

LUIDY MARTINS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ARAME FRIO AO PROCESSO
MIG/MAG APLICADO À MANUFATURA ADITIVA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2022

LUIDY MARTINS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ARAME FRIO AO PROCESSO
MIG/MAG APLICADO À MANUFATURA ADITIVA**

Projeto de conclusão de curso,
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências para
a obtenção do título de **Bacharel em
Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov
Coorientadora: Dra. Oksana Kovalenko

UBERLÂNDIA — MG

2022

LUIDY MARTINS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ARAME FRIO AO PROCESSO
MIG/MAG APLICADO À MANUFATURA ADITIVA**

Projeto de conclusão de curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov – UFU – Orientador

Prof. Dra. Oksana Kovalenko – Coorientadora

Prof. Dr. Luiz Eduardo dos Santos Paes

UBERLÂNDIA — MG

2022

Oliveira, L. M. **Estudo da Influência da Adição de Arame Frio ao Processo MIG/MAG aplicado à Manufatura Aditiva. 2022.** Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

Os processos de manufatura aditiva surgiram como possíveis soluções para atender os requisitos de maior flexibilidade e menor tempo de produção, assim como de maior economia de recursos. O presente trabalho visa verificar a adequação da realização do processo de manufatura aditiva pela mediante a soldagem MIG/MAG com adição de arame frio aplicado para a fabricação de uma parede formada a partir de camadas depositadas com de aço carbono. Também, procurou-se verificar a influência do aumento da velocidade de alimentação de arame frio sobre o nível de eficiência de deposição. Foram realizados testes visando-se alcançar a maior taxa de deposição de camadas de aço carbono, utilizando o processo de MIG/MAG convencional com adição de arame frio. O processo de deposição de camadas foi avaliado com camadas sobrepostas, em forma de parede. A bancada experimental foi montada e ajustada para atender as necessidades deste trabalho com um robô de soldagem, um posto de soldagem MIG/MAG, um alimentador de arame frio e um direcionador de arame. Os resultados mostraram que a abordagem apresenta uma prática adequada e vantajosa, que permite alcançar maiores taxas de deposição e menores níveis de diluição para a mesma energia de soldagem em comparação com a condição sem adição de arame frio. Ao mesmo tempo, a técnica de adição de arame frio permite manter a qualidade requerida das paredes depositadas.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Soldagem MIG/MAG. Arame frio.

Oliveira, L. M **Study of the Influence of Cold Wire Addition to the MIG/MAG Process applied to Additive Manufacturing. 2022.** Course Completion Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

Abstract

Additive manufacturing processes have emerged as possible solutions to meet the requirements of greater flexibility and shorter production time, as well as greater resource savings. The present work aims to verify the suitability of carrying out the additive manufacturing process by means of MIG/MAG welding with the addition of cold wire applied to the fabrication of a wall formed from layers deposited with carbon steel. Also, it was tried to verify the influence of the increase of the speed of cold wire feed on the level of deposition efficiency. Tests were carried out in order to achieve the highest deposition rate of carbon steel layers, using the conventional MIG/MAG process with the addition of cold wire. The layer deposition process was evaluated with superimposed layers, in the form of a wall. The experimental bench was assembled and adjusted to meet the needs of this work with a welding robot, a MIG/MAG welding station, a cold wire feeder and a wire guide. The results showed that the approach presents a suitable and advantageous practice, which allows achieving higher deposition rates and lower dilution levels for the same welding energy compared to the condition without addition of cold wire. At the same time, the cold wire addition technique makes it possible to maintain the required quality of the deposited walls.

Keywords: Additive manufacturing. MIG/MAG welding. cold wire.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de Soldagem a Arco Elétrico (PONOMAROV, 2021).	12
Figura 2 – Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência (MONDENESI, 2007).....	13
Figura 3 – Tocha de soldagem refrigerada a gás de proteção e a água, respectivamente (Fotos coletadas do site da loja do soldador)	15
Figura 4 – Ângulos de avanço (ataque) do eletrodo ou da tocha (PONOMAROV, 2021)	15
Figura 5 - Esquema representativo do conjunto bico de contato, arame e peça (FISCHER, 2011)	16
Figura 6 - Fontes de soldagem MIG/MAG (adaptado de FRONIUS®).....	17
Figura 7 - Esquema das regiões de uma solda por fusão. A - Zona fundida (ZF), B - Zona Termicamente afetada (ZTA) e C - Metal de Base (MB). (Adaptado de MARQUES; MODENESI, 2011)	19
Figura 8 - Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com a fonte de calor e alimentação (Adaptado de MARTINA; WILLIAMS, 2015).....	21
Figura 9 - Bancada Experimental.....	24
Figura 10 - Robô ARC Mate 100, Fanuc.....	25
Figura 11 - Fonte de soldagem TPS 5000, Fronius com alimentador de arame	25
Figura 12 - Mecanismo de alimentação de arames frios.....	26
Figura 13 - Direcionador de arame frio	26
Figura 14 - Alimentação de dois arames frios pelo mesmo bico.....	27
Figura 15 - Transdutor de Corrente Linha Industrial - Série HAT	27
Figura 16 - Placa de aquisição de sinais - NI USB-6009	28
Figura 17 - Cortadora Metalográfica do laboratório de soldagem	28
Figura 18 - Cortadora Metalográfica do laboratório de tribologia	29
Figura 19 - Lixadeira Metalográfica dupla.....	29
Figura 20 - Esquema representando o método de medição dos valores absolutos (à esquerda) e efetivos (à direita).....	31
Figura 21 - Aspecto superficial das paredes depositadas (KOVALENKO, 2019).....	32
Figura 22 - Cordões cortados e enfileiras para não perder identificação no agrupamento....	33
Figura 23 - Aspecto superficial das paredes (KOVALENKO, 2019). Parede 1(Sem arame frio), Parede 2 (2 arames frios de 1 mm, com velocidade de 0,5 m/min) e Parede 3 (2 arames frios de 1 mm, com velocidade de 1,0 m/min).....	33
Figura 24 - Gráfico das áreas absolutas e efetivas em relação a velocidade de alimentação de arame frio.....	35
Figura 25 - Gráfico da altura absoluta e efetiva em relação velocidade de alimentação de arame frio.....	35
Figura 26 - Gráfico da largura média absoluta e efetiva em relação velocidade de alimentação de arame frio	36
Figura 27 – Gráfico da ZTA em relação a velocidade de alimentação	37
Figura 28 – Gráfico de eficiência de deposição em relação a velocidade de alimentação de arame frio.....	37
Figura 29 – Gráfico de dispersão dos valores de altura das paredes.....	39
Figura 30 – Gráfico de dispersão dos valores de área das paredes	40
Figura 31 – Gráfico de dispersão dos valores do alcance da ZTA das paredes	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de regulagem do modo MIG/MAG convencional por curto circuito. ...	23
Tabela 2 - Parâmetros monitorados do processo de soldagem MIG/MAG convencional.	32
Tabela 3 - Parâmetros geométricos absolutos e efetivos das paredes.	34

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	8
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Definição de soldagem	10
2.2 Soldagem MIG/MAG	11
2.2.1 <i>Descrição do processo de soldagem MIG/MAG</i>	<i>11</i>
2.2.2 <i>Tipos de transferência metálica.....</i>	<i>13</i>
2.2.3 <i>Obtenção do arco voltaico no processo MIG/MAG</i>	<i>14</i>
2.2.4 <i>Tocha de soldagem MIG/MAG</i>	<i>14</i>
2.2.5 <i>Bico (Tubo) de contato no processo MIG/MAG</i>	<i>16</i>
2.2.6 <i>Fonte de energia.....</i>	<i>17</i>
2.2.7 <i>Consumíveis.....</i>	<i>18</i>
2.3 Macroestruturas de metal de solda por fusão (regiões)	18
2.3.1 <i>Efeitos Metalúrgicos</i>	<i>19</i>
2.3.2 <i>Aspectos da poça de fusão</i>	<i>19</i>
2.3.3 <i>Descontinuidade em soldagem</i>	<i>20</i>
2.4 Processo de Manufatura Aditiva (MA)	20
CAPÍTULO 3 – MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS	22
3.1 Métodos	22
3.2 Equipamentos e Consumíveis.....	23
3.3 Metodologia de avaliação	29
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	32
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	41
CAPÍTULO 6 – TRABALHOS FUTUROS.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Como dito no trabalho de PFC do Petrachi L.M. (2021):

“Os grandes avanços tecnológicos que aconteceram nos últimos anos fizeram com que os processos de fabricação ganhassem mais eficiência, e com isso a cobrança nas indústrias, de entregar cada vez mais uma produção mais eficiente possível, aumentou. Isso acaba se tornando uma forma de competição industrial, onde o objetivo é produzir cada vez mais e com o menor uso de recursos possível. Dessa forma, consegue-se uma vantagem econômica sobre os concorrentes, o que aumenta as chances de sobrevivência no mercado extremamente competitivo atual. Uma forma de buscar essa vantagem na eficiência é encontrar formas de se aumentar a produtividade.”

Tudo isso se aplica ao processo da manufatura aditiva (MA), onde o foco principal é a máxima taxa de deposição, como diz o próprio nome deste processo de fabricação.

Manufatura aditiva é a definição geral para aquelas aplicações tecnológicas que, baseado em uma representação geométrica, fabricam peças e objetos por adição sucessiva de material. Essas tecnologias são atualmente utilizadas para várias aplicações na engenharia, assim como em outras áreas da sociedade, como medicina, educação, arquitetura, cartografia, automobilismo e entretenimento. Ao longo do avanço da tecnologia de manufatura aditiva, houve vários termos, definições e sentenças diferentes em uso, geralmente com referência a áreas de aplicação específicas e marcas registradas. O fator determinante para cada processo está na técnica usada para adicionar os materiais. Isso determina, por exemplo, quais tipos de materiais são possíveis no processo, uma vez que diferentes materiais têm particularidades de fusão ou de adesão (ISO/ASTM 52900, 2015).

Segundo Silva (2020), a MA pode utilizar diversos processos e tecnologias. Entre eles, o uso de processos tradicionais de soldagem a arco como MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) e TIG (Tungsten Inert Gas), que permitem a fusão e deposição de diversos materiais metálicos a um custo relativamente baixo, tem chamado a atenção, até criando uma modalidade da MA chamada Manufatura Aditiva por Deposição de Arco (MADA). Neste sentido, o processo MIG/MAG é um destaque, pois utiliza uma variedade de diâmetros de aram-eletrodo (maior adaptabilidade para paredes de variável espessura), além da

possibilidade de aplicar o arame frio. Esta não é uma vantagem do MIG/MAG em relação ao TIG – no TIG também é possível adicionar arame frio e de diferentes diâmetros. A principal vantagem diz respeito à maior taxa de fusão do arame-eletrodo (pois o último faz parte do circuito elétrico de soldagem, está preaquecido pela corrente e está aquecido pelo arco de maneira direta) e, conseqüentemente, à maior taxa de deposição.

De acordo com Jorge (2020), conforme citado por Ribeiro et al. (2015), o processo MIG/MAG com adição de arame frio é usado para aumentar a taxa deposição utilizando o mesmo calor gerado para fundir o arame frio adicionado. Parte do calor gerado é utilizado para fundir o arame frio, fazendo com que seja aumentada a taxa de deposição, e, no mesmo tempo, reduzindo o calor específico por unidade de massa do metal depositado. Costa et al. (2017) mostraram que a adição de arame frio, fundido com o mesmo calor gerado, reduz as tensões residuais que podem prejudicar a estrutura da peça.

O processo de MIG/MAG é utilizado de forma abrangente na indústria por se mostrar eficiente em diversos fatores juntos, como: flexibilidade do processo, produtividade e facilidade de automação. E, apesar de ser um processo antigo o bastante (foi desenvolvido em meados dos anos 40, do século XX), ainda hoje concorre com os processos de soldagem, mantendo a sua vanguarda na soldagem a arco.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade da adição de arames frios na fabricação de peças de aço carbono pela MADA. Utilizando o processo MIG/MAG, pretende-se comparar um arranjo com 2 arames, de diâmetro de 1 mm, com velocidades de alimentação diferentes, de forma a avaliar a viabilidade de se trabalhar com esse arranjo no processo e determinar qual a velocidade máxima permitida de alimentação de arames frios.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de soldagem

A soldagem é um processo de criação de uma união permanente de materiais através do estabelecimento de ligações intermoleculares entre os materiais que estão sendo unidos. É produzida por aquecimento ou não, com ou sem a utilização de pressão e com ou sem material de adição. (PONOMAROV, 2021).

Todos processos de soldagem podem ser classificados em dois grupos: soldagem por deformação (ou por pressão) e soldagem por fusão. Na soldagem por fusão o calor, produzido por uma fonte de energia térmica, é responsável pela fusão dos materiais a serem soldados. Com essa energia gerada ocorre a aproximação dos átomos das peças a serem unidas, formando ligações metálicas e de Van der Waals. Nos processos de soldagem por pressão, a fusão do metal de base até pode acontecer, mas o fator principal responsável para a criação da junta é a deformação plástica dos metais que compõem a junta.

São exemplos de processos de soldagem por pressão: soldagem por resistência elétrica, soldagem por forjamento, soldagem por fricção, soldagem por ultrassom e outros.

A soldagem (tanto por fusão, como por pressão) necessita de alguma fonte de energia para que o processo seja realizado. Dentre as principais fontes utilizadas pode-se destacar o arco elétrico, a chama oxiacetilênica e o efeito joule (soldagem por resistência elétrica). Na soldagem oxiacetilênica a união das peças é alcançada pela fusão do metal por uma chama gerada pela reação do oxigênio e o acetileno. Na soldagem por arco elétrico uma descarga elétrica amparada por um gás ionizado, em alta temperatura, conhecido como plasma, produz energia térmica suficiente para fundir o metal de base de maneira localizada, criar uma poça de fusão e assim realizar o processo de união das peças.

São exemplos de processos de soldagem por fusão: soldagem MIG/MAG, soldagem TIG, soldagem com eletrodo revestido, soldagem por arco submerso, soldagem com eletrodo tubular, soldagem a plasma, soldagem por eletro-escória, soldagem por feixe de elétrons, soldagem a laser, soldagem oxi-gás.

Cada processo tem as suas particularidades, por exemplo: O processo TIG possibilita a soldagem sem adição de material (autógena), promovendo uma maior quantidade de energia à poça de fusão (utilizada em juntas sobrepostas, raízes sem abertura, dentre outros), enquanto outros processos como MIG/MAG e eletrodo revestido não possuem o mesmo atributo, porém, a escolha da técnica mais adequada dependerá dos requisitos do trabalho final, Paes (2016).

Para a manufatura aditiva o processo de MIG/MAG é mais adequado do que o processo de soldagem TIG, pois apesar do processo TIG possibilitar ajustes mais finos (corrente e tensão), o processo MIG/MAG possibilita maior taxa de deposição. O MIG/MAG não exige um controle rígido dos parâmetros de soldagem, pois é um processo mais robusto que o processo TIG e o processo a laser, ou seja, o processo MIG/MAG é menos sensível a defeitos ocasionados por mudanças de parâmetros.

2.2 Soldagem MIG/MAG

2.2.1 Descrição do processo de soldagem MIG/MAG

Soldagem MIG/MAG é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pela sua fusão com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a poça de fusão. O processo MIG/MAG é indicado tanto para materiais ferrosos (aços não ligados, aços de liga leve e aços de alta liga) quanto para materiais não ferrosos (alumínio, cobre, magnésio e titânio), a diferença será na utilização do gás de proteção. Se o material a ser soldado for ferroso deve ser utilizado um gás predominantemente ativo (misturas com ricas concentrações de gás carbono ou oxigênio), e se o material a ser soldado for não ferroso deverá ser utilizado um gás predominantemente inerte (misturas com ricas concentrações de argônio ou hélio, podendo ser usados separadamente ou misturados) (Figura 1).

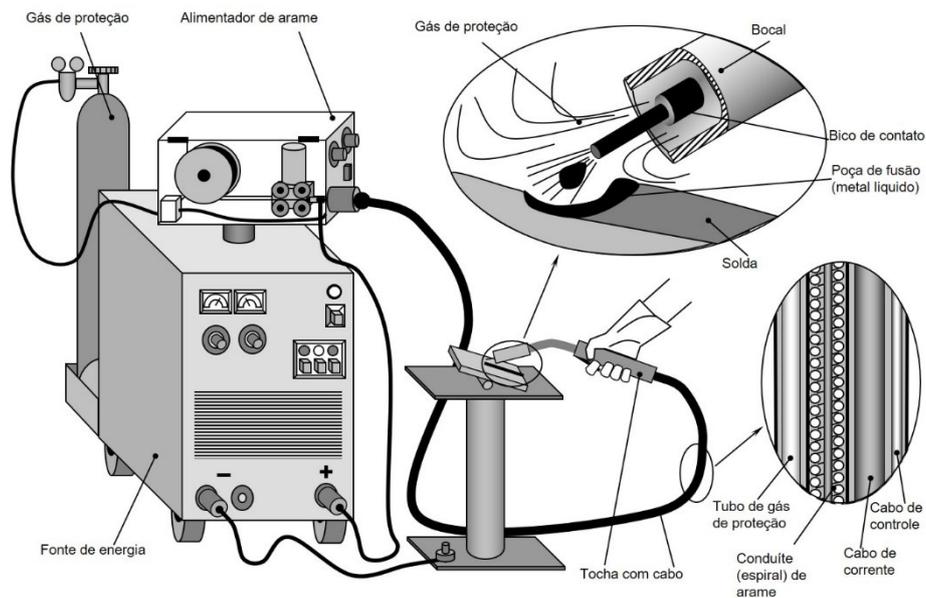


Figura 1 – Processos de Soldagem a Arco Elétrico (PONOMAROV, 2021).

Na soldagem com processo MIG/MAG a alimentação do eletrodo/arame é feita através de um alimentador motorizado. Os modos de aplicação podem ser automáticos e semiautomáticos. No caso de semiautomático, o soldador controla o deslocamento da tocha, o início e a parada do processo. O comprimento do arco é mantido estável devido ao fenômeno de autoajuste, assegurado pelo uso da fonte de energia do tipo tensão constante.

Em situações normais o processo MIG/MAG trabalha com intensidades de correntes que variam entre 60 e 600 A e tensões entre 15 e 35 V (AWS, 1992), tendo como resultado uma boa estabilidade do arco, transferência metálica conforme escolhida, boa aparência e boas propriedades mecânicas da solda.

O processo MIG/MAG é utilizado largamente na indústria metalmeccânica (indústria automobilística, fabricação de tanques e tubulações, construção civil, dentre outros) devido às seguintes vantagens: relativa facilidade de automatização e mecanização, relativa facilidade de domínio pelos soldadores na versão semiautomática, elevada taxa de deposição e alto fator de operação e, bom acabamento da solda.

Na soldagem MIG/MAG o arame/eletrodo é fundido e o metal líquido de adição é transferido para a poça de fusão. Existem alguns métodos de transferência metálica, os 3 principais são: por curto-circuito, transferência globular, transferência do tipo spray e transferência controlada (Figura 2).

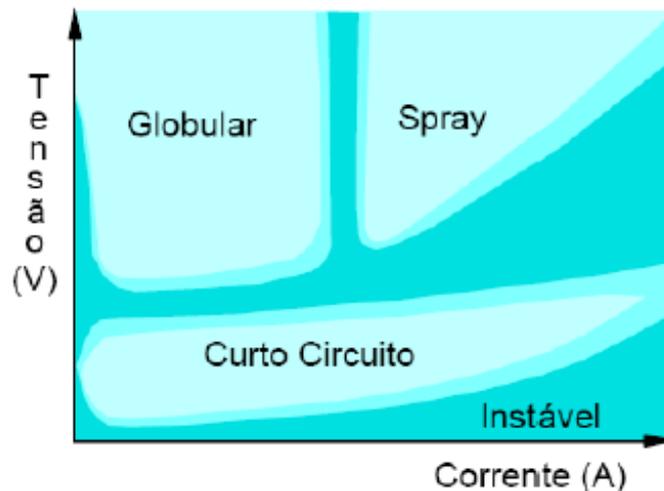


Figura 2 – Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência (MONDENESI, 2007).

2.2.2 Tipos de transferência metálica

- Transferência metálica por Curto-Circuito:

No caso de transferência por curto-circuito, forma-se uma gota na ponta do arame/eletrodo que aumenta de tamanho até encostar na poça de fusão (formando um curto-circuito) e, assim, se transferindo para a poça pela ação da tensão superficial tornando possível a soldagem em posições diferentes da plana. Neste modo de transferência metálica são utilizados baixos valores de tensão e corrente. Os curtos-circuitos são responsáveis pela geração de uma grande quantidade de respingos. No entanto, a geração de respingos pode ser controlada ajustando os parâmetros do processo, principalmente, a indutância da fonte de energia.

- Transferência Globular:

Na transferência globular são utilizados baixos valores de corrente e valores intermediários de tensão. O tamanho das gotas é maior (pois tem o espaço para elas crescerem) e o risco de respingos é também mais elevado. A transferência das gotas formadas acontece por gravidade, sendo assim esse modo de transferência metálica é indicada apenas para a soldagem na posição plana.

- Transferência Spray:

Na transferência spray são utilizados altos valores de corrente e de tensão. O arco é muito estável. A quantidade de respingos é baixa e o tamanho das gotas é menor, quando comparado com os modos de transferência metálica anteriores. Como neste modo de transferência metálica, a poça de fusão é de volume grande, ele é indicado apenas para a soldagem na posição plana.

- **Transferência Controlada:**

A utilização de fontes eletrônicas permite gerar modos de transferência metálica a qual possui um caráter controlado (por exemplo, transferência metálica pela corrente pulsada), dessa forma é possível obter características do modo spray com níveis mais baixos de corrente média, possibilitando então a soldagem de chapas finas e em todas as posições. Entretanto esses novos parâmetros dificultam a otimização do processo, pois são adicionadas novas variáveis.

2.2.3 Obtenção do arco voltaico no processo MIG/MAG

A obtenção do arco voltaico é baseada numa descarga de corrente elétrica entre dois eletrodos amparada por um gás ionizado chamado de plasma (AWS, 1987). Gera-se a partir do contato do arame-eletrodo com a peça um curto-circuito facilitando a passagem da corrente elétrica que irá conceber o calor, parte correspondente ao efeito Joule. Porém a maior parte da energia utilizada nesse processo deriva-se do próprio arco, transformando o estado físico da ponta do arame eletrodo de sólido para líquido e transferindo-as para a poça de fusão (GOHR, 2002).

2.2.4 Tocha de soldagem MIG/MAG

A tocha de soldagem tem como função prover o gás de proteção assim como guiar o arame-eletrodo e conduzir para ele a corrente elétrica. Na soldagem MIG/MAG são utilizadas tochas refrigeradas pelo próprio gás de proteção (para correntes inferiores a 300 A), (Figura 3), à esquerda ou a água (para correntes acima de 300 A), (Figura 3), à direita. As refrigeradas à água são mais leves (menores seções transversais dos cabos e das partes da tocha). Outro fator também que influencia o modo de refrigeração a ser utilizado é o tempo de arco aberto (fator de operação).



Figura 3 – Tocha de soldagem refrigerada a gás de proteção e a água, respectivamente (Fotos coletadas do site da loja do soldador).

- Influência da inclinação da tocha no processo MIG/MAG

A inclinação da tocha ao respeito da linha do cordão (ângulo de avanço ou de ataque) pode ser tanto no sentido de soldagem (técnica puxando), quanto contra ao sentido de soldagem (técnica empurrando), como ilustrado na (Figura 4).

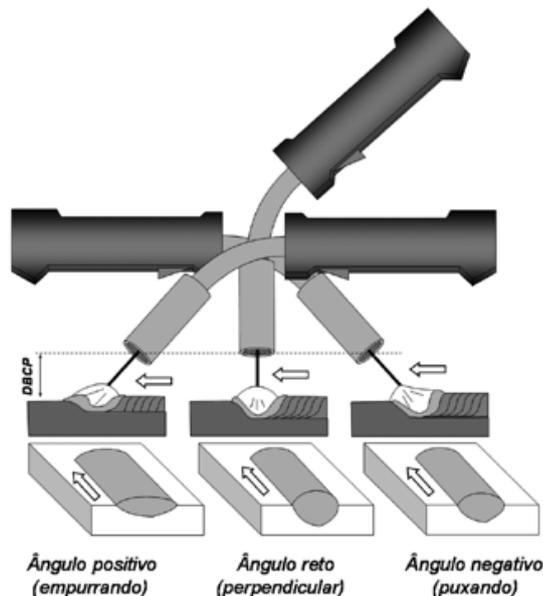


Figura 4 – Ângulos de avanço (ataque) do eletrodo ou da tocha (PONOMAROV, 2021).

Na técnica “puxando”, o jato de plasma empurra o metal líquido para trás e em direção a poça de fusão deixando o cordão mais profundo. Por outro lado, na técnica “empurrando”, o jato de plasma espalha o metal líquido aumentando a largura do cordão de solda e diminuindo a profundidade do processo. (QUITES, 2002).

2.2.5 Bico (Tubo) de contato no processo MIG/MAG

O bico de contato tem a função de estabelecer o contato deslizante do arame para que a corrente de soldagem consiga passar para o mesmo. O seu diâmetro é um pouco maior que o diâmetro do arame e na sua fabricação é utilizada liga à base de cobre.

O posicionamento do bico de contato depende do tipo de transferência metálica desejada (BARRA, 2003):

- Curto-circuito – faceado com a aresta do bocal;
- Goticular (spray) – recuado em relação à aresta do bocal;

- Distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) no processo MIG/MAG (extensão energizada do arame):

Uma distância pequena entre o bico de contato e a peça (Figura 5) pode facilitar o entupimento do bocal por respingos. Já uma grande distância entre o bico de contato e a peça pode afetar a estabilidade do processo de soldagem, facilitar a oscilação do arame projetado, aumentar a quantidade de respingos, além de prejudicar a proteção do local de soldagem (BARRA, 2003).

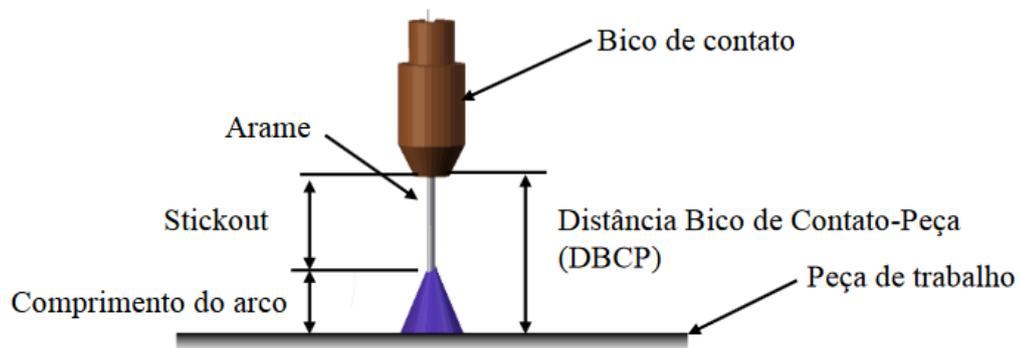


Figura 5 - Esquema representativo do conjunto bico de contato, arame e peça (FISCHER, 2011).

Assim como o comprimento do arco voltaico, a extensão do arame-eletrodo deve ser mantida constante, pois para uma velocidade de alimentação constante e tensão constante da fonte de energia, o aumento do comprimento energizado do arame-eletrodo vai implicar em um aumento da resistência elétrica do circuito de soldagem e, como resultado disso, em uma redução da corrente alterando então a geometria da solda.

Segundo Quites (2002), no processo de soldagem MIG/MAG é muito importante manter o comprimento energizado do arame-eletrodo (extensão do eletrodo) o mais curto

possível, porque o diâmetro deste é muito pequeno. Nele é produzida uma perda de energia por efeito Joule, (aquecimento já citado anteriormente). É recomendado manter o DBCP igual a 10 - 15 mm para a soldagem com a transferência metálica por curto-circuito e igual a 15 – 25 mm para a transferência metálica do tipo spray.

2.2.6 Fonte de energia para soldagem MIG/MAG

Cada máquina de soldagem é projetada para atender de forma específica uma aplicação, fornecendo a corrente e a tensão necessárias para o processo. Dentre os requisitos básicos para as fontes de energia de soldagem a arco destacam-se: produzir saídas de corrente e tensão adequadas e permitir o ajuste de saída de corrente e tensão, além de controlá-las. A fonte de energia para o processo MIG/MAG (Figura 6), geralmente, possui curva característica estática de saída do tipo tensão constante, podendo ser fabricada com diversos tipos de tecnologia para controle da tensão, como chaves comutadoras, controle tiristorizado ou usando inversores. Este possui melhor desempenho principalmente por suas características, que possibilitam baixo consumo de energia, redução de peso e dimensões e capacidade de alterar a forma de onda de saída através da interpretação de sinais digitais.



Figura 6 - Fontes de soldagem MIG/MAG (adaptado de FRONIUS®).

O início da utilização do processo MIG/MAG foi dificultado devido à falta de controle efetivo sobre a transferência metálica em face da pouca evolução tecnológica das fontes de energia na época. No início, o processo MIG/MAG não foi recomendado para soldagem de

componentes estruturais de grande responsabilidade. Atualmente o processo MIG/MAG é considerado uma ferramenta de manufatura eficaz e de alta confiança no que diz respeito à qualidade de soldas (GOHR, 2002). Tudo isso se deve aos avanços tecnológicos, ocorridos nas últimas décadas, a instrumentos e equipamentos modernos empregados na soldagem e, à pesquisa, que acarretou apreciável benefício para a indústria permitindo metodologias de controle da transferência por meio de informações fornecidas pelas próprias variáveis de soldagem.

2.2.7 Consumíveis

Os consumíveis empregados na soldagem MIG/MAG são basicamente o arame-eletrodo e o gás de proteção. Para a soldagem de aços não ligados e com baixo teor de carbono, o arame-eletrodo geralmente apresenta composição química próxima à do metal de base. Scotti (1991) ressalta que a escolha do tipo de arame-eletrodo deve ser realizada em função das finalidades e exigências do processo de soldagem, pois alguns elementos de liga que são adicionados ao arame-eletrodo a fim de melhorar uma determinada qualidade podem afetar outras.

Na soldagem MIG/MAG, o tipo de gás de proteção utilizado tem bastante impacto nas características do arco, transferência de metal, na penetração, largura e formato do cordão de solda, na velocidade de soldagem e no custo do processo, dessa forma, é importante entender as aplicações de cada um, para se obter uma melhor eficiência na operação.

- Argônio:

O argônio é um dos gases mais comumente usados no processo de soldagem MIG/MAG. É inerte, com maior densidade que o ar, com menor potencial de ionização, promove a reignição do arco, baixo potencial de oxidação, baixa condutividade térmica e promove proteção estável e eficaz do arco.

- Hélio:

O hélio é um gás inerte com densidade menor que o ar e com maior potencial de ionização. Comparado ao argônio, é mais difícil realizar a reignição e requer uma tensão do arco maior para uma dada corrente e comprimento do arco.

- Dióxido de Carbono (CO₂):

O gás dióxido de carbono é um gás ativo, possui uma alta condutividade térmica e é responsável pela alta transferência de calor para o metal de base (SCOTTI, 1991).

- Misturas de gases:

As misturas de gases de proteção são formuladas para soldagem de tipos específicos de metais (SABIO, 2007). A escolha da mistura é baseada na disponibilidade e nas

necessidades do trabalho específico. Adicionar pequenas quantidades de CO₂ ao argônio é mais favorável ao soldar chapas finas, enquanto maiores quantidades de CO₂ são mais proveitosas para chapas grossas.

2.3 Macroestruturas de metal de solda por fusão (regiões)

2.3.1 Efeitos Metalúrgicos

O processo de soldagem por fusão é realizado com o emprego de energia térmica. Dessa forma as propriedades dos materiais fundidos tendem a mudar de acordo com as reações ocorridas durante o resfriamento, assim uma nova microestrutura pode ser formada no metal de solda e na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), como mostrado na Figura 7.

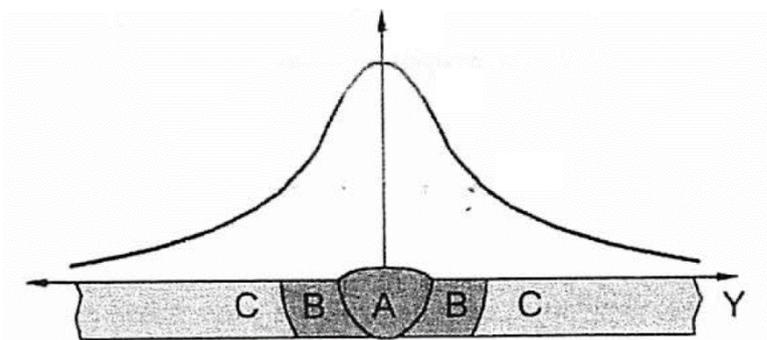


Figura 7 - Esquema das regiões de uma solda por fusão. A - Zona fundida (ZF), B - Zona Termicamente afetada (ZTA) e C - Metal de Base (MB). (Adaptado de MARQUES; MODENESI, 2011).

- Zona fundida: local onde aconteceu a fusão e a solidificação no momento da soldagem. Nesta zona a temperatura de pico é maior do que a temperatura de fusão do material de base.
- Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA): nesta área não ocorre a fusão do material de base, porém a microestrutura e as propriedades do material de base são alteradas pelo calor do procedimento. Nesta parte a temperatura atingida fica entre a temperatura de fusão e a temperatura crítica do material de base.
- Metal de base: região distante do local de soldagem que não é afetada pelo calor do processo, pois a temperatura nesta zona não ultrapassa à temperatura crítica do material de base.

2.3.2 Aspectos da poça de fusão

Na soldagem a arco elétrico com eletrodo consumível, como o MIG/MAG, o metal de adição fundido é misturado com o metal de base. Nos locais de superaquecimento há uma interação do metal fundido com gases presentes e com a escória determinando a composição química final do cordão. Neste contato pode ocorrer transferência de gases para o metal fundido, transferência de impurezas para a escória formada e volatilização de outros elementos. Dessa forma é necessário controlar a diluição dos gases na poça de fusão, para que a condição final do material unido não fique comprometida.

- Solidificação da poça de fusão:

O cordão de solda é formado com a solidificação do metal da poça de fusão. O processo de solidificação do metal fundido (metal de base ou metal de base junto com o metal de adição) determina as características macro e microestruturais do metal da junta soldada.

2.3.3 Descontinuidade em soldagem

As descontinuidades são consideradas como interrupções da estrutura típica de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Dentre as descontinuidades mais comuns, observa-se as descontinuidades dimensionais, descontinuidades estruturais e as propriedades inadequadas; que podem ser subdivididas em grupos:

- Descontinuidades dimensionais – defeitos nas dimensões ou na forma do cordão de solda. Exemplos: dimensões incorretas da solda, perfil incorreto da solda e distorções;
- Descontinuidades estruturais – defeitos micro e macroestruturais presentes no cordão de solda. Exemplos: mordeduras, inclusões de tungstênio, falta de fusão, porosidades, falta de penetração e trincas.
- Propriedades mecânicas inadequadas – resultado das reações metalúrgicas (por exemplo, incompatibilidade entre o metal de base e o metal de adição, um aporte de calor alto demais, outros).

Em geral, embora a união dos metais pela soldagem permite reduzir o tempo da operação e o peso da estrutura, devem ser consideradas algumas desvantagens: as juntas soldadas não são desmontáveis, há um alto risco de trincas e outros tipos de defeitos na junta soldada, além do fato que este processo de fabricação exige mão de obra especializada.

2.4 Processo de Manufatura Aditiva (MA)

A manufatura aditiva permite a fabricação de estruturas geométricas através de deposição de camadas, permitindo que componentes complexos sejam fabricados de forma mais simples, de uma só vez (sem subconjuntos) e sem o uso de outros tipos de ferramentas além do equipamento de deposição (Aparato de soldagem MIG/MAG, impressora 3D). Além disso, com a evolução da tecnologia do processo, é possível a utilização de uma alta gama de materiais como matéria-prima (Metais, polímeros, cerâmicas, etc.). (DEBROY et al., 2018, BOURELL et al., 2017, Gomes, B. F.).

A Manufatura Aditiva tem despertado grande interesse industrial desde a segunda metade de década 80. Os processos de MA surgiram como possíveis soluções para atender os requisitos de qualidade, menor tempo de produção e mais distintivo, a economia de recursos (matéria prima, etc). A MA pode ser realizada por várias formas e meios (Figura 8).

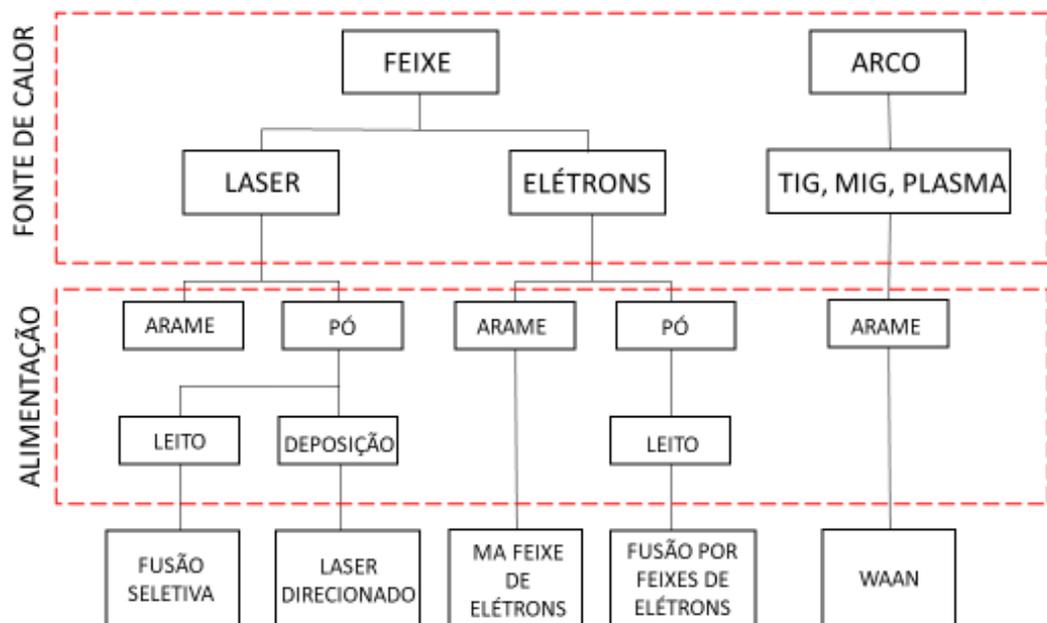


Figura 8 - Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com a fonte de calor e alimentação (Adaptado de MARTINA; WILLIAMS, 2015).

Manufatura Aditiva pelo processo de soldagem a arco (WAAM – Wire and Arc Additive Manufacturing ou MADA - Manufatura aditiva por deposição a arco) é uma técnica desenvolvida já em vários lugares do mundo. A MADA realiza a deposição por processos de soldagem convencionais, e, portanto, já dominados pela indústria, o que significa uma redução de custos. A MADA tem grande potencial para atender a elevadas taxas de

deposição, mantendo a precisão em uma faixa satisfatória e sem ter limites dimensionais para fabricação da peça.

Devido a necessidade em se obter maiores taxas de deposição e produtividade, se fez necessário o desenvolvimento de novas técnicas, como a soldagem com adição de material. O material a ser adicionado pode ser pré-aquecido (arame quente) caso haja a necessidade em se obter maiores taxas de deposição (preenchimentos, revestimentos), ou pode ser usado a adição de material na própria temperatura ambiente (arame frio), em execuções que exigem menos deposição que a anterior, Paes (2016).

Além disso, também segundo Paes (2016), algumas técnicas podem influenciar no processo, como a disposição geométrica do arame. Adicionando o arame de forma tangencial, diferente da forma tradicional (adição do arame de forma radial), o arame atingirá a região de maior temperatura da coluna de plasma fazendo com que haja um aumento da taxa de fusão.

Já tem algumas inovações sendo inseridas no mercado, como cita Jorge (2020), como o uso de alimentação de arame frio pulsado, sendo baseada em mecanismos capazes de realizar movimentos alternados de “vai-e-vem” na alimentação de arame frio. Tal técnica tem como objetivo melhorar a dinâmica da poça de fusão, diminuindo o risco do surgimento de alguns defeitos como a porosidade, Pike (2013).

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.

CAPÍTULO III

MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS

3.1 Métodos

Nesse trabalho foram realizados os testes de deposição de camadas sobrepostas, em forma de parede, de aço carbono utilizando o processo de MIG/MAG convencional com adição de arame frio. Em um primeiro momento, na configuração sem uso de arame frio, foi obtida a parametrização correspondente a uma transferência metálica estável por curto-circuito e uma deposição com geometria adequada (sem distorções, maior altura e menor largura do cordão de solda). O arame-eletrodo utilizado foi de 1 mm de diâmetro e a deposição ocorreu com a tocha na posição perpendicular. A condição serviu de base para comparação para os testes com adição de arame frio. Na Tabela 1 estão dispostos os parâmetros de regulagem da soldagem MIG/MAG.

Tabela 1 - Parâmetros de regulagem do modo MIG/MAG convencional por curto circuito.

DBCP (mm)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	cb	cca
15	30	4,5	0,5	-15

Observação: DBCP – distância do bico de contato a peça, Vs – velocidade de soldagem, Va – velocidade de alimentação, cca – correção de comprimento de arco e cb – correção boost (tanto “cb”, como “cca” são ajustados na fonte de energia TPS 5000).

Em um segundo momento foram feitos os testes com adição de arame frio simultaneamente ao arame-eletrodo. Foi formado um arranjo de dois arames de 1 mm de diâmetro. As pontas dos arames frios foram alinhadas simetricamente em relação ao arame-eletrodo, posicionadas na parte frontal a 60° de inclinação do eixo e a 7 mm de distância do mesmo. A velocidade de alimentação dos arames frios variou entre os intervalos de 0,5 m/min e 1 m/min, em que há manutenção da estabilidade do arco e de formação de camadas.

As paredes depositadas foram avaliadas pelos seus parâmetros geométricos absolutos e eficientes, para determinar o limite da taxa de deposição e da eficiência de deposição, usando um único nível de energia (aporte de calor).

3.2 Equipamentos e consumíveis

A bancada operacional e experimental (Figura 9) é montada e ajustada para atender os objetivos marcados, com um robô de soldagem, um posto de soldagem MIG/MAG, um alimentador de arame frio e um direcionador de arame frio. Para fins de identificação, seguem os modelos dos equipamentos:

- Robô de soldagem FANUC, série ARC MATE 100iBe, com controlador R-J3IB;
- Fonte de soldagem TRANS PULSE SYNERGIC 5000 FRONIUS, com controle remoto RCU 5000i;
- Alimentador de arame frio STA IMC SOLDAGEM;
- Direcionador de arame frio fabricado por Kovalenko em conjunto com Moraes para trabalho de Kovalenko (2019).

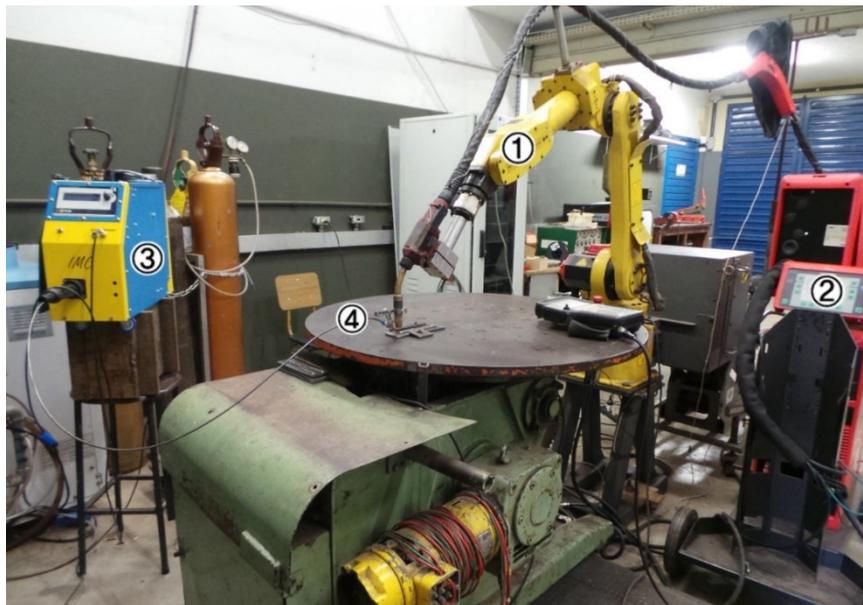


Figura 9 - Bancada Experimental.

- Robô de soldagem FANUC:

O robô industrial de soldagem (Figura 10) possui seis graus de liberdade e capacidade de carga de 6 kg. Possui massa total de 238 kg e seu alcance é de 1373 mm. O controle permite a utilização das funções principais, como a gravação de programas e do servo controle. A inclusão das trajetórias no sistema se dá através do uso da própria linguagem de programação. Contudo, é necessário mencionar que a abertura e fechamento do arco acontece de forma manual, pelo botão-acionador da fonte de soldagem.



Figura 10 - Robô ARC Mate 100, Fanuc.

- Fonte de soldagem TRANS PULSE SYNERGIC 5000 FRONIUS:

O modo de funcionamento da fonte TRANS PULSE SYNERGIC 5000 FRONIUS (Figura 11), é determinado de acordo com o tipo de material de arame-eletrodo, diâmetro de arame-eletrodo e gás de proteção. Antes de começar, é necessário instalar o condutite e os roletes adequados para cada tipo de material e diâmetro de arame. A força de aperto dos roletes do alimentador do arame principal depende do tipo de material e do tipo de cavidade de roletes.



Figura 11 - Fonte de soldagem TPS 5000, Fronius com alimentador de arame.

- Alimentador de arame frio STA IMC SOLDAGEM:

Para a adição de dois arames frios, o alimentador não foi usado de forma comum, ou seja, ele não avançava o arame embobinado, eles foram cortados em pedaços de aproximadamente 5 m e alimentados juntos pelos mesmos roletes do alimentador (de um rasgo maior), como mostrado nas Figura 12. Neste caso, um arame fica no fundo do rasgo do rolete e o outro está preso entre o primeiro arame e o rolete superior. Foi verificado que a alimentação de dois arames frios aconteceu sem travamentos.

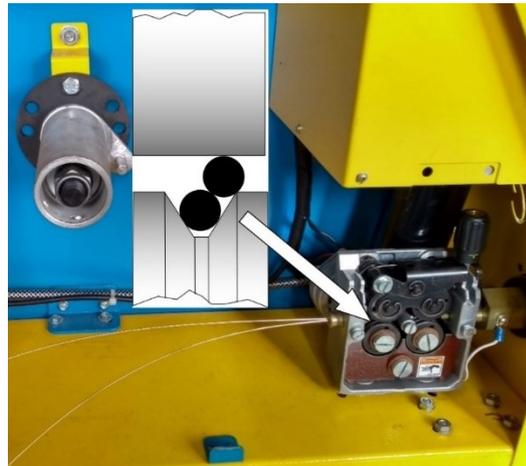


Figura 12 - Mecanismo de alimentação de arames frios.

Na alimentação de dois arames de 1,0 mm de diâmetro, foi utilizado um rolete para o diâmetro de arame de 1,2 mm.

- Direcionador de arame frio:

O direcionador de arame frio fabricado por Kovalenko em conjunto com Moraes para o trabalho de Kovalenko (2019) é mostrado na Figura 13. Ele permite realizar os ajustes da posição do arame frio na vertical, na horizontal e também o ajuste angular.

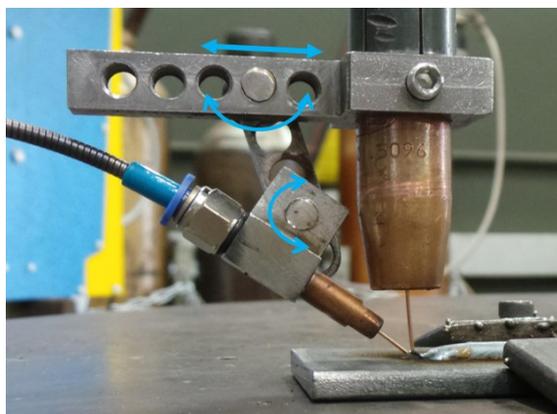


Figura 13 - Direcionador de arame frio.

- Bico de contato:

O bico de contato utilizado para a adição de apenas um arame frio possui o orifício de diâmetro igual ao do arame. Para o caso de adição de dois arames frios, foi usado um bico de diâmetro ligeiramente menor do que a soma de dois diâmetros dos arames frios sendo o seu orifício achatado de maneira a permitir uma melhor acomodação de dois arames frios (Figura 14).



Figura 14 - Alimentação de dois arames frios pelo mesmo bico.

- Sistema de Aquisição de dados:

O monitoramento da corrente e da tensão será realizado através de um sistema de aquisição de dados, fabricado pelo próprio laboratório de soldagem (Laprosolda). A medição da corrente é feita com o uso do transdutor LEM® modelo HAT-600 (Figura 15), ao passo que o sinal de tensão do arco é capturado por um condicionador de sinais e transferido para a placa de aquisição NI USB-6009 (Figura 16).



Figura 15 - Transdutor de Corrente Linha Industrial - Série HAT.



Figura 16 - Placa de aquisição de sinais - NI USB-6009.

A placa de aquisição é plugada no USB do computador e com o uso do programa de visualização, é possível capturar e visualizar as informações adquiridas, de modo a fazer análises necessárias.

- Bancadas de análise macrográfica:

O procedimento de preparação para análise é de grande importância, pois a aparência da macroestrutura real do material em questão pode ser mascarada ou até totalmente obstruída como resultado da preparação incorreta do molde, causando ao estudo interpretações errôneas e custosas.

Para a análise macrográfica dos cordões depositados foi necessário a realização de cortes transversais nas chapas, aproveitando da cortadora metalográfica presente no Laprosolda (Figura 17) ou da cortadora metalográfica do laboratório de tribologia (Figura 18).



Figura 17 - Cortadora Metalográfica do laboratório de soldagem.



Figura 18 - Cortadora Metalográfica do laboratório de tribologia.

Após o procedimento de corte e do embutimento de amostras no molde de resina, as mesmas devem ser lixadas usando a lixadeira metalográfica elétrica presente no Laprosolda (Figura 19) e, também usando uma lixadeira manual, seguindo uma sequência lógica crescente de gramatura das lixas até alcançar 600 mesh. O ataque químico das amostras metalográficas será usando Nital 3%.



Figura 19 - Lixadeira Metalográfica dupla.

- Consumíveis:

O metal de base utilizado foi o aço carbono ABNT 1020 (chapas de teste de 6,1 mm de espessura, 50,8 mm de largura e 170 mm de comprimento). As chapas não serão

esmerilhadas, pois o foco principal das análises está nas sobreposições (umectação e fluidez) dos cordões para a formação das paredes.

A composição química do arame eletrodo deve ser compatível com a do metal de base, pois essa composição determina o metal fundido que, vai influenciar as características da junta soldada. O arame eletrodo e arames frios foram do tipo AWS ER70S-6. O diâmetro do arame também deve ser determinado dentro das variedades existentes, em relação ao trabalho a ser executado, isto é, com a espessura das chapas e posição de soldagem, dentre outros fatores.

O gás de proteção deve ser adequado à composição química do arame eletrodo. O gás de proteção usado foi da composição de Ar + 8% CO₂ e com vazão de 15 L/min.

3.3 Metodologia de avaliação

Para a análise visual das amostras e para o registro das imagens foi utilizado um microscópio do tipo estereoscópio com aumento de até 64 vezes. As medições dos parâmetros geométricos foram obtidas pelas imagens de seções transversais (Figura 20), sendo divididos em valores absolutos (altura, largura, área total depositada e área fundida de metal de base) e valores efetivos (altura, largura, área efetiva depositada, fator de eficiência de deposição). Os valores apresentados são os valores médios determinados a partir de três medições realizadas com desvio padrão.

Valores absolutos, conforme mostrado na Figura 20, foram medidos da seguinte forma:

Altura: Para a medição da altura absoluta foi necessário separar geometricamente uma camada da outra, para isso foram identificados os pontos laterais de separação entre as camadas e traçar as linhas horizontais entre elas, após as mesmas foram ligadas entre as linhas na vertical, entre os pontos centrais das linhas horizontais.

Largura: Para realizar a medição da largura absoluta foram traçadas as linhas retas que passam pelos dois pontos laterais mais afastados do centro.

Área total depositada: É a somatória das áreas das camadas acima da superfície da chapa.

Área fundida: É a área de fusão do metal de base (abaixo da superfície da chapa).

Valores efetivos, conforme mostrado na Figura 20, foram medidos da seguinte forma:

Altura: altura efetiva da parede é a somatória das alturas individuais de cada camada, exceção parte superior da última camada.

Largura: Para realizar a medição da largura, é necessário traçar linhas verticais que passam pelos dois pontos laterais entre as camadas, e interligar os centros delas por linha horizontal.

Área Efetiva: Para a medição da área efetiva é necessário separar geometricamente uma camada da outra, para isso é importante identificar os pontos laterais de separação entre as camadas e traçar as linhas horizontais entre elas, após a divisão das camadas, realizar a medição da área total desconsiderando as bordas das camadas e o “chapéu” da última camada.

Fator de eficiência de deposição: considera-se nesse trabalho como a relação entre a área efetiva e a área absoluta depositada.

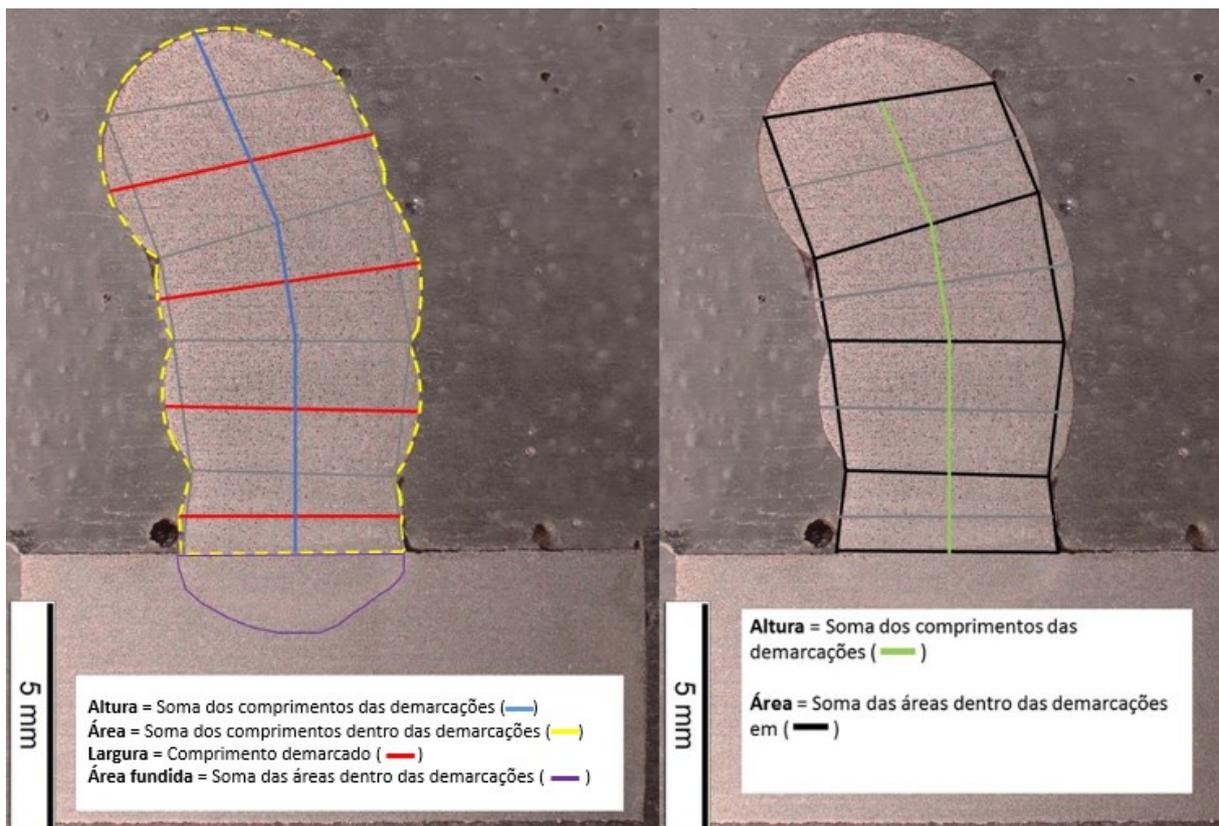


Figura 20 - Esquema representando o método de medição dos valores absolutos (à esquerda) e efetivos (à direita).

CAPÍTULO IV

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 2 mostra os parâmetros da soldagem MIG/MAG monitorados.

Tabela 2 - Parâmetros monitorados do processo de soldagem MIG/MAG convencional.

$V_{a \text{ real}}$ (m/min)	I_m (A)	I_{rms} (A)	U_m (V)	U_{rms} (V)
4,4	125,7	129,6	17,4	18,2

Obs.: V_a real – velocidade de alimentação; I_m – corrente media; I_{rms} – corrente eficaz; U_m – tensão do arco media; U_{rms} – tensão do arco eficaz

A Figura 21 apresenta as paredes após o procedimento conforme descrito.



Figura 21 - Aspecto superficial das paredes depositadas (KOVALENKO, 2019).

A Figura 22 apresenta os cordões depositados durante a etapa experimental já separados e enfileirados.



Figura 22 - Cordões cortados e enfileiras para não perder identificação no agrupamento.

A Figura 23 apresenta a macroestrutura das paredes após o processo de soldagem.

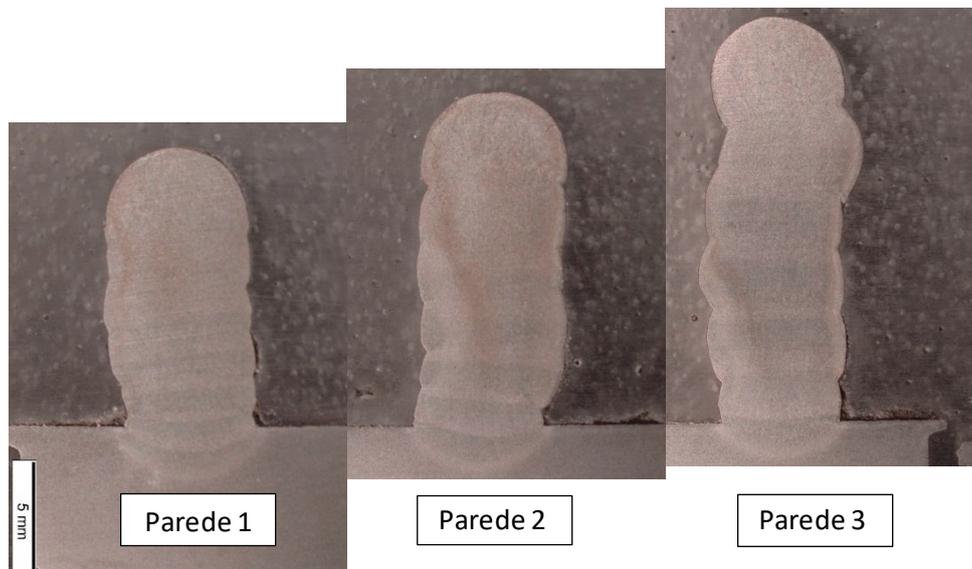


Figura 23 - Aspecto superficial das paredes (KOVALENKO, 2019). Parede 1 (Sem arame frio), Parede 2 (2 arames frios de 1 mm, com velocidade de 0,5 m/min) e Parede 3 (2 arames frios de 1 mm, com velocidade de 1,0 m/min).

A Tabela 3 apresenta os valores absolutos e efetivos de parâmetros geométricos das paredes.

Tabela 3 – Parâmetros geométricos absolutos e efetivos das paredes.

Parede	Condição	Camada	Valores absolutos				Valores efetivos			
			A (mm)	L (mm)	At (mm ²)	A _{ZTA} (mm ²)	A (mm)	L (mm)	At (mm ²)	F _{ED}
1	sem arame frio	1	0,446	5,301	63,748	11,307	0,446	5,226	50,661	0,795
		2	1,546	5,418			1,546	5,021		
		3	2,020	5,960			2,020	5,503		
		4	2,002	6,105			2,002	5,889		
		5	1,825	5,867			1,825	5,551		
		6	3,881	5,664			2,101	3,585		
		Média	1,953	5,719			1,657	5,129		
		SOMA	11,720				9,940			
2	2x1,0x 0,5 m/min	1	1,231	5,289	77,96	8,722	1,231	4,766	66,752	0,856
		2	2,167	5,783			2,167	5,054		
		3	2,161	6,077			2,161	5,630		
		4	2,104	5,952			2,104	5,826		
		5	2,557	6,038			2,557	5,429		
		6	3,886	6,025			2,117	5,493		
		Média	2,351	5,861			2,056	5,366		
		SOMA	14,106				12,337			
3	2x1,0x 1,0 m/min	1	1,733	5,146	88,231	6,286	1,733	4,701	77,091	0,873
		2	2,886	5,744			2,886	5,146		
		3	2,796	5,963			2,796	5,103		
		4	2,5	5,787			2,5	5,205		
		5	3,337	5,864			3,337	4,014		
		6	4,223	5,740			2,85	4,709		
		Média	2,9125	5,707			2,684	4,813		
		SOMA	17,475				16,102			

Obs.: A - altura; L - largura; At - área total depositada; A_{ZTA} - alcance de zona termicamente afetada; F_{ED} - fator de eficiência de deposição.

O gráfico da Figura 24, apresenta os valores de áreas absolutas e efetivas em relação à velocidade de alimentação de arame frios.

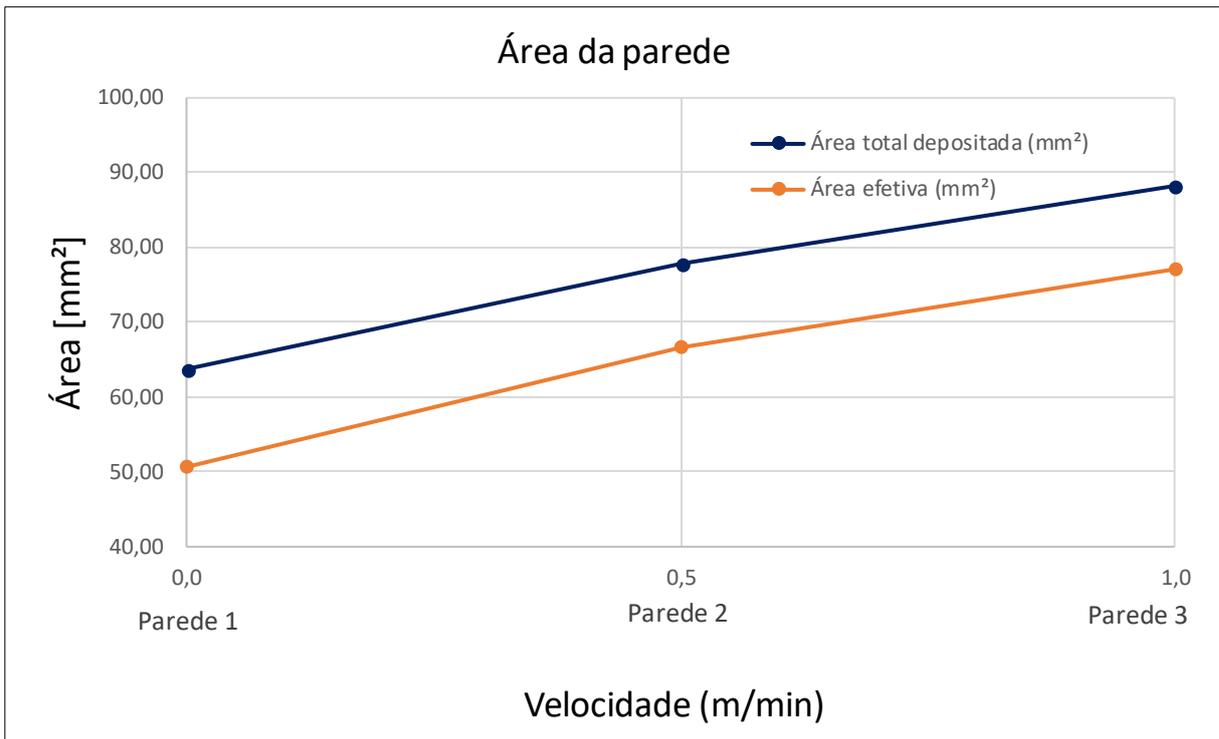


Figura 24 - Gráfico das áreas absolutas e efetivas em relação a velocidade de alimentação de arame frio.

O gráfico da Figura 25, apresenta os valores de altura absoluta e efetiva em relação velocidade de alimentação de arame frio.

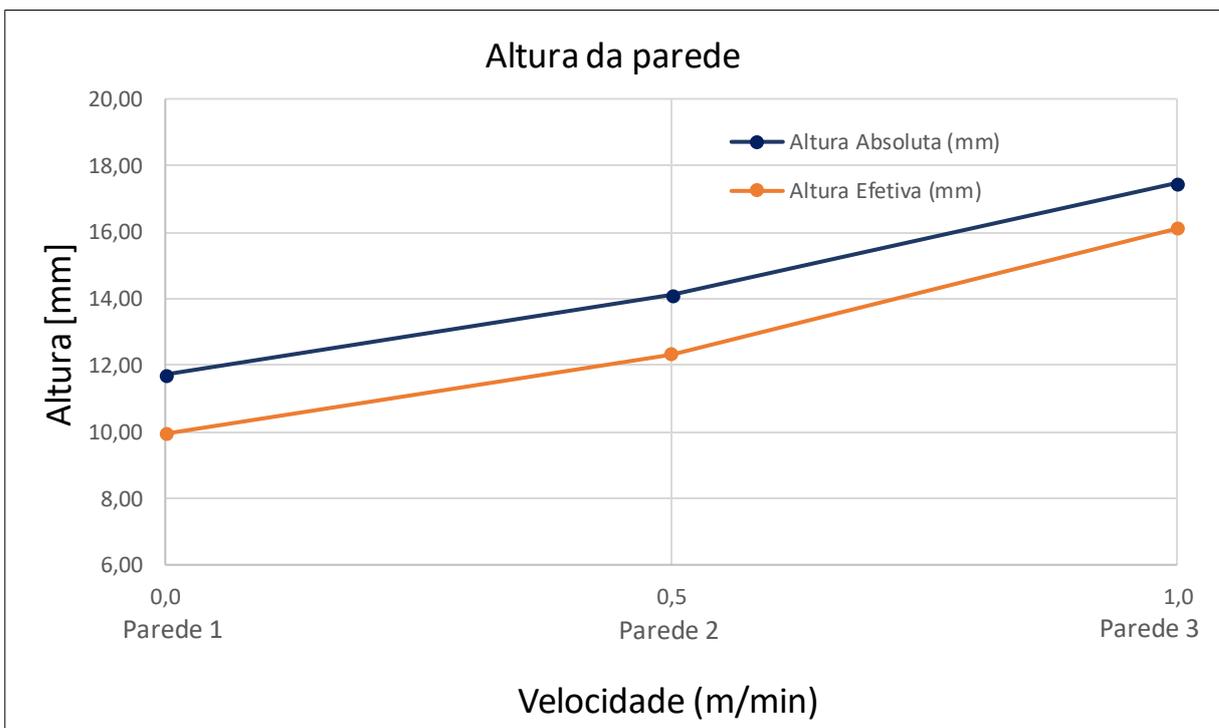


Figura 25 - Gráfico da altura absoluta e efetiva em relação velocidade de alimentação de arame frio.

O gráfico da Figura 26, apresenta os valores de largura média absoluta e efetiva em relação a velocidade de alimentação de arame frio.

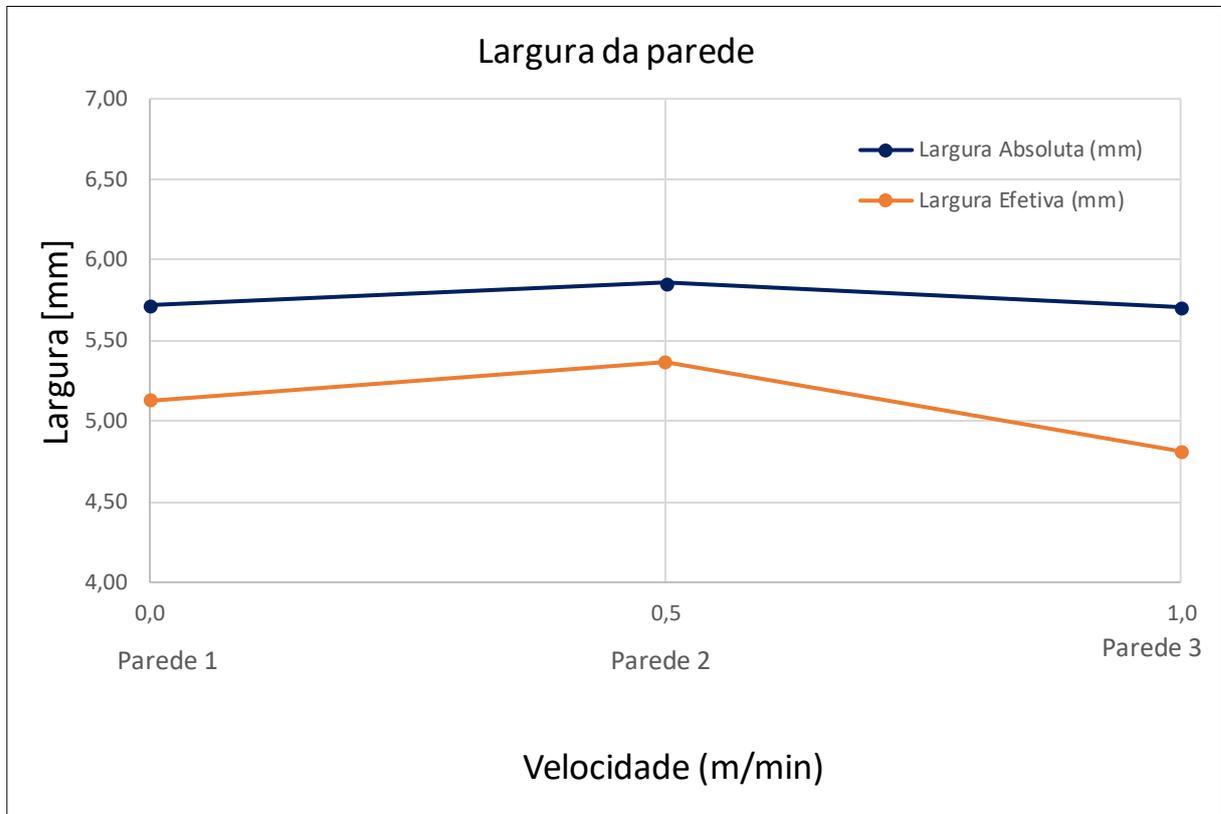


Figura 26 - Gráfico da largura média absoluta e efetiva em relação velocidade de alimentação de arame frio.

O gráfico da Figura 27, apresenta os valores do alcance da ZTA em relação a velocidade de alimentação.

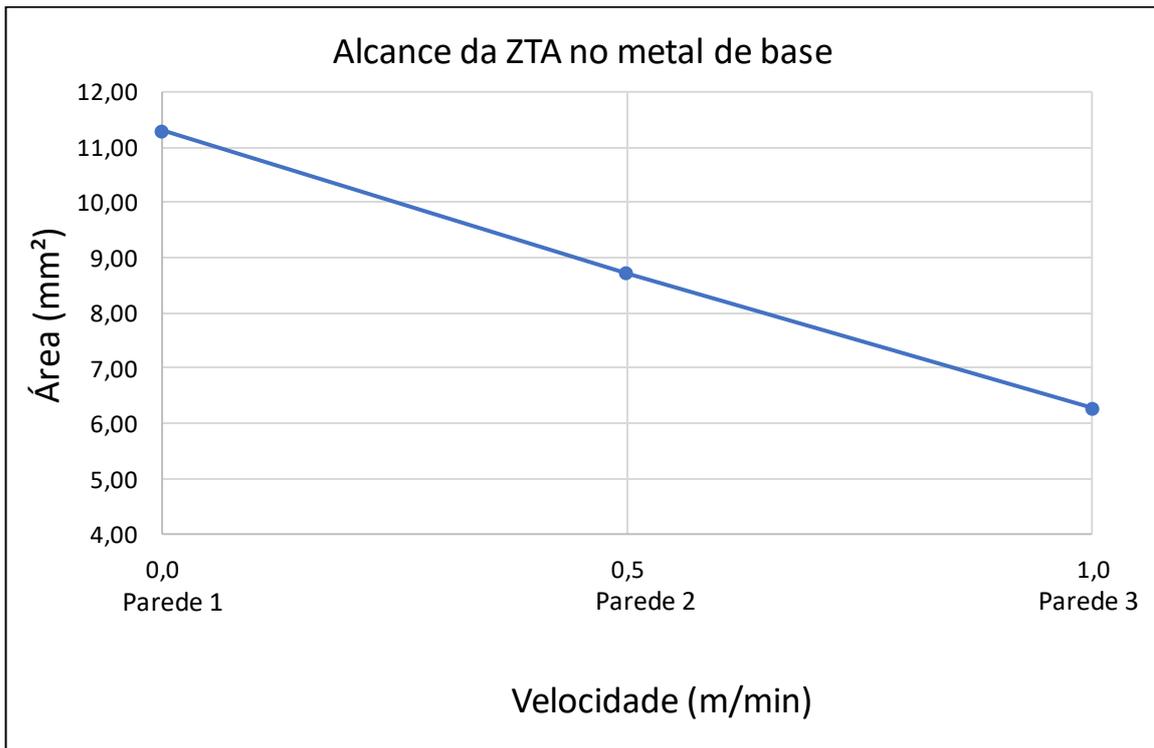


Figura 27 – Gráfico da ZTA em relação a velocidade de alimentação.

O gráfico da Figura 28, apresenta os valores da eficiência de deposição (explicado na página 31) em relação a velocidade de alimentação de arame frio.

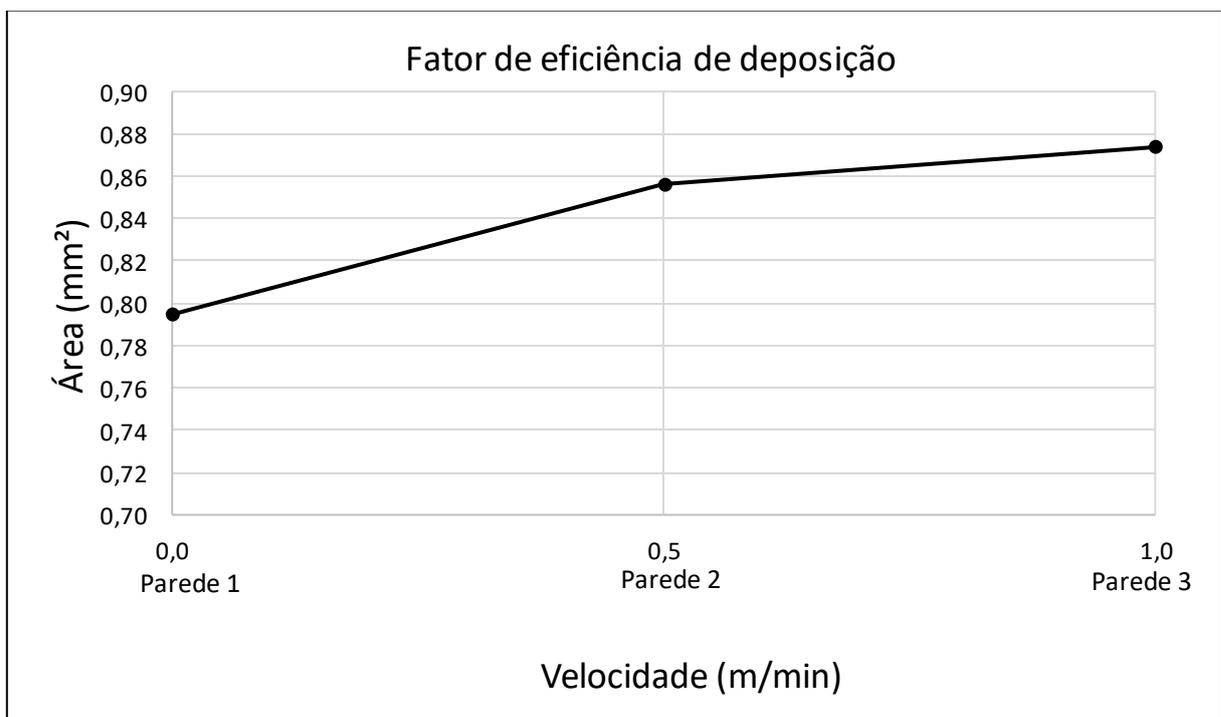


Figura 28 – Gráfico de eficiência de deposição em relação a velocidade de alimentação de arame frio.

Seguindo os princípios físicos, após ocorrer a fusão do arame principal, a fusão do metal de base e do arame frio vai ser promovida pelo calor restante em conformidade com as condições termodinâmicas criadas. A partir dos resultados obtidos foi possível observar a formação das tendências do comportamento dos parâmetros geométricos das paredes depositadas sem e com adição de arame frio.

Em relação aos valores absolutos foram notados os seguintes comportamentos. De acordo com o aumento da quantidade de metal frio adicionado há uma maior taxa de deposição, e por consequência o aumento das áreas de metal depositado das paredes, conforme o esperado. As alturas das paredes aumentaram de acordo com o aumento da quantidade de metal adicionado, enquanto as larguras permaneceram sem alterações consideráveis. Observou-se um leve aumento da largura da parede 2 (velocidade de 0,5m/min de adição de arame frio) e uma leve redução de largura da parede 3 (velocidade de 1 m/min), ambas em relação a parede 1 (sem adição de arame frio). Acredita-se que com o aumento da velocidade de alimentação, há mais metal frio adicionado, que altera a condição de molhabilidade e fluidez de poça de fusão, assim induzindo a maior acomodação de metal adicionado na posição vertical do que na posição horizontal. Assim, a diminuição da largura é compensada pelo aumento da altura. Isso pode ser observado no gráfico da Figura 25 que possui taxas de crescimento de altura conforme aumento de velocidade de alimentação de arame frio. A taxa de crescimento de parede entre as velocidades de alimentação de 0,5 m/min e 1,0 m/min possui um valor maior do que a taxa de crescimento de parede com velocidade de 0,5 m/min em comparação com a configuração sem adição de arame frio.

O calor gerado para fundir o material é mesmo, mas a distribuição de calor entre arames frios e metal de base é influenciada pela dinâmica de fusão dos arames. Com o aumento da quantidade de metal frio adicionado há também redução de tamanho da poça de fusão e consequentemente da área fundida. Assim, a zona termicamente afetada (ZTA) também tem seu valor diminuído com o aumento da velocidade de alimentação, pois para fundir os arames frios precisa-se gastar o calor gerado pelo arco.

Os valores efetivos, como esperado, são menores que os valores absolutos, pois consideram a realização da etapa de usinagem e acabamento das paredes depositadas. Porém, ao contrário do esperado, os valores efetivos se mantiveram aproximadamente no mesmo nível em relação aos valores absolutos, mesmo com aumento da velocidade de alimentação de arames frios. O fator de eficiência de deposição, que indica a porcentagem de material depositado aproveitado aumentou levemente com aumento de velocidade de deposição (veja Tabela 3). Assim entende-se que a adição de arame frio resulta nos ganhos de aumento de área depositada e redução de área fundida, sem redução de qualidade e aproveitando o mesmo nível de energia e tempo de deposição.

A figura 29 apresenta o gráfico de dispersão dos valores de altura das paredes.

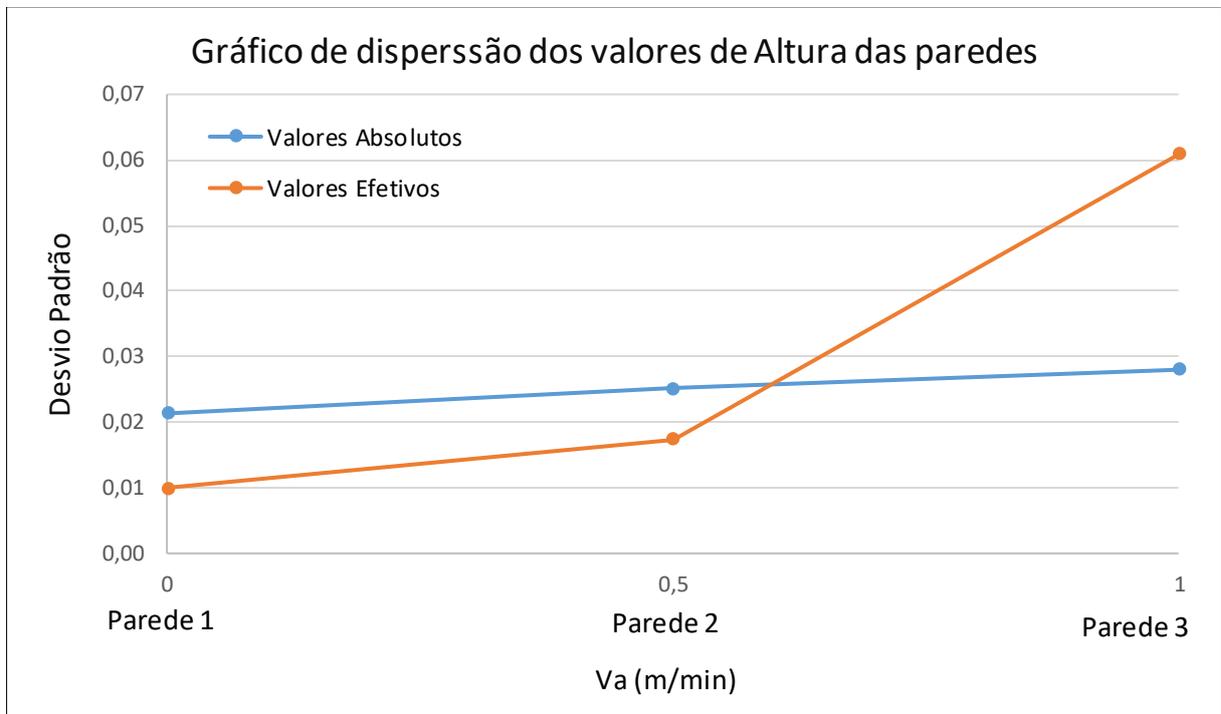


Figura 29 – Gráfico de dispersão dos valores de altura das paredes.

Em relação ao gráfico de dispersão dos valores de altura de parede os valores absolutos apresentaram uma pequena dispersão que pode ser explicada por erros como, erro na medição e observador ou medidor. Já nos valores efetivos a dispersão é um pouco mais significativa. Essa maior dispersão dos resultados pode ter sido influenciada pela forma de medição. Visto que na medição da última camada, considerando os valores efetivos, é necessário retirar o “chapéu” presente na última camada. Dessa forma é notável a dificuldade para medir esse ponto, pois o software utilizado não compreende as ferramentas necessárias para medição com mais precisão.

A figura 30 apresenta o gráfico de dispersão dos valores de área das paredes.

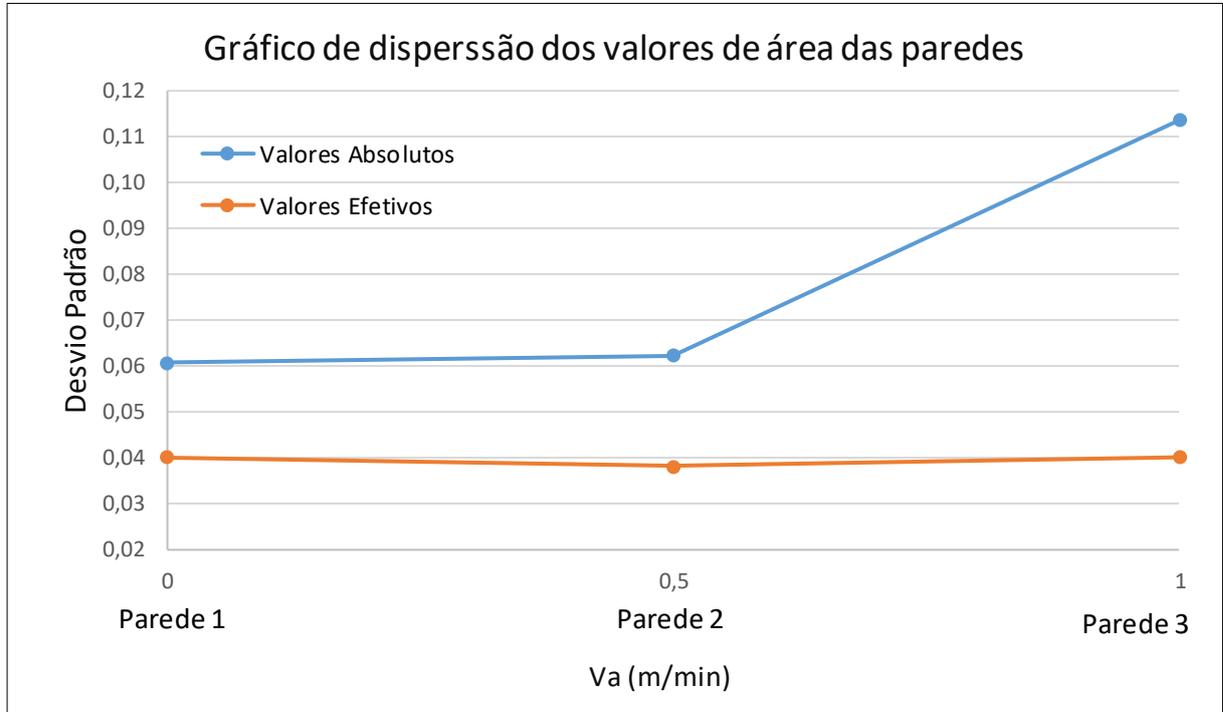


Figura 30 – Gráfico de dispersão dos valores de área das paredes.

No gráfico de dispersão da área da parede os valores absolutos apresentaram maior dispersão em relação aos valores efetivos. Nesse sentido pode-se ressaltar o problema do gráfico de dispersão de altura de parede, visto que para a medir a área absoluta da parede com maior precisão seria necessário que o software acompanhasse a curvatura do cordão de solda, enquanto na medição da área efetiva não é necessário acompanhar a curvatura do cordão de solda. Dessa forma, essa maior dispersão pode ter sido influenciada tanto pela falta de ajuste fino do software, quanto pela qualidade das imagens.

A figura 31 apresenta o gráfico de dispersão dos valores do alcance da ZTA das paredes.

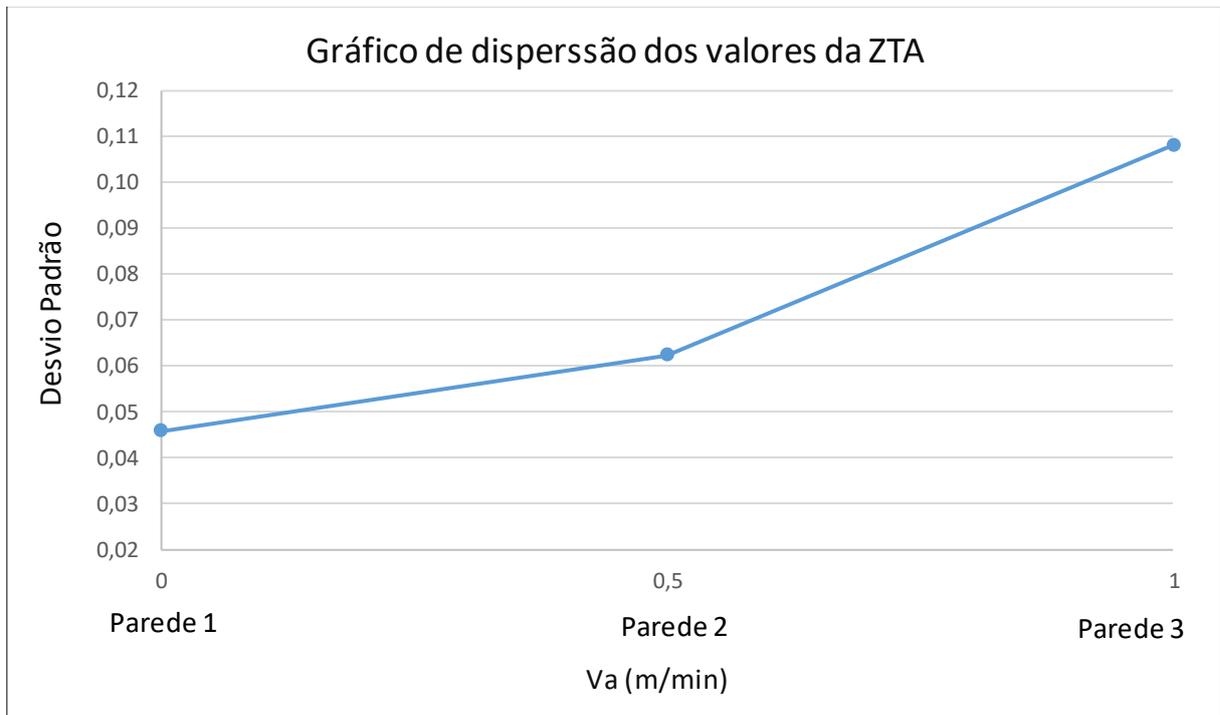


Figura 31 – Gráfico de dispersão dos valores do alcance da ZTA das paredes.

No gráfico de dispersão dos valores da zona termicamente afetada é notável um aumento da dispersão dos valores de acordo com o aumento da velocidade de alimentação. Esse aumento pode ter acontecido devido à dificuldade em mapear a zona termicamente afetada, uma vez que as imagens das zonas termicamente afetadas das paredes não ficaram nítidas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, nas condições deste trabalho, pode-se concluir que a adição de arame frio em meio ao processo de deposição de paredes por Manufatura Aditiva com processo MIG/MAG Convencional é uma prática adequada e favorável, já que, para o mesmo nível de energia e mesmo tempo de deposição a adição de arame frio neste processo resulta no aumento da altura, leve redução ou manutenção da largura, aumento da área depositada e redução da área fundida (no metal de base) das paredes depositadas.

Adicionalmente é possível ressaltar que mesmo aumentando a velocidade de alimentação dos arames frios no processo MIG/MAG Convencional o fator de eficiência de deposição foi mantido mais ou menos constante e até cresceu ligeiramente, demonstrando a robustez do processo da deposição das paredes e a vantagem da técnica utilizada.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos neste trabalho, é possível ressaltar alguns fatores que podem interferir positivamente na qualidade do processo.

- Determinar as condições para o melhoramento da perpendicularidade das paredes depositadas, pois esta condição está diretamente relacionada com o aumento da altura da parede.
- Aplicar tecimentos transversais como forma de controlar a geometria da largura e da altura das paredes.
- Utilizar outros modos operacionais do processo MIG/MAG, como o Pulsado e Spray, dado que a taxa de deposição pode ser diferente de acordo com o modo de operacional utilizado.

REFERÊNCIAS

- AWS. **Welding Handbook**; Welding technology. 8. ed. vol.1Miami: American Welding Society, 1987.
- Tocha solda MIG 400A - Weld Vision**. Loja do Soldador, 2022. Disponível em: [https://www.lojadosoldador.com.br/acessorios-solda-e-corte/tochas-especiais/tocha-mig-400a-40k-3-ou-5-metros-premium-weld-vision]. Acesso em: janeiro de 2022.
- BARRA, S. R. **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida**. 2003. 209f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- GOHR, R. J. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. 168p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- KOVALENKO, O. **Avaliação de aspectos da estabilidade do arco e da geometria de pré-formas em manufatura aditiva utilizando o processo MIG/MAG CMT com foco na liga Ti-6Al-4V**. 2019. 244 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.629>. Acesso em: 2022.
- MARQUES, P. V; MODENESI, P. J. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. 3. Ed. 363p. 2011. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- MARTINA, F; WILLIAMS, S. **Wire+Arc Additive Manufacturing vs. Traditional Machining From Solid: A Cost Comparison**, Cranfield University, 2015, 27p.
- MIRANDA, H. C. **Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado**. 2002. 213p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, 2002.
- MONDENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. 54p, Belo Horizonte, 2007.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. **ISO/ASTM 52900** (ASTM F2792). Additive manufacturing –General principles –Terminology. 19p. 2015. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>>. Acesso em: 14 set. 2021
- PETRACHI, L.M. **Avaliação da influência da distância entre o bico de contato e a peça na taxa de fusão no processo de soldagem MIG/MAG**. PFC, 2021, 39 p. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32018>. Acesso em: 29 set. 2021.
- PONOMAROV, V. **Disciplina FEMEC41085 - Fundição e Soldagem**. 2021. Soldagem, corte e operações afins. 44 slides. color.
- QUITES, A. **Introdução à soldagem a arco voltaico**.1. ed. Florianópolis: Soldasoft, 352p. 2002.
- SABIO, A. D. **Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio**. 2007. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Instituto Tecnológico da Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SCOTTI, A. **Process modeling to establish control algorithms for automated GMAW**. 1991. 273 f. Thesis (PhD.) - Cranfield Institute of Technology, UK.1991.

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

FISCHER, Alexander – **Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW – Arco Pulsado**. Dissertação de Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Concentração de Processos de Fabricação – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – Belo Horizonte – MG – 2011.

PAES, L. E. S. **Soldagem TIG Orbital – Técnica de Alimentação Dinâmica do arame visando aumento na produtividade**. Orientador: Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra. 2016. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

DEBROY, T., WEI, H.L., ZUBACK, J.S., et al., 2018, "**Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties**". In: **Progress in Materials Science**. v. 92, pp. 112–224.

BOURELL, D., KRUTH, J.P., LEU, M., et al., 2017, "**Materials for additive manufacturing**". In: **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 66, pp. 659– 681.

Gomes, B. F. **Manufatura aditiva e caracterização de componentes da liga Al-4,4%Mg utilizando diferentes processos de deposição metálica - CMT, PMC E PMC-MIX**. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018. IX, 93 p.: il.; 29,7 cm.

RIBEIRO, R. A.; DOS SANTOS, E. B. F.; ASSUNÇÃO, P. D. C.; MACIEL, R. R.; BRAGA, E. M. **Predicting weld bead geometry in the novel CW-GMAW process**. *Weld J.* 94(9): 301-s to 311-s,2015.

COSTA, E.S.; ASSUNÇÃO, P.D.C.; DOS SANTOS, E.B.F.; FEIO, L.G.; BITTENCOURT, M.S.Q.; BRAGA, E.M. **Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding**. *Sci Technol Weld Join.* 22:706–713, 2017. <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1306014>

PIKE, G. **Evaluation of the Tip Tig Welding System, a Semi-automatic Hot Wire GTAW Process**, Newport News: Newport News Shipbuilding, 2013.