenas nas porções inicial e final da parede. Porém a parede 4 apresentou uma maior espessura que a parede 3. Conclui-se que a velocidade de deslocamento exerce mais influência na formação de corcundas que a velocidade de alimentação, pois diminuir a velocidade de deslocamento torna a formação de corcundas mais suave, enquanto o aumento da velocidade de alimentação não tem efeito prático na formação de corcundas. Assim, o problema enfrentado é o chamado *humping*, que é a formação de corcundas principalmente por utilizar elevadas velocidades de deslocamento.

Na Figura 4.3 são apresentados os gráficos de corrente e tensão para a primeira camada da Parede 3. As curvas de corrente e tensão são características do modo de transferência goticular, não apresentando variações significativas dos sinais ao longo do tempo, o que leva a acreditar que o modo de transferência desejado foi alcançado. O valor médio da tensão calculada para esta camada é de 30,5 V, exatamente o que foi ajustado na fonte, e a corrente média de 152 A.

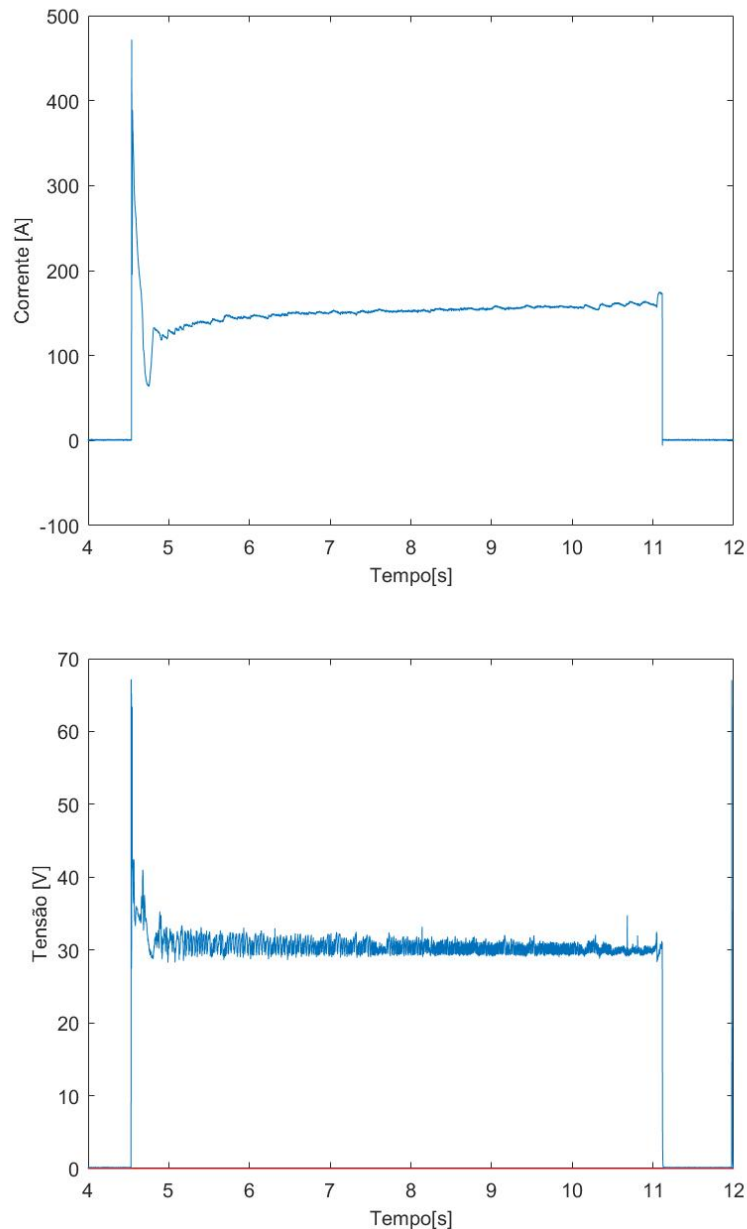


Figura 4.3 - Gráficos de corrente e tensão para Camada 1 da Parede 3

O racional seria pensar em continuar diminuindo a velocidade de deslocamento até que tivesse sido obtida uma parede livre de corcundas. Porém, as paredes fabricadas eram muito espessas, com valores entre 5 e 6 mm, e como o objetivo desse trabalho é a fabricação de peças com a menor espessura possível, foi considerado que os resultados obtidos não foram satisfatórios, e a diminuição da velocidade de deslocamento não iria contribuir com o objetivo desejado. Então os testes seguiram, mas utilizando um outro modo de transferência, por curto-circuito.

O modo de transferência goticular se mostrou muito instável para a realização de deposição de paredes. As primeiras camadas apresentavam bom aspecto. Entretanto as camadas seguintes acabavam não tendo boa qualidade. Utilizar velocidades de alimentação mais elevadas não permite que velocidades de soldagem bem mais elevadas também sejam utilizadas, pois o efeito conhecido como *humping* se forma na parede ao longo das camadas. Excesso de calor também é um problema, já que em Manufatura Aditiva o ideal é fundir uma pequena parcela da camada anterior, apenas para que haja uma coalescência entre as camadas. Ao utilizar valores elevados de alimentação e, consequentemente de corrente, as camadas anteriores são fundidas.

Durante os testes usando o modo de transferência goticular, notou-se que para valores de velocidade de alimentação acima de 15 m/min o arame embolava no alimentador com mais frequência. Portanto, nos testes seguintes evitou-se utilizar velocidades de alimentação superiores a essa.

#### 4.2 Deposição com arame de 0,6 mm, transferência curto-circuito

Para a deposição com o modo de transferência por curto-circuito há a necessidade de alteração do gás de proteção, passando a ser utilizado o gás Ar + 25%CO<sub>2</sub>. Para encontrar a melhor condição de deposição foi usado o Critério Laprosolda para Regularidade de Transferência MIG/MAG com Curto-Circuito, que consiste na análise dos dados obtidos de tensão, corrente e velocidade de alimentação para obtenção de dois parâmetros: o Índice de Regularidade de Transferência em Curto-Circuito ( $IV_{cc}$ ), e a Faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito ( $\Delta F_{cc}$ ). Tais valores são calculados por meio de programa de computador, com os dados coletados por meio do sistema de aquisição. O cordão mais regular apresenta o menor  $IV_{cc}$  e uma frequência inferior à frequência de corte. O cálculo da frequência de corte é feito em função do tamanho da gota. De acordo com Scotti e Ponomarev (2014) o diâmetro da gota para o arame de 1,2 está entre 1,1 e 1,25 vezes o diâmetro do arame. Assume-se que tal relação também é válida para o arame de 0,6 mm. Com isso, o menor valor da gota fornece o limite superior da frequência de corte. Tal valor é utilizado para cálculo da frequência de corte, e velocidade de alimentação usada para esses testes é de 15 m/min, valor usado para o cálculo da frequência de corte calculada pela Equação 2.5.

$$F_{corte} = \frac{3V_{alim}d^2}{2d_g^3}$$

$$F_{corte} = \frac{3 * 15 * \left(\frac{1000}{60}\right) * 0,6^2}{2 * (0,6 * 1,1)^3}$$

$$F_{corte} = 469,57 \text{ Hz}$$

Assim, deve-se selecionar o teste com menor  $IV_{cc}$ , calculado a partir da Equação 2.4, e com a frequência inferior à frequência de corte para obter o cordão com melhor regularidade.

Para os testes seguintes, inclusive aqueles com os arames de maior bitola, a DBCP utilizada foi de 12 mm, e o substrato utilizado foi o de 150 mm x 150 mm x 13 mm. A velocidade de alimentação foi de 15 m/min e a vazão de gás de 10 L/min. A tensão ajustada na fonte foi variada para encontrar a condição com melhor regularidade usando o Critério Laprosolda para Regularidade de Transferência MIG/MAG com Curto-Circuito. A velocidade de deslocamento foi ajustada em 1000 mm/min. Os resultados são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Cordões depositados com gás Ar + 25%CO<sub>2</sub>, velocidade de alimentação 15 m/min e DBCP=12 mm

Teste	Tensão (V)	Corrente (A)	$IV_{cc}$	F (Hz)
8	27,0	126	0,8021	27,71
9	28,0	131	0,6651	21,46
10	29,0	137	1,2524	14,50

À medida que a tensão é aumentada, a corrente também aumenta, a frequência de curtos-circuitos diminui e o  $IV_{cc}$  atinge um valor mínimo no Teste 9, que tem como resultado um valor de frequência dentro da frequência de corte. Por isso os parâmetros obtidos no Teste 9 foram os utilizados para a confecção das próximas paredes. Os testes foram realizados variando a velocidade de deslocamento, que parte de 1000 mm/min e foi diminuída gradativamente. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Paredes depositadas com velocidade de alimentação 15 m/min, tensão 28 V e DBCP=12 mm

Parede	Corrente Média (A)	Vd (mm/min)
5	130	1000
6	133	900
7	130	800
8	137	700
9	138	600
10	141	500

As velocidades de deslocamento adotadas inicialmente foram muito elevadas. Com isso, para as Paredes 5 a 7 as corcundas já se formaram na terceira camada. Para as Paredes 8 e 9 as corcundas apareceram apenas na Camada 4. Já para a Parede 10, o arame embola no alimentador durante a deposição da Camada 5, e as corcundas ainda não aparecem, porém, a parede apresenta uma espessura muito alta, novamente entre 5 e 6 mm. Isso mostrou que para esse nível de velocidade de alimentação as paredes construídas não apresentam uma boa resolução, porque uma elevada alimentação faz com que mais material seja depositado, mas isso não permite que a velocidade de deslocamento seja elevada. As velocidades de deslocamento mais elevadas, com cerca de 1000 mm/min são aplicadas somente para a confecção de cordões, já que assim normalmente ficam livres de defeitos, mas ao depositar várias camadas os defeitos aparecem. A Parede 10 pode ser vista na Figura 4.4 e o ponto onde o arame enrolou é observado bem no meio da parede.



Figura 4.4 - Parede 10, tensão 28,0 V, alimentação 15 m/min e velocidade de deslocamento de 500 mm/min

A Parede 10 depositada não enfrentou problemas com corcundas, entretanto apresentou uma largura elevada e o arame embolou no alimentador durante a deposição. Com os mesmos parâmetros da Parede 10, outras paredes foram depositadas, apenas para conferência dos resultados. As duas paredes são mostradas na Figura 4.5. Foram depositadas 7 camadas em cada uma delas. As duas paredes apresentavam irregularidades nas porções inicial e final da deposição. Em uma delas as irregularidades se estendiam até o meio da parede, sendo que ao repetir o processo, na parede seguinte a parte central já se apresentou de maneira mais regular. Mas para os dois casos as paredes ainda apresentavam elevadas larguras, o que reforça que os níveis de alimentação são elevados, e que há a necessidade de diminuir tais valores para a obtenção de paredes adequadas, com menores larguras.



Figura 4.5 - Paredes depositadas com mesmos parâmetros da parede 10

É importante notar que, tanto para a transferência goticular quanto por modo curto-circuito, as corcundas se formam para velocidades de deslocamento elevadas, e ao diminuir essa velocidade é perceptível que esse efeito vai diminuindo. Além disso, para os dois modos, foi possível observar também, que para a velocidade de 500 mm/min as paredes começam a ficar livres dos problemas de corcundas.



É bom ressaltar que as corcundas se formam de maneira abrupta. Ao depositar uma camada ela está visualmente com boa qualidade, mas ao depositar a camada seguinte as corcundas já se formam. Esse fato pode ser visualizado na Figura 4.6, que mostra a construção da Parede 5 camada a camada. Na primeira camada o cordão depositado tem boa aparência, na segunda camada também está aparentemente bom, porém na terceira camada grandes corcundas já se formam.



Figura 4.6 – Evolução das camadas na Parede 5, tensão 28,0 V, alimentação 15 m/min e velocidade de deslocamento de 1000 mm/min. Camada 1, 2 e 3, de cima para baixo.

Para tentar obter paredes mais finas passa-se a utilizar velocidades de alimentação mais baixas, pois é esperado que ao manter a velocidade de deslocamento e diminuir a velocidade de alimentação, menos material seja depositado, o que permitiria a confecção de paredes mais finas. Para essa nova rodada de testes, nenhum equipamento é trocado, apenas os parâmetros são alterados. A nova velocidade de alimentação utilizada é de 5 m/min. A partir do momento em que a velocidade de alimentação é alterada, é necessário realizar a parametrização novamente, a fim de obter o cordão com a melhor regularidade para construção da parede. Uma nova frequência de corte precisa ser calculada, já que essa depende da velocidade de alimentação. Novamente assume-se que o diâmetro da gota está entre 1,1 e 1,25 vezes o diâmetro do arame. Utilizando a Equação (2.5) a frequência de corte é calculada.



$$F_{corte} = \frac{3 * 5 * \left(\frac{1000}{60}\right) * 0,6^2}{2 * (0,6 * 1,1)^3}$$

$$F_{corte} = 156,52 \text{ Hz}$$

Os testes feitos são mostrados na Tabela 4.6. Para a parametrização, a velocidade de deslocamento utilizada foi de 500 mm/min. Os valores de frequência estão todos adequados, abaixo da frequência de corte. Os Testes 15, 16 e 17 utilizaram os mesmos parâmetros dos Testes 11 a 13 e foram repetidos, apenas para conferência dos resultados.

Tabela 4.6 - Testes com velocidade de alimentação de 5 m/min e DBCP=12 mm

Teste	Tensão (V)	Corrente (A)	IV <sub>cc</sub>	F (Hz)
11	18,0	55	0,3227	95,64
12	19,0	57	0,2406	69,64
13	20,0	58	0,3849	51,17
14	21,0	57	0,8068	20,10
15	18,0	58	0,2904	93,43
16	19,0	58	0,2535	69,86
17	20,0	57	0,4081	48,86

Com a tensão de 19,0 V e velocidade de alimentação de 5,0 m/min, as paredes foram depositadas, partindo da velocidade de deslocamento de 600 mm/min e diminuindo gradualmente. As especificações das paredes feitas são mostradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Paredes com tensão 19 V e alimentação de 5 m/min

Parede	Corrente Média (A)	Vd (mm/min)
11	57	600
12	57	500
13	58	400

Para a Parede 11, as corcundas começam a aparecer a partir da Camada 5. Já para a Parede 12, aparece um resultado positivo: 9 camadas e uma parede com qualidade boa, sem corcundas. Para a Parede 13, outro bom resultado, porém o arame embolou no alimentador durante a deposição da Camada 6. Ainda um teste com a velocidade de deslocamento de 550 mm/min foi feito, mas os resultados não foram satisfatórios, com corcundas na Camada 7. As Paredes 12 e 13 são mostradas nas Figuras 4.7 e 4.8.

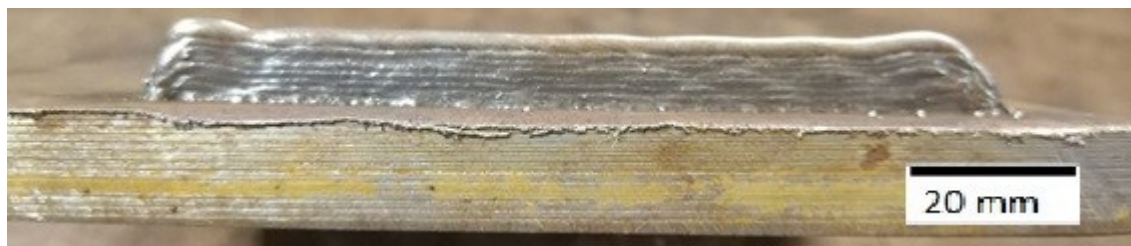


Figura 4.7 - Parede 12, com 9 camadas, e velocidade de deslocamento de 500 mm/min

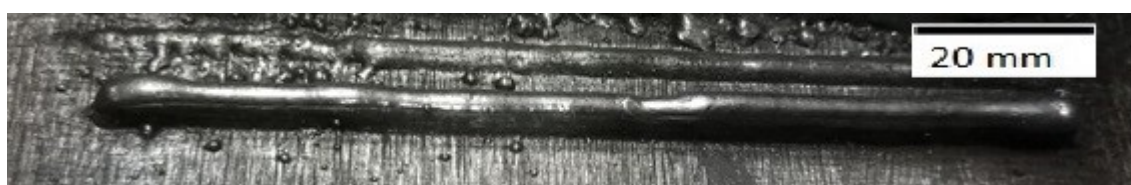


Figura 4.8 - Parede 13, com 6 camadas e velocidade de deslocamento de 400 mm/min. É possível notar o ponto em que o arame enrolou no alimentador, próximo ao meio da parede

Os dois resultados foram considerados satisfatórios. Mas o objetivo é encontrar a parede mais fina possível, e com isso a Parede 12 foi analisada, já que ela foi depositada com uma maior velocidade de deslocamento e consequentemente apresentou uma menor largura. A Parede 12 foi cortada em uma cortadora metalográfica e após isso a superfície de interesse foi lixada com as lixas de 180, 220, 320, 400, 600, 1200 de granulometria, nessa ordem, alternando a direção em que o lixamento era realizado, sendo que com uma lixa era lixado na horizontal, e na lixa seguinte na vertical. Após isso foi realizado o polimento com alumina de 1 micron e ataque com Nital 10%, para que seja possível realizar macrografia conforme Figura 4.9, onde se observa a constância da largura e baixa ondulação lateral. Esses resultados evidenciam a qualidade do depósito, que obteve largura média de 2,95 mm. A largura média foi calculada como a média das larguras da parede em diversos pontos da seção.

Com estes resultados, uma nova parede foi depositada. Todos os parâmetros da Parede 12 foram repetidos para a construção da Parede 14, cujas especificações se encontram na Tabela 4.8. Nessa parede foram depositadas 20 camadas, e ela é mostrada na Figura 4.10. Esse resultado também mostra um depósito de grande qualidade. Algumas ondulações são visíveis na última camada da parede, mas de uma forma bem suave, o que é aceitável. A Figura 4.11 apresenta os dados obtidos de tensão e corrente ao longo do tempo para a primeira camada da Parede 14. Nessa figura é possível observar o

comportamento característico do modo de transferência por curto-circuito, onde a tensão cai bruscamente quando a gota toca a poça, dando início ao curto-circuito. O nível de tensão permanece baixo até o fim do curto-circuito, e após o destacamento da gota o nível se eleva. Enquanto isso a corrente aumenta rapidamente quando há o contato da gota na poça de fusão, decaindo após o fim do curto-circuito. Cada vez que a gota toca a poça de fusão ocorre um curto-circuito, e o número de curtos-circuitos durante o processo é utilizado para calcular a frequência de curto-circuito.

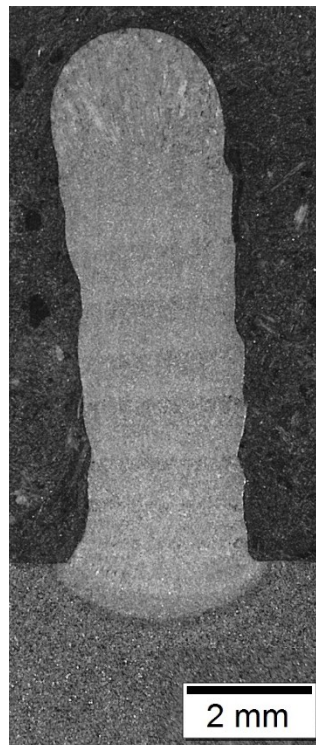


Figura 4.9 - Macrografia da Parede 12 depositada



Figura 4.10 - Parede 14, com 20 camadas, e velocidade de deslocamento de 500 mm/min

Tabela 4.8 - Parede 14, com alimentação de 5 m/min

Parede	Tensão (V)	Corrente Média (A)	Vd (mm/min)
14	19,0	56	500

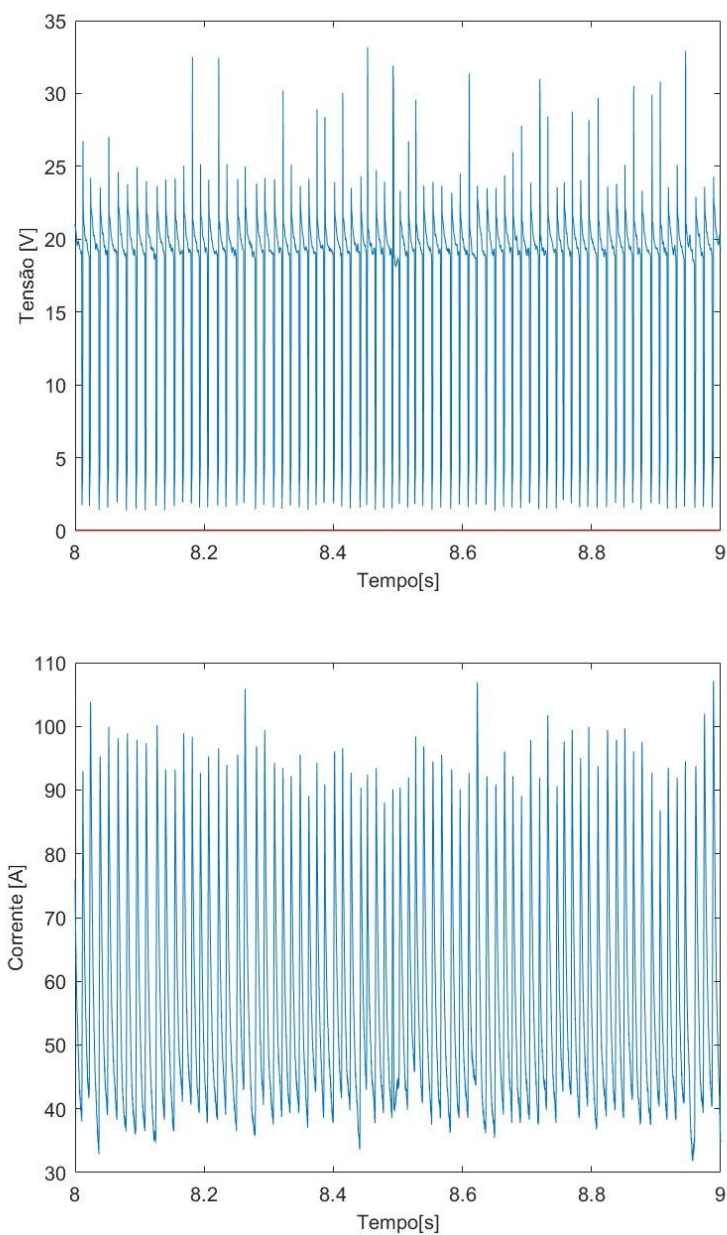


Figura 4.11 - Gráficos de tensão e corrente pelo tempo durante deposição da primeira camada da parede 14.

No intuito de encontrar uma parede mais fina, duas abordagens podem ser utilizadas. A primeira é aumentar a velocidade de deslocamento e a segunda é diminuir a velocidade de alimentação. A primeira opção já foi observada, e os testes com velocidade de deslocamento de 550 e 600 mm/min não apresentaram bons resultados, com corcundas nas paredes. Durante os primeiros testes foram utilizadas velocidades de alimentação bem elevadas, de cerca de 15 m/min, e com a diminuição da velocidade de alimentação e mantendo a velocidade de deslocamento, pode-se observar melhores resultados. Por isso reduzir a velocidade de alimentação é um caminho viável. Entretanto, vários testes foram feitos para o arame de 0,6 mm com velocidades de alimentação de 4,0; 3,0 e 2,0 m/min, mas os resultados não foram satisfatórios, pois os cordões de solda apresentavam descontinuidades, possivelmente pela baixa alimentação utilizada. Portanto chegou-se à conclusão que para o arame de 0,6 mm, a menor velocidade de alimentação a ser utilizada é de 5,0 m/min.

Um fato que já havia sido observado anteriormente se repete nesses testes. É interessante notar que tanto para transferência goticular, quanto para transferência por curto-circuito, seja com alimentações mais elevadas, ou em menores níveis, as paredes ficaram livres de corcundas para velocidades de deposição semelhantes, sempre próximas a 500 mm/min. Assim, os efeitos de *humping* são independentes da alimentação, mas dependentes da velocidade de deslocamento.

Isso vai em linha com que os autores indicam para a soldagem, como Badstreet (1968), que afirmou que a velocidade de deslocamento é o principal fator causador do *humping*. Segundo ele, outros fatores também podem causar esse efeito, como tensão, condição da superfície a ser soldada, composição do metal de base, entre outros. Entretanto, para esses experimentos conclui-se que a velocidade de deslocamento é o fator que mais afeta, e para o arame de 0,6 mm, velocidades de deslocamento não devem ultrapassar valores de 500 mm/min, sendo que a ocorrência do *humping* se torna bem mais frequente para níveis acima desse.

Outras paredes apresentaram resultados medianos, mas foram descartados, como a da Figura 4.12, que apresentou defeitos nas extremidades inicial e final da parede, mas o meio da parede teve uma boa qualidade. É observado que na parte direita da parede um defeito se formou nas camadas iniciais, e esse defeito foi se prolongando ao longo de todas as camadas, até chegar com uma grande descontinuidade na camada final. Já na parte esquerda da parede, uma descontinuidade também se forma nas camadas iniciais, e o defeito segue durante a deposição das camadas seguintes.

No entanto, durante a deposição das últimas camadas, um cordão é depositado continuamente sobre esse defeito, formando um pequeno buraco no meio da parede. Isso é um efeito indesejado na Manufatura Aditiva, pois a formação de vazios compromete a integridade da peça. Foram depositadas 18 camadas, com os mesmos parâmetros da Parede 12. Destaca-se que esse resultado foi importante para chegar no sucesso da Parede 14, já que foi observado que durante a abertura do arco havia um acúmulo de material na porção inicial do cordão, pois a tocha fica um tempo programado na posição inicial até que a poça de fusão se forme, sendo que ela somente começa a se deslocar na velocidade de deslocamento programada após esse tempo.

Dessa forma, o parâmetro de tempo de espera da tocha durante o início da deposição foi diminuído por meio de programação, fazendo com que a parede seguinte (parede 14) fosse depositada com sucesso. Isso aconteceu com certa frequência durante os testes. Porém, alterar o tempo de espera resolvia o problema na maioria dos casos. Esse tempo de esperava normalmente foi programado para valores entre 1 e 2 segundos, o que garantia a formação de uma poça de fusão adequada, e sem que haja um acúmulo de material na porção inicial da deposição. Esse resultado segue em linha com o que os autores indicam, como Hu (2018) que mostra que a geometria das paredes normalmente é mais irregular nas porções inicial e final da deposição.

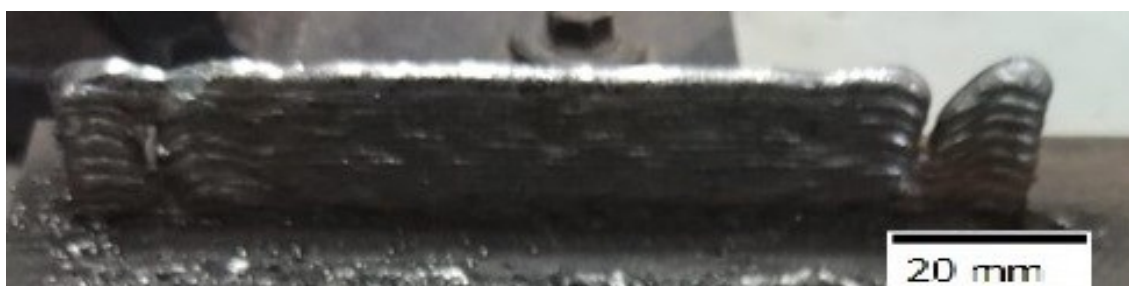


Figura 4.12 - Parede com falta de preenchimento nas porções inicial e final

#### 4.3 Deposição com arame de 0,9 mm, transferência curto-circuito

Os testes com o arame de 0,6 mm, com o modo de transferência goticular e com modo de transferência por curto-circuito com velocidade de alimentação elevada, não trouxeram resultados satisfatórios. Foi encontrado que para velocidades de deslocamento superiores a 500 mm/min, havia a ocorrência de *humping*, independente da alimentação

utilizada. Com isso, com alimentações maiores, as paredes depositadas apresentavam larguras elevadas, enquanto que alimentações menores apresentaram os melhores resultados. Portanto, os testes com os arames seguintes foram realizados apenas utilizando o modo de transferência por curto-circuito com alimentação em níveis mais baixos.

Para realização dos testes com o arame de 0,9 mm, os mesmos procedimentos são adotados. Assim, primeiramente, é necessário calcular os parâmetros a serem usados, com base nos parâmetros ideais utilizados com o arame de 0,6 mm. Deseja-se manter a área da seção constante, e para isso a relação entre alimentação e deslocamento é calculada. Então, inicialmente é usada a Equação 2.12 para cálculo da constante para o arame de 0,6 mm, e depois o valor dessa constante é utilizado para cálculo dos parâmetros para o arame de 0,9 mm. Os valores utilizados para o arame de 0,6 mm são:  $V_a = 5,0$  m/min,  $V_d = 500$  mm/min (0,5 m/min).

$$\frac{V_{a0,6}}{V_{d0,6}} * d_{0,6}^2 = cte$$

$$cte = \frac{5}{0,5} * 0,6^2 = 3,6$$

Dois casos são testados: um mantendo constante a velocidade de alimentação usada para o arame de 0,6 mm, e outro mantendo a velocidade de deslocamento para o arame de 0,6. Assim é possível realizar o cálculo dos parâmetros. A Equação 2.12 novamente é utilizada. Num primeiro momento a velocidade de deslocamento é mantida constante (500 mm/min), e tem-se o seguinte cálculo:

$$\frac{V_{a0,9}}{V_{d0,9}} * d_{0,9}^2 = cte$$

$$\frac{V_{a0,9}}{0,5} * 0,9^2 = 3,6$$

$$V_{a0,9} = 2,22 \frac{m}{min}$$

Assim, se a velocidade de deslocamento for mantida em 500 mm/min, a velocidade de alimentação a ser utilizada deve ser de 2,22 m/min. A resolução do alimentador é de 0,1 m/min, ou seja, a velocidade a ser utilizada é de 2,2 m/min. Analogamente, mantendo a velocidade de alimentação em 5,0 m/min, chega-se a um resultado de velocidade de deslocamento de 1125 mm/min. Também foram calculados os

valores para alimentação de 3,0 e 4,0 m/min, que são velocidades entre os valores máximos e mínimos de alimentação calculadas. Os parâmetros a serem utilizados são indicados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Parâmetros calculados a serem utilizados para o arame de 0,9 mm.

Va (m/min)	Vd (mm/min)
5,0	1125
4,0	900
3,0	675
2,2	500

Para esses experimentos foram trocados o arame, o bico de contato e os roletes no alimentador, todos adequados para a deposição com o arame de 0,9 mm. Tanto o gás utilizado, como sua vazão, e DBCP são mantidos os mesmos dos utilizados nos testes para o arame de 0,6 mm. O Critério Laprosolda para Regularidade de Transferência MIG/MAG com Curto-Circuito é utilizado para encontrar a condição de melhor regularidade. Para isso, primeiramente a frequência de corte é calculada, usando a recomendação de que o diâmetro da gota é de 1,1 vezes o diâmetro do arame. O primeiro caso testado é para alimentação de 5 m/min.

$$F_{corte} = \frac{3 * 5 * \left(\frac{1000}{60}\right) * 0,9^2}{2 * (1,1 * 0,9)^3}$$

$$F_{corte} = 104,34 \text{ Hz}$$

Os cordões foram depositados com a velocidade de alimentação de 5 m/min, velocidade de deposição de 1125 mm/min, e a tensão subindo gradativamente. Para encontrar o cordão mais regular, deve-se encontrar o menor  $IV_{cc}$  com uma frequência de curto-circuito dentro da frequência de corte. Os resultados obtidos são indicados na Tabela 4.10.



Tabela 4.10 - Parametrização para arame 0,9 mm, velocidade de alimentação 5,0 m/min.

Teste	Tensão (V)	Corrente (A)	IV <sub>cc</sub>	F (Hz)
18	18,0	100	2,5182	42,00
19	19,0	115	1,5195	105,67
20	20,0	115	0,9001	91,67
21	21,0	115	0,4454	72,20
22	22,0	118	0,4706	56,20

Entre os valores de frequência de curto-circuito calculadas, apenas a do Teste 19 apresentou um valor acima da frequência de corte, o que implica no descarte dessa condição de trabalho. Dentre os outros testes, o que apresentou menor IV<sub>cc</sub> foi o Teste 21, ou seja, condição com melhor regularidade. Essa condição foi usada para deposição da Parede 15, mostrada na Figura 4.13. Foram depositadas 4 camadas e, como observado na figura, corcundas são formadas na parede, e isso ocorre devido a elevada velocidade de deslocamento utilizada.



Figura 4.13 - Parede 15 para arame 0,9 mm. Tensão 21 V, alimentação 5 m/min

Com o objetivo de produzir uma parede livre de corcundas, a velocidade de deslocamento foi diminuída gradativamente, e paredes foram depositadas à medida que a velocidade era reduzida. Reduzir apenas a velocidade de deslocamento implica em não manter a relação entre a alimentação e deslocamento, e consequentemente a área da seção não se mantém constante, mas optou-se por fazer essa investigação para verificar o aspecto da melhor parede que poderia ser produzida com essa alimentação. Quando a velocidade de deslocamento chegou a 700 mm/min, consegue-se obter uma parede sem corcundas, com boa qualidade, apenas com irregularidades nas extremidades da parede. Foram depositadas 8 camadas, porém a parede depositada era visivelmente mais espessa que a fabricada com o arame de 0,6 mm. A parede é mostrada na Figura 4.14. Velocidades superiores a 700 mm/min implicaram na ocorrência de corcundas ao longo das paredes.



Figura 4.14 - Parede depositada com alimentação 5 m/min e deslocamento de 700 mm/min.

Para fabricação das paredes seguintes, novas parametrizações foram necessárias para encontrar as condições mais regulares para deposição, o que é feito utilizando o mesmo procedimento utilizado anteriormente. Os parâmetros utilizados e os resultados obtidos nos testes feitos para as velocidades de alimentação de 4,0; 3,0 e 2,2 m/min são resumidos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Parametrização e resultados para os cordões com velocidades de alimentação de 2,2, 3 e 4 m/min.

Teste	Va (m/min)	Vd (mm/min)	Tensão (V)	Corrente (A)	IV <sub>cc</sub>	F (Hz)	F <sub>c</sub> (Hz)
23	4,0	900	18,0	89	0,6495	93,56	83,47
24		900	19,0	90	0,3314	81,75	83,47
25		900	20,0	92	0,5809	64,22	83,47
26	3,0	675	17,0	67	0,5572	61,78	62,60
27		675	18,0	67	0,43	55,75	62,60
28		675	19,0	69	0,5011	37,07	62,60
29		675	20,0	68	1,47	11,56	62,60
30	2,2	500	15,0	46	1,3693	31,3	45,91
31		500	16,0	46	0,7172	35,2	45,91
32		500	17,0	46	0,7674	19,55	45,91
33		500	18,0	47	1,1074	5,9	45,91

Como o diâmetro do arame é de 0,9 para todos os testes apontados na Tabela 4.11, a frequência de corte dependerá apenas da velocidade de alimentação usada, já que considera-se que o diâmetro da gota formada tenha um valor constante, de 1,1 vezes o diâmetro do arame, ou seja, para uma mesma velocidade de alimentação, a mesma frequência de corte é calculada. Os Testes 24, 27 e 31, com a frequência de curto-circuito dentro da frequência de corte e com menor IV<sub>cc</sub>, condições de melhor regularidade, aparecem em destaque na Tabela 4.11. Para cada uma dessas condições uma nova parede foi depositada. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Paredes 15 a 18, depositadas a partir dos cordões 21, 24, 27 e 31, respectivamente

Parede	Va (m/min)	Vd (mm/min)	Tensão (V)	Corrente (A)
15	5,0	1125	21,0	115
16	4,0	900	19,0	91
17	3,0	675	18,0	65
18	2,2	500	16,0	48

As Paredes de 15 a 18 não apresentaram resultados satisfatórios, com formação de corcundas em todas elas. Entretanto, ficou evidente que as corcundas diminuía de intensidade à medida que as velocidades de alimentação e deslocamento eram reduzidas. Sendo assim, optou-se por utilizar a menor velocidade de alimentação testada, ou seja, da Parede 18, e diminuir a velocidade de deslocamento, até que se atingisse uma parede livre de corcundas.

Ao utilizar a velocidade de deslocamento de 400 mm/min a deposição apresentou um resultado de qualidade: uma parede com 8 camadas (Parede 19) e com uma espessura visualmente semelhante à alcançada com o arame de 0,6 mm. O teste foi repetido com os mesmos parâmetros e uma parede com 20 camadas (Parede 20) foi depositada. A parede se mostrou bem regular, sem problemas nas extremidades e com uma boa qualidade superficial. A espessura média alcançada foi de 2,8 mm. Os resultados são apresentados na Tabela 4.13 e as paredes obtidas são mostradas na Figura 4.15. A Figura 4.16 mostra os gráficos de tensão e corrente pelo tempo, durante a deposição da primeira camada da Parede 20. Novamente os resultados evidenciam o modo de transferência por curto-circuito.

Tabela 4.13 - Paredes depositadas com tensão 16 V e alimentação 2,2 m/min

Parede	Camadas	Vd (mm/min)	Corrente (A)
19	8	400	45
20	20	400	46



Figura 4.15 - Paredes 19 (acima) e 20 (abaixo)

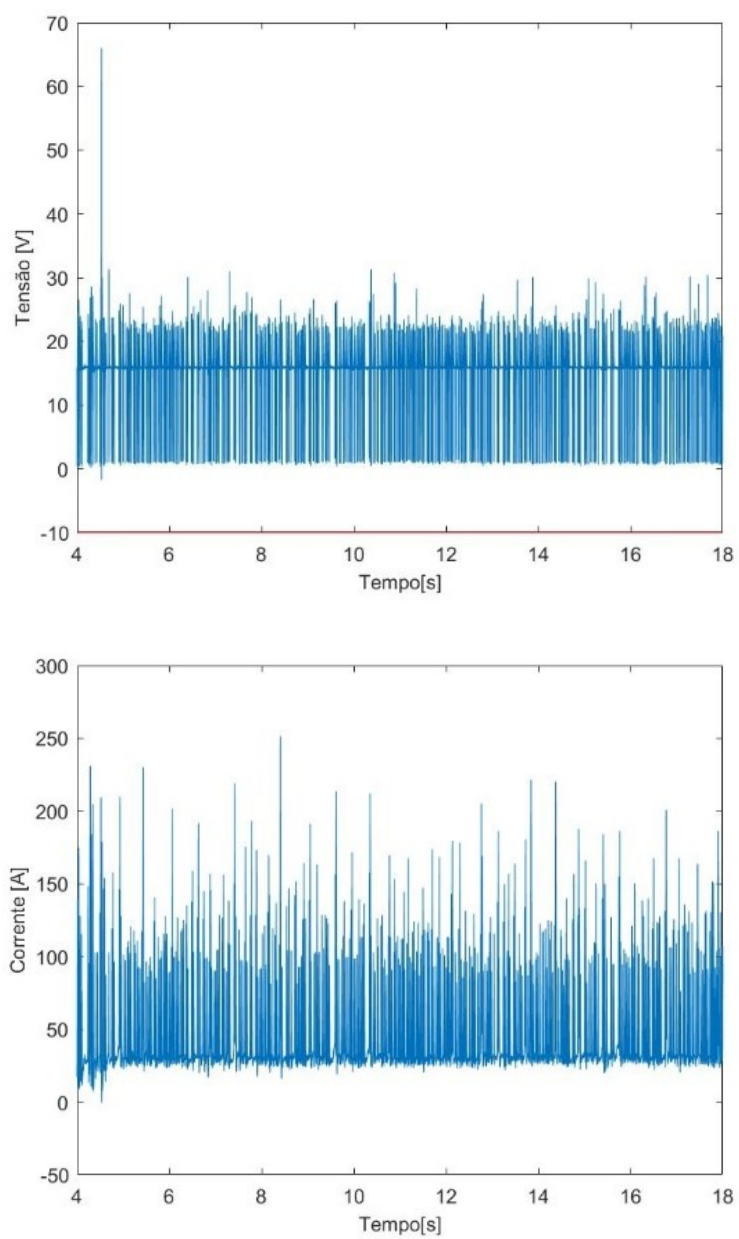


Figura 4.16 - Gráficos tensão e corrente pelo tempo para a camada 1 da parede 20

Destaca-se que trabalhar com o arame de 0,9 mm se mostrou uma tarefa bem mais simples que trabalhar com o arame de 0,6 mm. O arame não embolou no alimentador nenhuma vez, e o bico de contato não fundiu, problemas que eram recorrentes ao utilizar o arame de 0,6 mm. Além disso, com o arame de 0,9 mm, cordões eram depositados utilizando velocidades de alimentação inferiores a 5,0 m/min sem problemas, o que não foi possível com o arame de 0,6 mm.

Apesar da relação entre as velocidades de alimentação e deslocamento não ter sido mantida, o que implica que a área da seção não se manteve constante, a parede depositada apresentou qualidade tão boa quanto a alcançada com o arame de 0,6 mm. A espessura média da parede com o arame de 0,9 é inferior àquela alcançada com o arame de 0,6 mm, e a altura média é superior, mesmo com as duas paredes tendo 20 camadas depositadas. Como a velocidade de deslocamento foi reduzida em relação a ideal para manter a área da seção constante, é esperado que o volume da parede com o arame de 0,9 seja superior à parede depositada com o arame de 0,6 mm. Sendo assim, como a largura da parede com 0,9 mm é menor, é esperado que a altura seja maior, o que vai de acordo com o que realmente aconteceu. É necessário a medição dos volumes depositados para constatar se o volume da parede com 0,9 mm realmente é superior, o que será feito na seção 4.5. Ainda foram realizadas tentativas de depositar cordões com velocidade de alimentação de 1 m/min, mas os cordões não apresentaram boa qualidade, pois a alimentação é muito baixa.

#### 4.4 Deposição com arame de 1,2 mm, transferência curto-circuito

Para deposição com o arame de 1,2 mm, os parâmetros a serem utilizados foram calculados, assim como foi feito para o arame de 0,9 mm. Utilizando a mesma constante encontrada para o arame de 0,6, com o valor de 3,6, foram calculados os valores de alimentação e deslocamento com a utilização da Equação 2.12. Novamente foram assumidas duas hipóteses, uma com a velocidade de alimentação constante e outra com a velocidade de deslocamento constante, sendo encontrados valores de alimentação de 1,2 e 5,0 m/min. Também foram calculados os deslocamentos para as velocidades de alimentação entre 1,2 e 5,0 m/min. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Parâmetros a serem utilizados para o arame de 1,2 mm

Va (m/min)	Vd (mm/min)
5,0	2000
4,0	1600
3,0	1200
2,0	800
1,2	500

Para esses experimentos foram alterados o arame, o bico de contato e os roletes no alimentador, todos adequados para a deposição com o arame de 1,2 mm. Além destes, o conduíte na tocha também foi alterado, pois segundo recomendação do fabricante, o conduíte utilizado para os arames de 0,6 e 0,9 mm não é adequado para utilização com o arame de 1,2 mm. Tanto o gás utilizado como a DBCP são mantidos os mesmos dos utilizados nos testes para os arames de 0,6 mm e 0,9, entretanto a vazão foi aumentada para 12 L/min, por se tratar de um arame de maior bitola, respeitando a regra prática de uma vazão de 10 vezes superior ao diâmetro do arame. Na Tabela 4.15 são calculadas as frequências de corte para cada uma das alimentações a serem utilizadas, obtidas da Tabela 4.14, considerando o diâmetro da gota com valor de 1,1 vezes o diâmetro do arame.

Tabela 4.15 - Frequência de corte para cada um dos testes.

Va (m/min)	F <sub>c</sub> (Hz)
5,0	78,26
4,0	62,60
3,0	46,96
2,0	31,30
1,2	19,56

O Critério Laprosolda para Regularidade de Transferência MIG/MAG com Curto-Circuito é utilizado para encontrar as condições mais regulares para cada uma das alimentações utilizadas. Os testes feitos são indicados na Tabela 4.16 e as condições mais regulares para cada velocidade de alimentação aparecem em destaque.

Tabela 4.16 - Parametrização para o arame de 1,2 mm, vazão de gás 12 L/min e DBCP 12 mm

Teste	Va (m/min)	Vd (mm/min)	Tensão (V)	Corrente (A)	IV <sub>cc</sub>	F (Hz)
34	5,0	2000	18,0	174	-	-
35	5,0	2000	19,0	179	-	-
36	4,0	1600	18,0	174	-	-
37	4,0	1600	19,0	170	-	-
38	3,0	1200	18,0	123	-	-
39	3,0	1200	19,0	125	-	-
40	2,0	800	16,0	81	1,0792	33,14
41	2,0	800	17,0	78	0,7144	29,29
42	2,0	800	18,0	79	0,8347	28,67
43	2,0	800	19,0	77	1,4997	16,21
44	1,2	500	16,0	32	-	-
45	1,2	500	17,0	36	-	-
46	1,2	500	18,0	34	-	-

Os cordões depositados para os Testes de 34 a 39 apresentaram grandes descontinuidades, provavelmente devido à elevada velocidade de deslocamento combinada com baixa alimentação do arame. Com a velocidade de alimentação de 1,2 m/min o mesmo problema ocorre. Por esse motivo, os valores de IV<sub>cc</sub> e de frequência de curto-circuito não são calculados para estes testes. Apenas para a velocidade de 2 m/min que os cordões depositados apresentam boa qualidade. E a condição com melhor regularidade, indicada na Tabela 4.16, foi com 17,0 V de tensão (Teste 41), usada para a fabricação da parede. Os parâmetros utilizados e os dados obtidos para as paredes depositadas são mostrados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Paredes depositadas com arame de 1,2 mm, tensão de 17 V e alimentação de 2 m/min

Parede	Vd (mm/min)	Camadas	Corrente (A)
21	800	4	80
22	700	3	81
23	600	11	80
24	500	20	74

A Parede 21 apresentou corcundas logo na camada 2. Ainda foram depositadas mais 2 camadas, até a camada 4, mas as corcundas só aumentaram. Sendo assim, a velocidade de deslocamento foi reduzida até a obtenção de paredes livres de corcundas.

A Parede 22 apresentou corcundas na deposição da camada 3. A velocidade de deslocamento foi diminuída, e na Parede 23 foram depositadas 11 camadas, mas ela apresentava corcundas, porém de forma bem mais suave.

A Parede 24 foi depositada com 20 camadas, e foi a que apresentou melhor qualidade, com uma leve ondulação em apenas uma das extremidades da parede.

As Paredes 23 e 24 são mostradas na Figura 4.17. A Figura 4.18 apresenta os gráficos de tensão e corrente pelo tempo de deposição na Camada 1 da Parede 24. Novamente é possível visualizar o comportamento característico do modo de transferência por curto-circuito.

A parede depositada com o arame de 1,2 mm teve boa qualidade, entretanto, visivelmente apresentou uma espessura superior àquelas alcançadas com os arames anteriores. A largura média encontrada foi de 3,2 mm. O arame de 1,2 mm é um dos mais utilizados na literatura no estudo da MADA e as larguras indicadas pelos autores são bem superiores a essa. Entende-se que o objetivo deles não é a obtenção de peças finas, mas apesar disso, isso pode ser usado como um ponto de comparação. Yang (2016) depositou paredes com e sem a utilização de um processo híbrido, que usa MIG/MAG e TIG como fontes de calor. Em seu estudo usa um arame de 1,2 mm de uma liga de aço, com alimentação de 4,21 m/min e velocidade de deslocamento de 300 mm/min. Utilizando apenas MIG/MAG, as paredes depositadas apresentaram largura média de 8,5 mm. Já com a utilização do processo híbrido, que inclui a utilização de TIG, as paredes chegaram a atingir larguras de 5,5 mm de espessura, apenas com a adição de determinada condição de TIG. Além disso, as superfícies laterais das paredes se mostraram mais regulares, com menores desvios geométricos, no processo híbrido.





Figura 4.17 - Paredes 23 (acima) e 24 (abaixo).

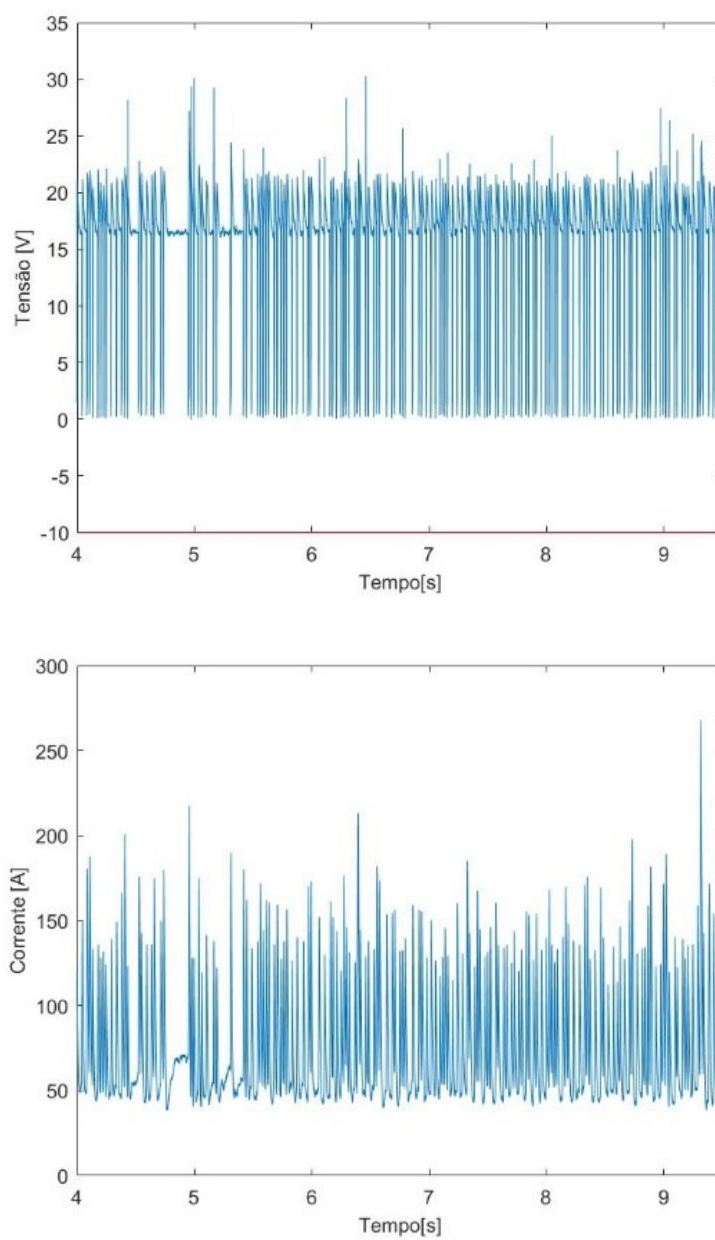


Figura 4.18 - Gráficos de tensão e corrente pelo tempo para camada 1 da parede 24

Zhang (2018) faz um estudo semelhante, porém seu processo híbrido é composto por MIG/MAG e laser como fontes de calor. O arame utilizado é de alumínio, com 1,2 mm de diâmetro, com uma alimentação de 6,5 m/min e uma velocidade de deslocamento de 600 mm/min. Utilizando apenas MIG/MAG, as paredes depositadas apresentaram largura média de 9,5 mm. Já com o uso de MIG/MAG combinado com laser, as paredes chegaram a atingir 8,5 mm de espessura, para determinadas potências de laser. Novamente o processo híbrido apresenta ganhos na qualidade superficial da parede. Isso mostra que as larguras obtidas foram bem menores que as indicadas pelos autores. Segundo eles, quando são utilizados os processos híbridos, há uma melhora em relação à largura da parede. Com isso, é de se imaginar que os resultados obtidos ainda podem ser melhorados com a inclusão de processos híbridos.

Além desses processos, arames de outros diâmetros também são estudados. González (2017) usa um arame de aço carbono com diâmetro de 0,8 mm, utilizando o processo CMT, e indica que quanto maior a intensidade da corrente, maior a espessura da parede. Em seus resultados mostrou que correntes de 50 A produziam paredes com largura de 3,0 mm, enquanto correntes de 70 A produziam paredes com espessura aproximada de 3,5 mm. Nesse trabalho foi usado o processo convencional, e acredita-se que ao usar o processo CMT larguras menores ainda possam ser obtidas. Silva (2018) usa um arame de alumínio de 1,0 mm, e utilizando a técnica de gerenciamento térmico RAQI (usada neste trabalho), deposita paredes com largura de 5 mm. O autor mostra que paredes sem o uso da técnica de gerenciamento térmico chegam a espessuras de 7,5 mm.

A operação com o arame de 1,2 mm também foi bem mais simples que com o arame de 0,6 mm. Os problemas de embolamento do arame no alimentador e de queima de bicos de contato não ocorreram com esse arame. Além disso foi possível a utilização de velocidades de alimentação inferiores a mínima alcançada com o arame de 0,6 mm.

Novamente a relação entre as velocidades de alimentação e deslocamento não foi mantida, o que implica que a área da seção transversal, e consequentemente o volume total, não se mantiveram constantes em relação à parede fabricada com arame de 0,6 mm.

É possível observar um aumento na corrente de deposição ao aumentar o diâmetro do arame e mantendo a velocidade de alimentação e a tensão constantes. Para uma alimentação de 5 m/min, o arame de 0,6 mm ofereceu uma corrente de aproximadamente 58 A, enquanto que para o arame de 0,9 mm foi obtida uma corrente de aproximadamente 115 A, e para o arame de 1,2 mm, 175 A.

#### 4.5 Comparação entre as paredes fabricadas

Com os melhores resultados obtidos para cada arame, novas paredes foram depositadas, todas com um comprimento total de 90 mm. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 4.18 e as paredes depositadas são mostradas nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21. Cada parede foi depositada com 20 camadas.

Tabela 4.18 - Paredes com 20 camadas para os arames de 0,6, 0,9 e 1,2 mm.

Parede	Diâmetro (mm)	Va (m/min)	Vd (mm/min)	Tensão (V)	Corrente (A)
25	0,6	5,0	500	19,0	54
26	0,9	2,2	400	16,0	46
27	1,2	2,0	500	17,0	83

Durante o depósito de cada uma das paredes foi observado que, com arame de 0,6 mm, se uma camada apresenta corcunda ou descontinuidade, as seguintes só pioram. Mas com arames de 0,9 mm e, principalmente de 1,2 mm, se alguma descontinuidade se forma, as camadas seguintes em alguns casos ainda conseguem apresentar bons resultados, corrigindo os defeitos. Esse foi um grande problema enfrentado, já que para o arame de 0,6 mm todas as camadas devem ter excelente qualidade, enquanto que para os arames de maior diâmetro, uma camada depositada com alguma irregularidade pode não ter seu efeito prolongado para as camadas seguintes.

As paredes depositadas apresentaram boa qualidade. A Parede 25 apresentou uma superfície bem regular, enquanto para as Paredes 26 e 27 pequenas descontinuidades se formaram na última camada. Ao observar as extremidades das paredes, nota-se que as Paredes 25 e 27 apresentaram leves inclinações, enquanto a Parede 26 é depositada com uma maior regularidade.



Figura 4.19 - Parede 25, com arame de 0,6 mm



Figura 4.20 - Parede 26, com arame de 0,9 mm



Figura 4.21 - Parede 27, com arame de 1,2 mm

A Figura 4.22 apresenta a vista lateral das Paredes 25, 26 e 27. É observado que ao aumentar o diâmetro do arame a altura da parede também aumenta, para um mesmo número de camadas. Isso provavelmente ocorre devido ao fato de que a relação entre as



velocidades de alimentação e de deslocamento não foram mantidas, sendo que, ao utilizar velocidades de deslocamento menores do que as calculadas, é esperado que os volumes depositados sejam maiores.

Para fazer uma comparação entre as paredes depositadas, serão medidas as eficiências de deposição de cada uma das paredes. A eficiência de deposição é a relação entre o volume efetivo, volume de uma peça após a usinagem, e o volume total. O volume efetivo é calculado através das dimensões efetivas da parede, enquanto que o volume total é calculado a partir de parâmetros utilizados para a deposição das paredes. As larguras médias das Paredes 25, 26 e 27 foram calculadas, e os resultados foram, respectivamente 2,9, 2,7 e 3,2 mm. As paredes são medidas com auxílio de um programa computacional. São calculados os valores de comprimento, largura e altura efetivos, além do comprimento total para cada uma das peças. As dimensões efetivas são calculadas a partir dos maiores retângulos que podem ser inscritos nas seções da parede. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.19.



Figura 4.22 - Vista lateral das Paredes 25, 26 e 27, respectivamente

Tabela 4.19 - Dimensões das paredes, em mm

Parede	Altura Efetiva (mm)	Comprimento Efetivo (mm)	Largura Efetiva (mm)	Comprimento Total (mm)
25	17,88	83,18	2,50	90,00
26	20,83	87,86	2,41	90,00
27	19,48	82,02	3,15	90,00

Um dos parâmetros utilizados no cálculo do volume total é a velocidade de alimentação do arame. Então é necessário confirmar se a velocidade de alimentação selecionada no alimentador está condizente com a velocidade real medida. Para o cálculo da velocidade real o alimentador é calibrado, sendo realizado o seguinte teste. Para cada um dos arames, a velocidade foi selecionada para a velocidade em que sua respectiva parede foi depositada. O arame é alimentado, sem abrir o arco, e o comprimento alimentado e o tempo de alimentação são medidos. A relação entre o comprimento alimentado e o tempo de alimentação fornece a velocidade de alimentação medida. Verificou-se que para as maiores velocidades selecionadas a alimentação medida era condizente com o informado, com erros da ordem de 1%, mas para velocidades mais baixas haviam erros elevados, superiores a 10%. Foram feitos três testes para cada arame e a velocidade média medida é apresentada na Tabela 4.20, que mostra as velocidades específicas selecionadas para a deposição de paredes para cada diâmetro de arame. Para os cálculos a seguir, as velocidades de alimentação medidas foram utilizadas.

Tabela 4.20 - Velocidades de alimentação calculadas para cada arame.

Arame (mm)	Va selecionada (m/min)	Va medida (m/min)
0,6	5,0	4,93
0,9	2,2	1,96
1,2	2,0	1,59

Com esses dados, as Equações 2.2 e 2.3 são utilizadas para o cálculo dos volumes totais e efetivos em cada uma das paredes. O cálculo do volume total é feito assumindo que não há respingos e que todo o volume fundido do arame é transferido para a parede.

$$VE = Ae * Le$$

$$VT = C * Va * \frac{Aa * n^{\circ} \text{ de camadas}}{Vd}$$

Onde,  $A_e$ = área efetiva (altura efetiva\*comprimento efetivo);  $L_e$ = largura efetiva;  $C$ = comprimento total;  $V_a$ = velocidade de alimentação;  $V_d$ = velocidade de deposição;  $A_a$ = área da seção do arame. As dimensões efetivas, para o cálculo do volume efetivo, foram calculadas com o auxílio de um programa computacional. Para calcular a eficiência da deposição (ED), basta dividir o volume efetivo pelo total, como indicado na Equação 2.1. Os resultados obtidos para cada parede são apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Cálculo das Eficiências de Deposição para cada parede

Parede	Volume Efetivo (mm <sup>3</sup> )	Volume Total (mm <sup>3</sup> )	Eficiência de Deposição (%)
25	3718,15	5018,12	73,05
26	4410,60	5611,04	78,61
27	5032,91	6473,69	77,77

A parede depositada com o arame de 0,9 mm, além de apresentar a menor largura média, também apresentou a melhor eficiência de deposição, ou seja, melhor aproveitamento do material depositado. Já a Parede 25 apresentou largura média inferior à Parede 27, mas a Parede 27 apresentou um melhor aproveitamento de material que a Parede 25. Assim, para esse caso, o arame de 0,6 não apresentou nenhum ganho, pois apesar de ter largura média e efetiva inferior ao arame de 1,2 mm, em comparação ao arame de 0,9 mm ele perde nesses dois quesitos, além de apresentar a menor eficiência de deposição dentre os arames estudados. A Figura 4.23 apresenta uma comparação entre a largura efetiva e a eficiência de deposição para cada um dos arames.

Outra questão é a dificuldade de se trabalhar com o arame de 0,6 mm, que segue em linha com o que indica Martins (2018) em seu trabalho. O principal problema enfrentado era o fato de o arame embolar no alimentador. Por ser muito fino isso o arame embolava com certa frequência. Alguns ajustes são necessários para diminuir esse problema, como a adaptação de um tubo guia que fique bem próximo dos roletes no alimentador, além de deixar a tocha com o mínimo de curvas possível, efetuar a limpeza do conduíte, manter adequada a pressão nos roletes, etc. Isso melhorava o processo, mas não evitava que o arame embolasse algumas vezes. Também se notou que o bico de contato fundia com frequência nos testes com alimentações maiores. Quando utilizadas alimentações de 5 m/min para baixo isso não mais aconteceu. Ao utilizar arames de

maiores diâmetros, nenhum desses problemas se repetiu, comprovando que é mais fácil trabalhar com arames de diâmetros maiores.

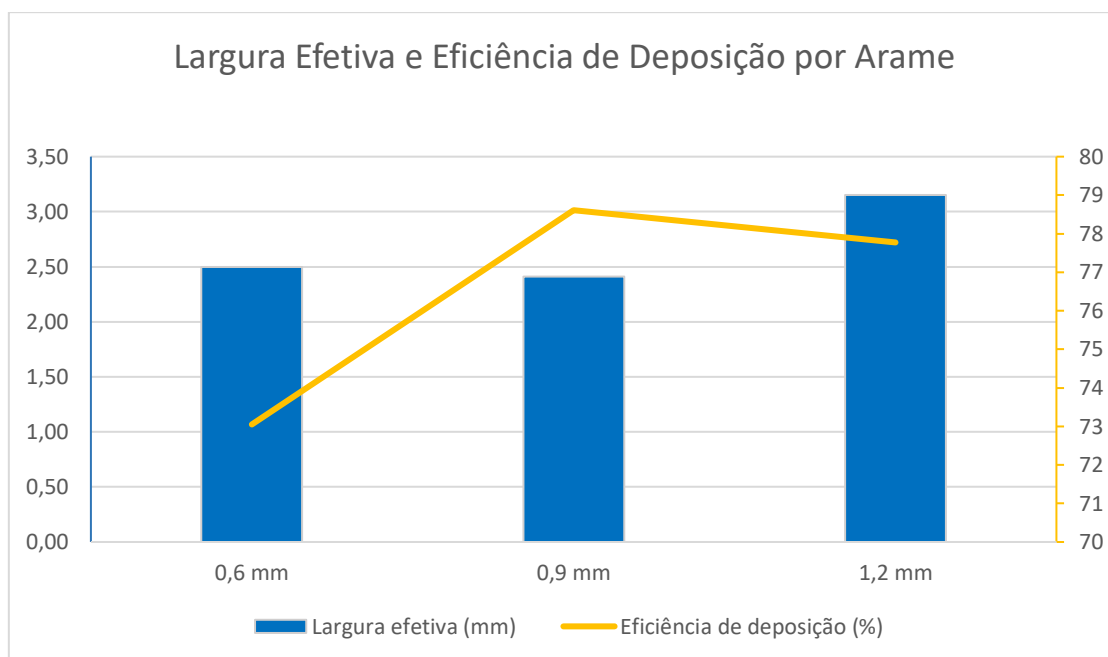


Figura 4.23 - Principais resultados para cada um dos arames

Como indicado na Equação (2.12), buscou-se manter uma relação entre as velocidades de alimentação e de deslocamento, à medida que se alterava o diâmetro do arame, com o objetivo de manter a área da seção depositada constante, para todos os arames utilizados. Como mostrado nas Seções 4.3 e 4.4, a partir dos parâmetros ideais encontrados para o arame de 0,6 mm, foram calculados os parâmetros para os arames de 0,9 e 1,2 mm. Entretanto, as paredes depositadas utilizando esses valores não apresentaram bons resultados, ocorrendo *humping* na maioria dos casos. Por isso a relação não foi mantida, e a velocidade de deslocamento foi diminuída até que a parede depositada apresentasse boa qualidade. Diminuir a velocidade de deslocamento implica em aumentar a área da seção, já que mais material está sendo depositado em um mesmo comprimento. Como os comprimentos totais para as 3 paredes depositadas são os mesmos, pode-se afirmar que se a relação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem fosse mantida, os volumes das três paredes deveriam ser iguais. Como a velocidade de deslocamento foi diminuída, é esperado que os volumes das Paredes 26 e 27 sejam superiores à da Parede 25, o que de fato ocorreu. Entretanto, é possível calcular se o volume se manteria constante se a relação entre as velocidades fosse mantida. Para isso, basta utilizar os valores inicialmente encontrados para os arames de 0,9 mm e de 1,2 mm para cálculo do volume total depositado. Para o arame de 0,9 mm, a velocidade de



alimentação era de 2,2 m/min, e a velocidade de deslocamento que mantinha a relação, era de 500 mm/min. Já para o arame de 1,2 mm, a velocidade de alimentação era de 2,0 m/min, e a velocidade de deslocamento que mantinha a relação era de 800 mm/min. No total seriam depositadas 20 camadas e o comprimento total da parede seria de 90 mm. Com esses parâmetros utiliza-se a equação 2.3 para cálculo do volume total da parede que teoricamente deveria ter sido construída. Para o arame de 0,9 mm, a parede a ser construída deveria ter volume de 5038,48 mm<sup>3</sup>. E para o arame de 1,2 mm, a parede a ser construída deveria ter volume de 5089,38 mm<sup>3</sup>. E a parede depositada com o arame de 0,6 mm apresenta volume de 5018,12 mm<sup>3</sup>. Com isso, a parede depositada com o arame de 0,9 mm apresentaria uma diferença de cerca de 0,4% no volume em relação a parede de 0,6 mm, enquanto que a parede com 1,2 mm, teria um volume cerca de 1,4% maior que a parede depositada com arame de 0,6 mm. Isso mostra que se os parâmetros definidos pudessem ser utilizados sem limitações, respeitando a relação entre as velocidades de alimentação e de deslocamento, as paredes depositadas apresentariam um volume relativamente constante, como esperado. Entretanto, como as relações entre as velocidades não foram mantidas constantes, a Parede 26 apresentou um volume cerca de 12% superior ao volume da Parede 25, e a Parede 27 apresentou um volume 29% superior ao da Parede 25.

Os resultados mostram que a baixa alimentabilidade do arame de 0,6 mm é um grande desafio a ser vencido na melhoria desse processo. Velocidades de alimentação mais baixas podem ser usadas para os arames de 0,9 e 1,2 mm, enquanto que para o arame de 0,6 mm isso não foi observado com a metodologia proposta. Isso ocorre devido as diferenças de área entre os arames: o arame de 0,9 mm possui área de seção transversal cerca de 2,25 vezes maior que do arame de 0,6 mm, enquanto que a área do arame de 1,2 mm é 4 vezes maior que a área do arame de 0,6 mm, o que justifica a limitação de utilizar o menor arame com velocidades de alimentação inferiores a 5,0 m/min. Entretanto, diferentes autores indicam formas de melhorar o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

Nesse sentido, algumas propostas seriam interessantes no sentido de contribuir a fim de tornar o processo capaz de depositar paredes cada vez mais finas e com um bom acabamento superficial. Como já citado anteriormente, uma das abordagens diz respeito ao uso de processos híbridos, onde são encontradas larguras de parede inferiores que dos processos convencionais. Outra abordagem diz respeito ao uso de novas tecnologias, como os processos de curto-circuito controlado, como o CMT. Esses processos tendem a

apresentar resultados mais regulares, com poucos ou nenhum respingo. No sentido de melhorar a qualidade superficial da parede, Xiong (2018) sugere maneiras de definir os parâmetros do processo. Segundo ele, a qualidade superficial pode ser aumentada significativamente ao diminuir a temperatura de interpasse. O autor conseguiu bons resultados com temperaturas de interpasse entre 20 e 120 °C, o que vai em linha com o que foi alcançado nesse trabalho. O autor indica também que aumentar a velocidade de alimentação está associado ao aumento da rugosidade superficial, enquanto que aumentar a velocidade de deslocamento geralmente melhora a qualidade superficial. Esse resultado também vai em linha com o que foi apresentado nesse trabalho, onde os melhores resultados foram obtidos com as menores velocidades de alimentação e com as maiores velocidades de deslocamento possíveis. O autor também chega à conclusão que ao manter constante a relação entre velocidade de alimentação e velocidade de deslocamento, a rugosidade superficial cresce com o aumento da velocidade de alimentação. Sendo assim, uma velocidade de alimentação baixa combinada com uma velocidade de deslocamento baixa tende a gerar superfícies com mais qualidade. No presente trabalho a relação entre alimentação e deslocamento também é mantida constante para os arames de 0,9 e 1,2 mm, a partir de dados coletados a partir das paredes depositadas com o arame de 0,6 mm. Entretanto, não foi possível depositar paredes com boa qualidade mantendo essa relação, pois o *humping* ocorreu nesses casos, mas foi observado no caso do arame de 0,9 mm, que diminuir a relação entre alimentação e deslocamento implicava em paredes melhores, sendo que os efeitos do *humping* tornavam-se mais suaves. Sendo assim esse resultado reforça o que o autor indicou em seu trabalho.

#### 4.6 Projeto da trajetória e fabricação de peça-padrão

Em grande parte dos estudos de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, os autores utilizam a deposição de paredes como objeto de estudo. Entretanto a deposição de paredes não reflete o que é buscado em indústrias. Fabricação de peças, seja para repor uma peça que não existe mais no mercado, ou para diminuir os custos de produção, é o principal objetivo em MADA. Com isso, as geometrias a serem depositadas geralmente apresentam curvas e cruzamentos. Com o objetivo de testar a viabilidade do uso do procedimento proposto, foi depositada a geometria indicada por Ding (2015a), mostrada na Figura 2.7. O objetivo aqui é testar se o procedimento utilizado se adequa a geometrias mais complexas, com cantos, curvas e cruzamentos. Para isso, as condições ideais para

cada um dos arames novamente foram utilizadas. Assim, a primeira peça-padrão fabricada, com arame de 0,6 mm e com os parâmetros da Parede 25, é mostrada na Figura 4.24 e os Códigos G de programação desenvolvidos para movimentação da tocha são mostrados no Apêndice A.

A primeira geometria foi depositada utilizando uma abordagem com paradas (Código G Programa “Paradas” no Apêndice A), como proposto por Hu (2018). Para a deposição da primeira camada o arco é aberto no Ponto 1, sendo deslocado até o Ponto 2, e depois segue a geometria até o ponto 3, retornando ao ponto 1, numa trajetória que segue o sentido ‘1231’. Tais pontos estão indicados na Figura 4.24. Então o arco é desligado no ponto 1, a tocha é deslocada até o ponto 0, onde há um incremento programado na altura da tocha e o arco é novamente aberto, seguindo o sentido de deposição ‘01231’. Ao fim do deslocamento dessa camada o arco é extinto e a tocha é movida ao ponto 0, e um ciclo começa a se repetir para a deposição de cada uma das camadas. Foram depositadas 10 camadas. Ao fim do processo pode-se observar que a deposição não apresentou boa qualidade. Devido a limitação da geometria, a água foi adicionada apenas no contorno externo da peça padrão.

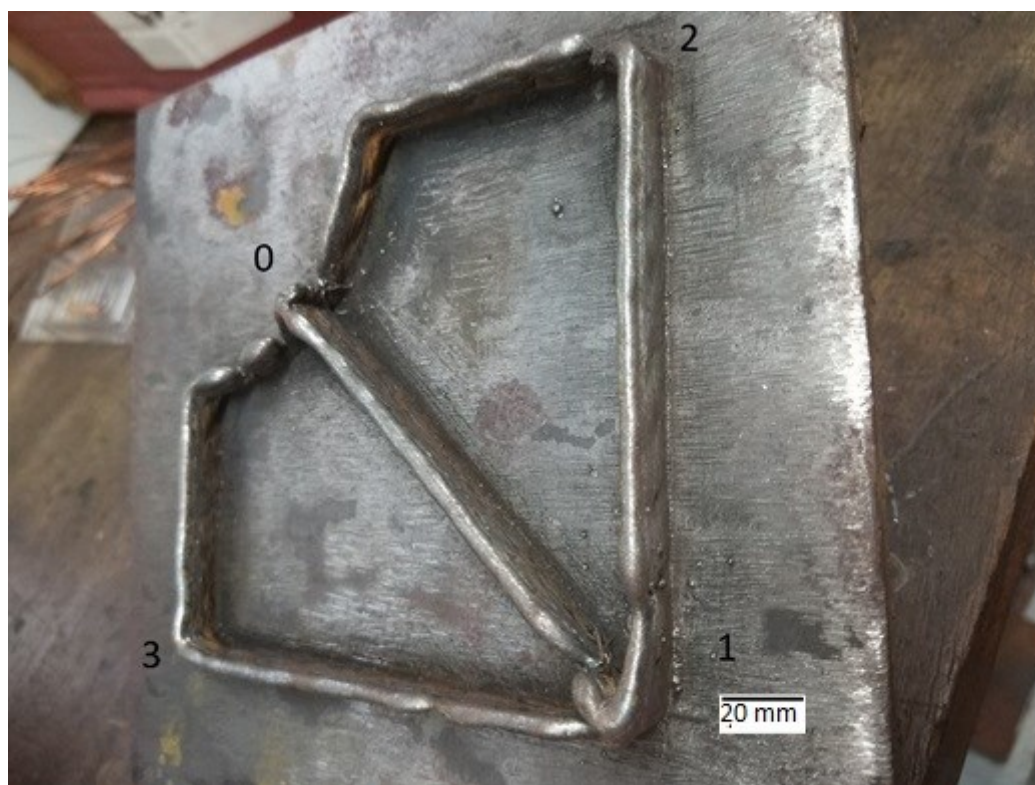


Figura 4.24 – Peça padrão fabricada com arame de 0,6 mm

Vale observar que o ponto inicial da deposição, o Ponto 0, é diferente do ponto final da deposição, Ponto 1, em cada ciclo. Há um acúmulo de material nos Pontos 0 e 1, onde o arco é aberto e onde apaga, respectivamente. Justamente nesses pontos ocorrem os maiores problemas, onde é possível observar algumas irregularidades na geometria. Isso provavelmente ocorre porque a cada ciclo ocorre a deposição de material nesses pontos em dois momentos, ou seja, a tocha passa por esses pontos duas vezes a cada camada. Os pontos 0 e 1 são os únicos pontos dessa geometria onde isso ocorre. Além disso, no ponto 0, onde o arco é aberto, há a tendência de acúmulo de material por se tratar do ponto inicial da deposição, e no Ponto 1, onde o arco é extinto, há a tendência de falta de material, pois o arco se apaga rapidamente, fazendo com que o metal fundido nesse ponto se contraia. No Ponto 2 também é possível observar falta de material logo após a curva, o que indica que o arco sofre alguma instabilidade após a mudança de direção. Foram depositadas 11 camadas, e pode-se concluir que essa não é a melhor forma de depositar essa geometria, já que há a tendência de falhas nos pontos 0 e 1.

Para solucionar esse problema, o depósito de material foi feito continuamente, sem pausas. Para isso um ajuste na trajetória tornou-se necessário e um novo programa foi desenvolvido (Código G Programa “Contínuo” no Apêndice A). A tocha passou a se deslocar seguindo o caminho ‘1231021301’, sendo que a cada duas camadas depositadas, um ciclo é completo. A altura da tocha foi aumentada suavemente, em forma de rampa, ao longo do ciclo. Com os mesmos parâmetros, uma nova deposição foi feita com o arame de 0,6 mm. A peça depositada é mostrada por diferentes ângulos nas Figuras 4.25 e 4.26.

Essa deposição apresentou uma excelente qualidade. Tanto curva, quanto os cantos e cruzamentos foram construídos livres de problemas de descontinuidade. Porém apenas 9 camadas foram depositadas, porque o arame enrolou no alimentador durante a deposição. Pode-se notar um grande aumento na temperatura da peça e da água presente na cuba responsável pelo resfriamento da forma, durante a deposição. Para os testes em que se depositava uma parede, a temperatura chegava de 80 a 100°C logo após a deposição, mas na deposição dessa geometria os níveis de temperatura chegavam entre 150 e 200°C. Apenas um pequeno volume de água foi adicionado à cuba a cada camada e a água dentro da cuba não foi resfriada e nem circulada, portanto, por se tratar de uma deposição contínua, o aquecimento se torna inevitável. Um processo de resfriamento, ou de circulação da água contribuiria em casos em que a deposição é realizada de forma contínua, pois a água no interior da cuba se manteria numa temperatura relativamente constante e baixa, o que melhoraria as trocas de calor da forma com o líquido.



Figura 4.25 - Peça padrão depositada continuamente com arame de 0,6 mm, vista superior



Figura 4.26 - Peça padrão depositada continuamente com arame de 0,6 mm, vista lateral

O mesmo procedimento foi realizado para o arame de 0,9 mm, que foi depositado continuamente, sem interrupções, seguindo a mesma direção da forma anterior, com os mesmos parâmetros utilizados para a confecção da Parede 26 da seção anterior. A forma depositada é mostrada nas Figuras 4.27 e 4.28. Foram depositadas 20 camadas. A maioria das camadas apresentou boa qualidade, porém nas camadas finais descontinuidades se formam em um dos cruzamentos (no ponto correspondente a Posição 1 da Figura 4.24) e em um canto (no ponto correspondente a Posição 2 da Figura 4.24). Como nos outros cantos não houveram problemas, leva-se a acreditar que provavelmente houve uma falta de alimentação num ponto e esse problema foi aumentando ao se depositar as camadas seguintes. Em relação ao cruzamento, tudo leva a crer que houve uma instabilidade devido ao arco passar duas vezes pelo mesmo ponto a cada camada, o que acaba provocando um acúmulo de material. Isso fica perceptível ao se observar que no ponto em questão, a altura total é superior a qualquer outro ponto da forma depositada. Uma forma de contornar esse problema seria aumentar a velocidade de deslocamento quando a tocha chegasse próxima ao ponto de interesse, evitando que haja um acúmulo de material nesse ponto. O restante da forma apresentou um depósito de qualidade.

Por fim, foi utilizado o arame de 1,2 mm de diâmetro, que também foi depositado continuamente, sem interrupções, seguindo a mesma direção da forma anterior, com os mesmos parâmetros utilizados para a confecção da Parede 27 da seção anterior. A forma obtida é mostrada nas Figuras 4.29 e 4.30. Foram depositadas 20 camadas. A peça depositada apresentou boa qualidade, apresentando leves corcundas em uma porção da forma, após uma curva. Essa deposição não apresentou descontinuidades em nenhum dos cantos ou cruzamentos, entretanto é possível observar que o ponto correspondente a Posição '1' foi o que apresentou a maior altura em toda a forma, o que comprova que nesse ponto existe a tendência de acúmulo de material.

Em todas as deposições, a água foi depositada apenas no contorno externo da geometria. Isso foi uma limitação devido a geometria fechada da peça. Sendo assim, o trecho da Posição 0 até a Posição 1 acaba tendo diferentes condições de deposição do que o resto da peça. Uma forma de contornar esse problema seria a realização de furos no substrato antes da deposição, na região onde seria a parte interna da peça padrão. Com isso, ao adicionar o volume de água na cuba faria com que a água atingisse as regiões internas da peça, ocasionando um resfriamento mais homogêneo em toda a peça.



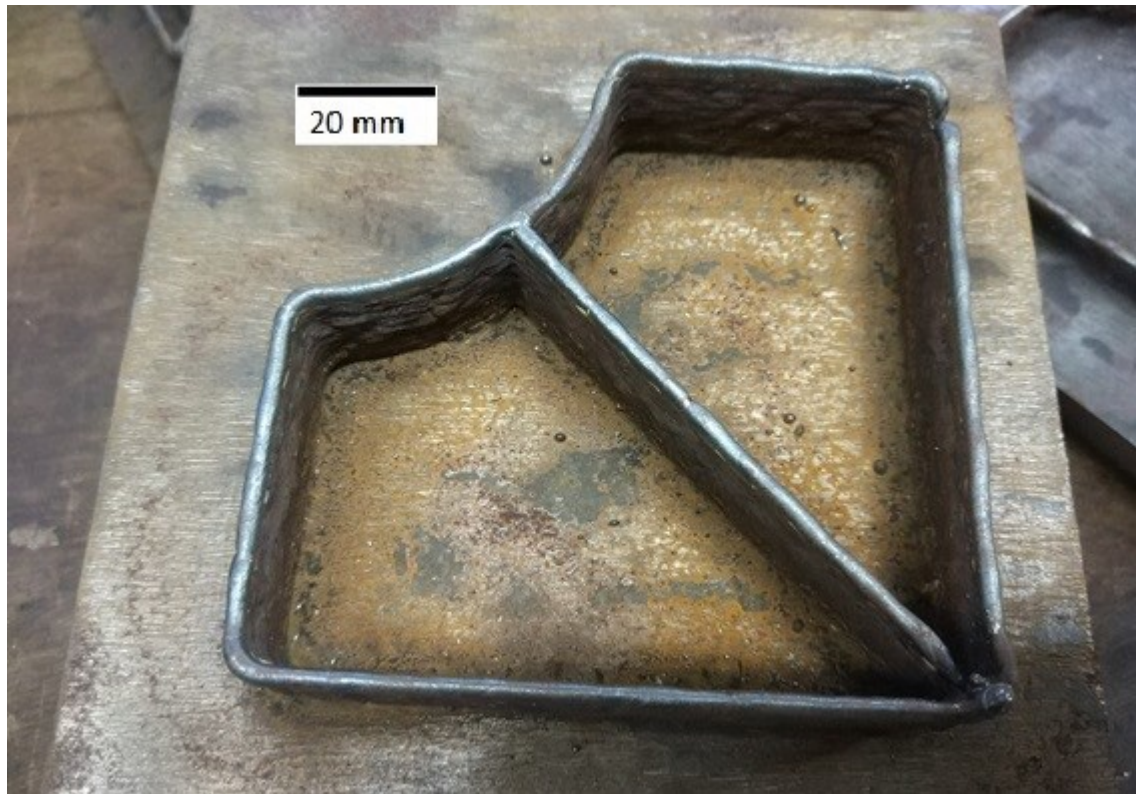


Figura 4.27 - Peça padrão depositada continuamente com arame de 0,9 mm, vista superior



Figura 4.28 - Peça padrão depositada continuamente com arame de 0,9 mm, vista lateral



Figura 4.29 - Peça padrão depositada continuamente com arame de 1,2 mm, vista superior

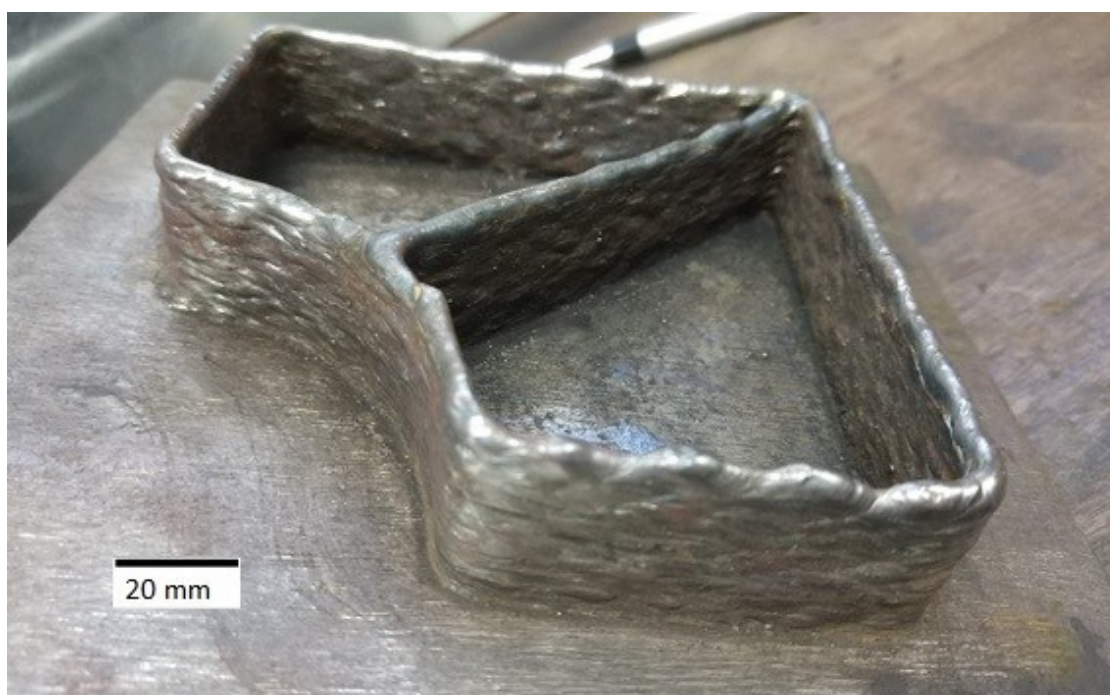


Figura 4.30 - Peça padrão depositada continuamente com arame de 1,2 mm, vista lateral



Os resultados obtidos mostram que é possível a criação de peças finas, com curvas, cantos e cruzamentos, utilizando os arames de 0,6; 0,9 e 1,2 mm. Como mostrado deve-se ficar atento ao planejamento da trajetória a ser utilizada para a deposição, já que essa tem uma grande influência na qualidade final da peça. Na Seção 2.1 são apresentadas as melhores formas de depositar trajetórias fechadas, como as utilizadas nessa seção.

Segundo Hu (2018), são duas abordagens para a deposição de trajetórias fechadas, sendo a primeira com um incremento de altura no ponto inicial da deposição, e a segunda com o incremento em forma de rampa, ao longo da trajetória. Hu (2018) indica que a primeira abordagem pode resultar em uma deposição de sucesso, enquanto a segunda abordagem resulta em superfícies mais suaves e consistentes.

Essas duas abordagens foram as utilizadas para a deposição da trajetória depositada nessa seção, sendo que os resultados foram compatíveis com o que Hu (2018) indicou. Segundo Hu (2018), na primeira abordagem o ponto inicial é mais volumoso, e isso pode ser compensado pelo ponto final da deposição (como a trajetória é fechada, ponto inicial e final são iguais). Entretanto, para a primeira peça depositada nessa seção, devido a geometria da peça, o ponto inicial e o final eram diferentes. Isso certamente contribuiu para o resultado ruim alcançado nesse teste, pois justamente nos pontos inicial e final de deposição eram onde se encontravam algumas das irregularidades. Usando a segunda abordagem, as formas foram depositadas utilizando cada um dos diferentes arames testados.

Os resultados foram melhores que os alcançados utilizando a primeira abordagem. Entretanto, pequenos problemas ocorreram, sendo que o arame de 0,6 mm embolou no alimentador, com o arame de 0,9 mm a deposição apresentou irregularidades em um dos cantos e em um dos cruzamentos e com o arame de 1,2 mm corcundas se formaram em uma pequena porção. Apesar disso o resultado vai de encontro com que Hu (2018) mostra em seu estudo, que indica que a segunda abordagem, com um incremento na altura em rampa, é mais efetiva.

Para a deposição destas quatro (4) formas foram alterados apenas os parâmetros do processo, como velocidade de alimentação e tensão, que são alteradas na própria fonte, e a velocidade de deslocamento, que é alterada por meio de programação. Essa abordagem acaba sendo mais uma vantagem da MADA, pois a programação é direta (Código G mostrado no Apêndice A), levando pouco tempo para alterar a velocidade de deslocamento. Também é possível fazer adequações na geometria de uma peça de forma

simples, como modificar dimensões ou arredondar um canto vivo, alterando poucos comandos. Entretanto deve-se verificar se o programa criado realmente está executando a função desejada, pois durante a execução do programa não é possível alterá-lo, apenas pará-lo.

Por fim, destaca-se que neste trabalho foram explorados os limites da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, sendo que, devido a esse motivo, a presença de corcundas foi frequente com a utilização de cada um dos arames. Num primeiro momento acreditava-se que aumentar a velocidade de alimentação permitiria aumentar a velocidade de deslocamento, o que não se mostrou verdade. Com isso foi buscado as maiores velocidades de deslocamento que não causavam efeitos de *humping*, com as menores velocidades de alimentação possíveis. Tais geometrias e as paredes depositadas com diferentes arames comprovam que é possível atingir larguras de paredes menores do que as indicadas pelos autores para MADA utilizando MIG/MAG como fonte de calor.

A Figura 2.3 apresenta a largura de paredes comumente obtidas quando depositadas por diferentes processos de MA. Nessa Figura 2.3, a largura mínima obtida para o processo MIG CMT é de aproximadamente 4 mm. O processo MIG CMT (*Cold Metal Transfer*) é um processo por curto-circuito controlado, que controla a forma da corrente, a velocidade e sentido de avanço do arame. É um processo mais estável que o MIG/MAG convencional. O processo convencional acabou sendo um limitante desse estudo. E mesmo assim a menor largura encontrada com o processo convencional nesse trabalho, foi de 2,8 mm, cerca de 30% inferior àquela sugerida pelo autor. É de se esperar que, ao utilizar o processo CMT, larguras menores e paredes mais estáveis possam ser produzidas.

Destaca-se ainda que os processos MADA requerem um pós-processamento para melhoria do acabamento superficial da peça construída, o que muitas vezes não ocorre nos processos a laser. Essa limitação é acompanhada por outra: peças com geometrias mais complexas são difíceis de usinar, justamente pela geometria da peça, que impede que a ferramenta de corte acesse os locais necessários, o que limita a utilização de MADA apenas para geometrias mais simples. É nesse ponto que os processos de leito em pó oferecem vantagem em relação aos processos a arco: quando há a necessidade de alcançar pequenas resoluções e necessidade de construir peças com geometrias mais complexas.

Dessa forma, a MADA com o uso de MIG/MAG como fonte de calor ainda não pode ser utilizada em substituição aos processos de leito em pó. Entretanto, o presente trabalho mostra que a utilização de MADA com o uso de MIG/MAG pode ser viável se

a aplicação não requerer níveis de resolução tão baixos e a peça apresentar uma geometria mais simples, pois esse processo apresenta elevada taxa de deposição, o que ocasiona uma alta produtividade, e, além disso, possui custo econômico inferior comparado aos processos de leito em pó. Tais características são procuradas por todas as empresas: produzir mais em menos tempo, com a mesma qualidade, ou até com uma qualidade superior, com um custo mais baixo. Em certos casos é isso que MADA oferece. Por isso a evolução desse processo é de extrema importância.

## CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que o arame de 0,6 mm pode ser usado na Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Porém, esse é um arame difícil de se trabalhar, e alguns cuidados devem ser tomados, já que o arame embola com certa frequência no alimentador, e o bico de contato se funde quando utilizado altos níveis de alimentação.

Para a construção de peças com paredes finas, a deposição com arame de 0,6 mm de diâmetro e modo de transferência goticular não se mostrou adequada. Quando se utiliza uma velocidade de deslocamento da tocha muito elevada, o efeito chamado *humping* aparece na parede, e quando se diminui a velocidade até que as corcundas não mais apareçam, a parede já apresenta uma grande largura. Além disso, os níveis de corrente são bastante elevados, o que ocasiona a fusão das camadas anteriores, já depositadas. O ideal seria a fusão de apenas uma pequena parcela da camada anterior, apenas para que ocorra a coalescência entre as camadas. O mesmo ocorre para transferência por curto-circuito com níveis de alimentação mais altos. As paredes finas só foram conseguidas ao se utilizar uma velocidade de alimentação em níveis mais baixos. Dessa forma, foi possível depositar peças com pequenas espessuras, mas ainda não foi possível obter resoluções da ordem de milímetros. Esses resultados também mostraram que o *humping* está relacionado à velocidade de deslocamento e não à velocidade de alimentação, já que esse foi observado sempre acima de determinada velocidade de deslocamento.

Apesar de ser possível de utilizar o arame de 0,6 mm na Manufatura Aditiva, isso não se mostrou viável utilizando o processo de MIG/MAG convencional. Isso porque o arame de 0,9 mm apresentou melhores resultados, depositando uma parede levemente mais fina e com eficiência de deposição cerca de 5% superior ao arame de 0,6 mm. O arame de 1,2 mm também apresentou eficiência superior ao arame de 0,6, mas a largura das paredes depositadas era maior. E além de apresentarem melhores resultados, os arames de 0,9 e 1,2 mm são muito mais fáceis de trabalhar, já que não embolam no alimentador como ocorre com o arame de 0,6 mm. Logo, respondendo a hipótese principal deste trabalho, é possível utilizar o arame de 0,6, mas com a utilização de MIG/MAG convencional ele ainda não se torna uma alternativa a processos que usam laser como fonte de calor, especialmente para aplicações que exigem uma boa resolução.

Não é possível utilizar velocidades de alimentação muito baixas para o arame de 0,6 mm, devido à baixa alimentabilidade deste. Enquanto para o arame de 0,6 as menores velocidades de alimentação utilizadas chegaram a 5,0 m/min, as usadas com os arames de 0,9 e 1,2 chegavam a 2,0 m/min. Isso contribuiu para que o arame de 0,9 depositasse paredes tão finas quanto aquelas construídas com o arame de 0,6 mm.

É possível realizar a fabricação de peças finas, utilizando o método, materiais e equipamentos usados neste trabalho. Apenas com o arame de 0,9 mm que a peça depositada apresentou algumas irregularidades próxima aos cantos e cruzamentos, mas como aconteceu só em um dos cantos e um dos cruzamentos, acredita-se que é algo que possa ser resolvido. Os arames de 0,6 e 0,9 apresentaram bons resultados. Deve-se projetar com cuidado a trajetória utilizada para a fabricação da peça, já que a trajetória adotada tem grande influência nos resultados obtidos, como mostrado nos resultados. Para a deposição contínua, as temperaturas da peça durante o processo se elevam bastante. Uma boa forma de controlar e manter a temperatura em níveis mais baixos seria resfriar ou até circular a água presente na cuba, para que a troca de calor seja mais efetiva durante todo o processo. Ainda é possível citar que foi possível utilizar o processo convencional para a deposição das paredes e peças padrão. O processo MAG convencional foi utilizado em todos os testes realizados.

## CAPÍTULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o principal objetivo de melhorar a resolução dimensional dos processos de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco fazendo com que estes se tornem competitivos frente aos processos a laser, os seguintes trabalhos são propostos:

- Utilização do processo MIG/MAG CMT para a comparação dos depósitos do arame de 0,6 mm com os arames de outros diâmetros;
- Manufatura Aditiva com o processo TIG para obtenção de paredes com melhor resolução;
- Manufatura Aditiva com o processo híbrido MIG/MAG com TIG para obtenção de paredes com melhor resolução; e
- Manufatura Aditiva com o processo híbrido MIG/MAG com Laser para obtenção de paredes com melhor resolução.

## CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, E. A; et al. *Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade*. Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 19, Nº. 02, p.190-198, Abr/Jun 2014  
<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>

ASTM F2792–12a. *Standard terminology for additive manufacturing technologies*. 2013, 3p.

ASTM F3187. *Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals*. 2016, 22p.

BRADSTREET, B. J; *Effects of surface tension and metal flow on bead formation*, Weld. J., Vol. 47, 1968, 314s–322s pp.

CUNNINGHAM, C. R; J. M. FLYNN, J. M; SHOKRANI, A; DHOKIA, V; NEWMAN, S. T; *Invited Review Article: Strategies and Processes for High Quality Wire Arc Additive*, 2018, 41 p.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>

DAYTON, M. *High Carbon Steel Properties & Uses*. Disponível em <https://sciencing.com/high-carbon-steel-properties-uses-7596348.html>. Acesso em 10/06/2019, 2018.

DING, D. et al. *A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 34, August, 2015a, 8-19pp.  
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>

DING, D; et al. *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015b, 18 p.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>

DEBROY, T; et al. *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties*. Elsevier, 2018, 112-224 pp.

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

DUTRA, J. C; et al. *Características de fusão e potência de soldagem com a transferência MIG - CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183*, Soldag. Insp, Vol.18 no.1 São Paulo, 2013, 12-18 pp.

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000100003>

FRAZIER, W. E; *Metal Additive Manufacturing: A Review*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 23, 2014, 1917-1928 pp.

<https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

FERNANDES, D. B; et al. *Ensaio para Medição de Nível e Alcance de Respingos em Soldagem MIG/MAG*, Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 15, No. 2, 2010, 150-155 pp.

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242010000200009>

GONZÁLEZ, J; et al. *Additive Manufacturing with GMAW welding and CMT technology*, Manufacturing Engineering Society International Conference, 2017, 840-847 pp.

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.189>

GE, J; et al. *A spatial periodicity of microstructural evolution and anti-indentation properties of wire-arc additive manufacturing 2Cr13 thin-wall part*, Materials and Design, Volume 160, 2018, 218–228 pp.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.021>

HENCKELL, P., et al. *The Influence of Gas Cooling in Context of Wire Arc Additive Manufacturing-A Novel Strategy of Affecting Grain Structure and Size*, TMS The Minerals, M.& M.S. (Ed.), TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Springer International Publishing, 2017, 147–156 pp.

[https://doi.org/10.1007/978-3-319-51493-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51493-2_15)



HU, Z; et al. *Understanding and overcoming of abnormality at start and end of the weld bead in additive manufacturing with GMAW*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 95, 2018, 2357–2368 pp.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1392-9>

HUANG, S. H; et al. *Additive manufacturing and its societal impact: a literature review*, Int J Adv Manuf Technol, 2013, 67:1191–1203  
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>

ISO/ASTM 52900 (ASTM F2792). *Additive manufacturing – General principles – Terminology*. 2015, 19p.

LEI, Y., XIONG, J., LI, R.; *Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 96, 2018, 1355–1365 pp.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1699-1>

MACHADO, I. G. *Soldagem e Técnicas Conexas: Processos*. Ed. Pelo autor e distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Porto Alegre, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MARTINA, F; WILLIAMS, S. *Wire+Arc Additive Manufacturing vs. Traditional Machining From Solid: A Cost Comparison*, Cranfield University, 2015, 27p.

MARTINS, R.Z; *Aplicabilidade de Arame Ultrafino na Soldagem MIG/MAG de Chapas Finas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, 78 p. 2018.  
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.312>

MENG, X. et al. *Humping Phenomena in High-Speed GTAW of Different Weld Penetrations*, Welding Journal, Vol. 95, 2016, 331s-339s pp.

MILEWSKI, J. O; *Additive Manufacturing of Metals*. Springer Series in Materials Science, Volume 258, 2017, 343 pp.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4>

NGUYEN, T. C; et al. *The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding*, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, 2005, 447- 459 pp.

<https://doi.org/10.1179/174329305X44134>

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo, Artliber Editora, 288 p., 2014.

SILVA, L. J; et al. *Gerenciamento Térmico via Resfriamento Ativo por Quase-imersão Aplicado à Manufatura Aditiva por Fusão-Deposição a Arco*, CONSOLDA, 2018, 11 p.

SILVA, L. J; *Near-Immersion Active Cooling For Wire + Arc Additive Manufacturing: From Concept To Application*, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, 140, 2019 p.

<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2422>

SODERSTROM, E. J.; MENDEZ, P. F. *Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO<sub>2</sub> Shielding Gas Mixtures*. Welding Journal, Vol. 87, May, 2008, 124s-133s pp.

SOUZA, D; et al. *Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito*, Soldag. insp. São Paulo, Vol. 16, No. 1, 2011, 022-032 pp.

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000100004>

TOWNSEND, A; et al. *Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review*, Precision Engineering, Volume 46, 2016, 34–47pp.

<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001>

WANG, L. et al. *Suppression of humping bead in high speed GMAW with external magnetic field*, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 21, 2016, 131-139 pp.

<https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000074>

WU, B., et al. *Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V*. J. Mater. Process. Technol. 250, 2017, 304–312 pp.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>

XIONG, J; et al. *Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer singlepass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing*, Journal of Materials Processing Tech. Vol 252, 2018, 128–136 pp.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>

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, 227, 2016, 153–160 pp.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.021>

YANG, D., WANG, G., ZHANG, G.; *Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography*. J. Mater. Process. Technol. 2017, 215–224 pp.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>

ZHANG, Z; et al. *Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminium alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing*, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, Volume 1, 2018, 89-95pp.

<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.005>

# APÊNDICE A

## Código G de Programação da Peça-padrão

### Programa “Parede”

g90  
g50  
g68  
x0 y0  
#1 = 0  
#2 = 1  
#3=750

g1 x0 y0 z#1 f#3

M98 P360 L10  
g1 x0  
m30

O360  
M3  
g4 p2000  
g1 x-0 y90 f#3

M5  
#1 = [#1 + #2]  
g4 p2000  
z#1  
M0  
M3  
g4 p2000  
x0 y0

M5  
g4 p2000

#1 = [#1 + #2]

z#1  
M0

M99

**Programa “Paradas”**

G21  
G90  
G50  
G1 X0 Y0 Z0 f400  
#1 = 0  
#2 = 1  
#3=0  
  
G1 X1.5 Y1.5 Z#3 F400  
M0  
M3  
G4 P1200  
M98 P100 L20  
M5  
M30  
  
O100  
G3 X5 Y0 I3.5 J3.5  
G1 X95 Z#1  
G3 X100 Y5 I0 J5  
G1 Y50 Z#1  
G3 X95 Y55 I-5 J0  
G2 X55 Y95 Z#1 I5 J45  
G3 X50 Y100 I-5 J0  
G1 X5 Z#1  
G3 X0 Y95 I0 J-5  
G1 Y5 Z#3  
G3 X1.5 Y1.5 I5 J0  
M5  
G4 P2000  
G1 X68 Y68 Z#1  
M0  
  
M3  
G4 P1200  
#3 = [#3 + #2]  
G1 X1.5 Y1.5 Z#3  
  
#1 = [#1 + #2]  
M99

**Programa “Continuo”**

G21  
 G90  
 G50  
 #1 = 0  
 #2 = 1  
 #3=500  
 G1 X0 Y0 Z0 f#3  
  
 G1 X1.5 Y1.5 Z#1 F#3  
 M0  
 M3  
 G4 P2000  
 M98 P100 L10  
 M5  
 M30  
  
 O100  
  
 G3 X5 Y0 I3.5 J3.5  
 G1 X95 Z#1  
 G3 X100 Y5 I0 J5  
 G1 Y50 Z#1  
 G3 X95 Y55 I-5 J0  
 G2 X55 Y95 Z#1 I5 J45  
 G3 X50 Y100 I-5 J0  
 G1 X5 Z#1  
 G3 X0 Y95 I0 J-5  
 G1 Y5 Z#1  
 G3 X1.5 Y1.5 I5 J0  
 #1 = [#1 + #2]  
 G1 X68 Y68 Z#1  
  
 G3 X95 Y55 I27 J27  
 G2 X100 Y50 I0 J-5  
 G1 Y5  
 G2 X95 Y0 I-5 J0  
 G1 X5  
 G2 X0 Y5 I0 J5  
 G1 Y95  
 G2 X5 Y100 I5 J0  
 G1 X50  
 G2 X55 Y95 I0 J-5  
 G3 X68 Y68 I40 J0  
 #1 = [#1 + #2]  
 G1 X1.5 Y1.5 Z#1  
  
 M99