

BRUNO BALDUINO MATTOS

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ARAME FRIO AO PROCESSO MIG/MAG NA ÁREA
FUNDIDA E FALTA DE FUSÃO DOS CORDÕES DEPOSITADOS**



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

2022

BRUNO BALDUINO MATTOS

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ARAME FRIO AO PROCESSO MIG/MAG NA ÁREA
FUNDIDA E FALTA DE FUSÃO DOS CORDÕES DEPOSITADOS**

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

BRUNO BALDUINO MATTOS

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ARAME FRIO AO PROCESSO MIG/MAG NA ÁREA FUNDIDA E FALTA DE FUSÃO DOS CORDÕES DEPOSITADOS

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

Mattos, B. B. **Influência de adição de arame frio ao processo MIG/MAG na área fundida e na falta de fusão dos cordões depositados. 2022.** Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

O processo de soldagem MIG/MAG tem um grande potencial não apenas na área de união de metais, mas também na área de fabricação por deposição, como a manufatura aditiva. As técnicas que acrescentam benefícios do processo são altamente requisitadas. Neste trabalho foi avaliada a influência de adição de arames frios ao processo MIG/MAG nas características geométricas do cordão de solda, revelando também as dificuldades envolvidas durante a aplicação. O arame frio foi adicionado em diferentes arranjos: um único arame frio e dois arames frios alimentados ao mesmo tempo. Ambos arranjos foram comparados com a condição sem uso de arame frio. Foram utilizados arames de três diferentes diâmetros: 0,6, 0,8 e 1 mm. Além disso, foi determinada a velocidade máxima de alimentação. A bancada experimental foi composta por um robô de soldagem, um posto de soldagem MIG/MAG, um alimentador de arame frio e um direcionador de arame. Os testes demonstraram que a adição de arame frio ao processo MIG/MAG convencional é vantajosa para características de cordão. Usando a mesma quantidade de energia obteve-se aumento de quantidade de material depositado e redução de área fundida de metal de base. Porém, um aumento excessivo da velocidade de alimentação de arame frio pode acarretar em uma redução demasiada de área fundida de metal de base podendo até gerar faltas de fusão. Na adição de arame frio de maior diâmetro, assim como a adição de dois arames frios, as influências ficam mais evidentes já nas velocidades de alimentação mais baixas.

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

Mattos, B. B. **Influence of cold wire addition to the MIG/MAG process in the molted area and lack of fusion of deposited cords.** 2022. Course Completion Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

Abstract

The MIG/MAG welding process has great potential not only in the area of joining metals, but also in the area of deposition manufacturing, such as additive manufacturing. Techniques that add benefits to the process are in high demand. In this work, the influence of adding cold wires to the MIG/MAG process on the geometric characteristics of the weld bead was evaluated, also revealing the difficulties involved during the application. Cold wire was added in different arrangements: a single cold wire and two cold wires fed at the same time. Both arrangements were compared with the condition without the use of cold wire. Wire of three different diameters were used: 0.6, 0.8 and 1 mm. In addition, the maximum feeding speed was determined. The experimental bench consisted of a welding robot, a MIG/MAG welding station, a cold wire feeder and a wire guide. Tests have shown that the addition of cold wire to the conventional MIG/MAG process is advantageous for bead characteristics. Using the same amount of energy, an increase in the amount of material deposited and a reduction in the molten area of base metal was obtained. However, an excessive increase in the cold wire feed speed can result in an excessive reduction in the molten area of base metal and may even lead to fusion failures. When adding a larger diameter cold wire, as well as adding two cold wires, the influences are more evident at lower feed speeds.

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 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)	18
Figura 6 - Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com a fonte de calor e alimentação (Adaptado de MARTINA; WILLIAMS, 2015)	21
Figura 7 - Bancada Experimental.....	25
Figura 8 – Robô ARC Mate 100, Fanuc	25
Figura 9 – Fonte de soldagem TPS 5000, Fronius com alimentador de arame	26
Figura 10 – Mecanismo de alimentação de arames frios	27
Figura 11 – Direcionador de arame frio.....	27
Figura 12 – Alimentação de dois arames frios pelo mesmo bico.....	28
Figura 13 – Transdutor de Corrente Linha Industrial - Série HAT	29
Figura 14 – Placa de aquisição de sinais - NI USB-6009	29
Figura 15 – Cortadora Metalográfica do laboratório de soldagem	30
Figura 16 – Cortadora Metalográfica do laboratório de tribologia	30
Figura 17 – Lixadeira Metalográfica dupla	31
Figura 18 – Representação dos parâmetros avaliados no cordão.....	31
Figura 19 - Falta de fusão identificada na linha de largura do cordão de solda	32
Figura 20 – cordões depositados durante a etapa experimental	34
Figura 21 – Amostras agrupadas e preparadas para serem dispostas em resina	35
Figura 22 – Moldes após lixamento	35
Figura 23 – Representação gráfica da influência da adição de arame frio de diâmetros diferentes na área fundida do metal de base. (Adaptado de KOVALENKO, 2019)	36
Figura 24 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: sem arame frio (superior esquerda); 2x0,6 e 1x0,8 com velocidade de alimentação de 0,5 m/min (superior central e direita, respectivamente); 2x0,6 e 1x0,8 com velocidade de alimentação de 1,5 m/min (intermediário central e direita, respectivamente); 2x0,6 e 1x0,8 com velocidade de alimentação de 3,0 m/min (inferior central e direita, respectivamente) (Adaptado de KOVALENKO, 2019)	36
Figura 25 - Gráfico da influência da adição de arame frio com diferentes arranjos na área fundida do metal de base (Adaptado de KOVALENKO, 2019).....	37
Figura 26 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: sem arame (superior esquerda); 1x1,0 e 2x1,0 com velocidade de alimentação de 1,0 m/min (superior central e direita, respectivamente); 1x1,0 e 2x1,0 com velocidade de alimentação de 3,5 m/min (inferior central e direita, respectivamente) (Adaptado de KOVALENKO, 2019)	38
Figura 27 – Gráfico da influência da adição de arame frio na falta de fusão (Adaptado de KOVALENKO, O. 2019).....	39
Figura 28 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: com arranjo de 1x0,8 mm nas velocidades de alimentação de 1,5 m/min, 2,0 m/min e 3,0 m/min (Adaptado de KOVALENKO, 2019).	39

Figura 29 - Gráfico da influência da adição de arame frio na falta de fusão (Adaptado de KOVALENKO, 2019).....	40
Figura 30 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: 1x1,0 e 2x1,0 com velocidade de alimentação de 2,0 m/min (superior esquerda e direita, respectivamente); 2x1,0 com velocidades de alimentação de 3,0 m/min, 3,5 m/min e 4 m/min (inferior, de esquerda para direita, respectivamente) (Adaptado de KOVALENKO, 2019) ...	41
Figura 31 - Gráfico de dispersão dos valores de área fundida em relação a velocidade de alimentação	42
Figura 32 - Gráfico de dispersão dos valores de área fundida dos arranjos sem arame frio, 2 arames frios de diâmetro 1,0 mm e 1 arame frio de diâmetro 1,0 mm	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetros dos arames utilizados	23
Tabela 2 – Parâmetros de configuração do modo MIG/MAG convencional por curto circuito	33
Tabela 3 – Parâmetros monitorados do processo de soldagem MIG/MAG convencional. ...	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>	11
2.2.2 <i>Tipos de transferência metálica</i>	13
2.2.3 <i>Obtenção do arco voltaico no processo MIG/MAG</i>	14
2.2.4 <i>Tocha de soldagem MIG/MAG</i>	14
2.2.5 <i>Bico (Tubo) de contato no processo MIG/MAG</i>	16
2.2.6 <i>Fonte de energia</i>	16
2.2.7 <i>Consumíveis</i>	17
2.3 Macroestruturas de metal de solda por fusão (regiões)	18
2.3.1 <i>Efeitos Metalúrgicos</i>	17
2.3.2 <i>Aspectos da poça de fusão</i>	19
2.3.3 <i>Descontinuidade em soldagem</i>	19
2.4 Processo de Manufatura Aditiva (MA)	20
CAPÍTULO 3 – MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E CONSUMÍVEIS	23
3.1 Métodos	23
3.2 Equipamentos e Consumíveis	24
3.3 Procedimento Experimental	32
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	32
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	42
CAPÍTULO 6 – TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	44

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. (PETRACHI, 2021, p. 10).”

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 próprias particularidades de fusão ou de adesão como fala. (ISO/ASTM 52900, 2015).

Segundo Silva (2020), o MA pode utilizar diversos processos e tecnologias. Entre eles, o uso de processos tradicionais de soldagem a arco como MIG/MAG e TIG, 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 arame-eletrodo (maior adaptabilidade para paredes de

variável espessura), além da possibilidade 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.

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 de 40 do século XX), ainda hoje concorre com os processos de soldagem, mantendo a sua vanguarda na soldagem a arco.

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.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de adição de arames frios ao processo MIG/MAG nas características de cordão de solda, visando futuramente aplicar para fabricação de peças de aço carbono pelo processo MADA. Serão utilizados diferentes arranjos (um arame frio e dois arames frios), diferentes diâmetros (0,6, 0,8 e 1,0 mm) e diferentes velocidades de alimentação (de 0,5 m/min a 4,0 m/min) para avaliar a influência da adição de arames frios nas características dos cordões depositados (área fundida e falta de fusão).

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 os 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, a 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 soldagem 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).

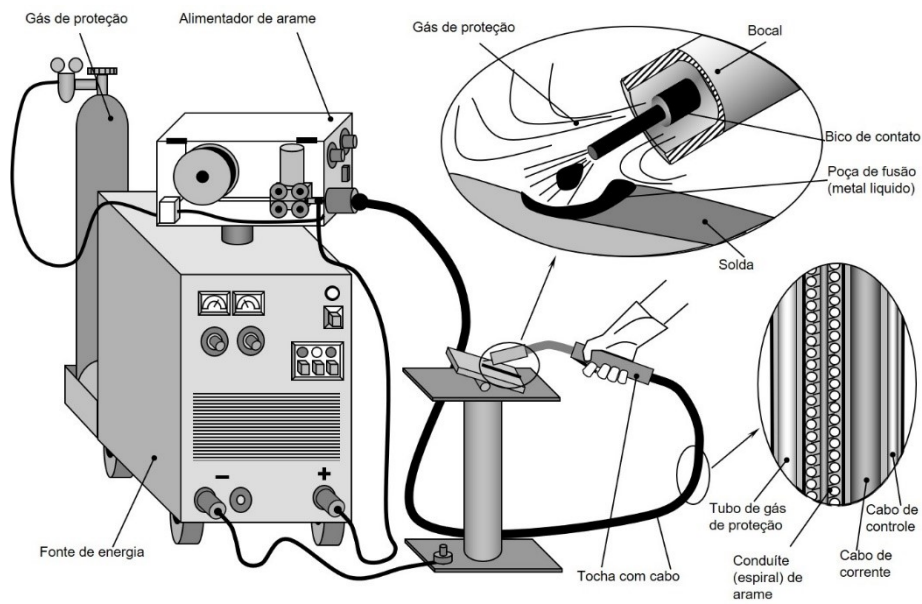


Figura 1 – Processos de Soldagem a Arco Elétrico (PONOMAROV, 2021).

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 último caso, o soldador controla o deslocamento da tocha, o início e a parada do processo. O comprimento do arco é mantido estável graças ao fenômeno de autoajuste dele assegurado devido ao 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, outros) devido a suas seguintes vantagens: uma relativa facilidade de automatização e mecanização, uma relativa facilidade de domínio pelos soldadores na versão semiautomática, uma elevada taxa de deposição e um alto fator de operação, bom acabamento da solda, além de outras vantagens.

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

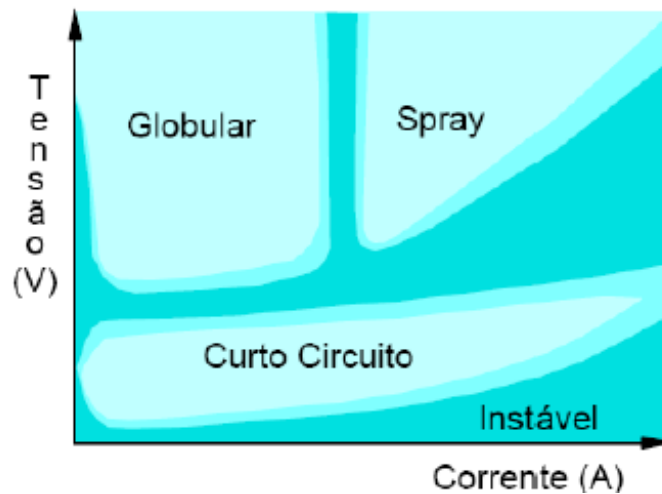


Figura 2 – Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência (MONDENESI, 2007).

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, transformado 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 encargo 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 em (Figura 4).

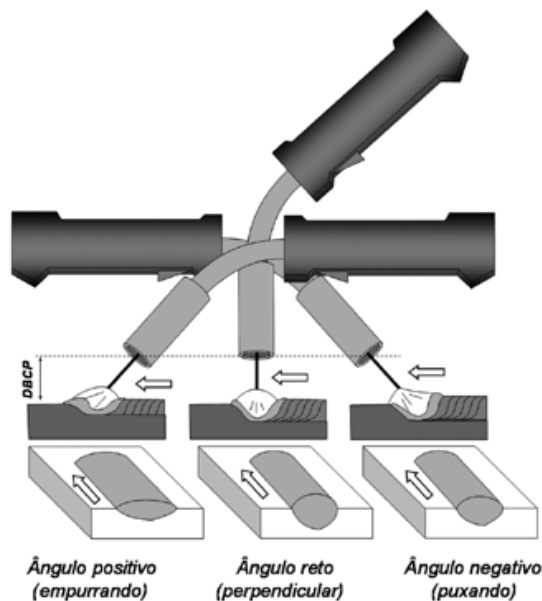


Figura 4 – Ângulos de avanço (ataque) do eletrodo ou da tocha (PONOMAROV, 2021).

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, 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 consegue passar para o mesmo. O seu diâmetro é um pouco maior que o diâmetro do arame e na sua fabricação é utilizado liga a 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 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).

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 e controlá-las. A fonte de energia para o processo MIG/MAG, 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.

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 seja considerado de uma ferramenta de manufatura eficaz e de alta confiança no que diz respeito à qualidade de soldas (GOHR, 2002). Tudo isso é graças a avanços tecnológicos, ocorridos nas últimas décadas, a instrumentos e equipamentos modernos empregados na soldagem, 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 5.

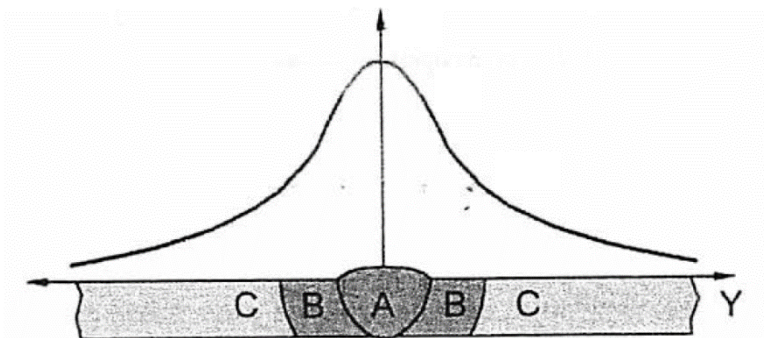


Figura 5 – Esquema das regiões de uma solda por fusão. A - Zona fundida (ZF), B - Zona Termicamente afetada (ZTA) e C - Metal de Base (MB). (Adaptado de MARQUES; MODENESI, 2011).

- 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 a 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 é a criação de componentes tridimensionais depositando materiais em camadas. Este processo de fabricação permite que componentes geométricos complexos sejam construídos em menos etapas, sem o uso de ferramentas ou moldes. Por exemplo, esta técnica pode ser usada para fabricar uma peça para um determinado propósito de uma só vez, e a peça consistirá em vários subconjuntos. E, também, o desenvolvimento do tema ao longo dos anos tem permitido que materiais como polímeros, metais, compósitos e cerâmicas sejam utilizados como matéria-prima nesse processo de fabricação.

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 é atingida por várias formas e meios (Figura 6).

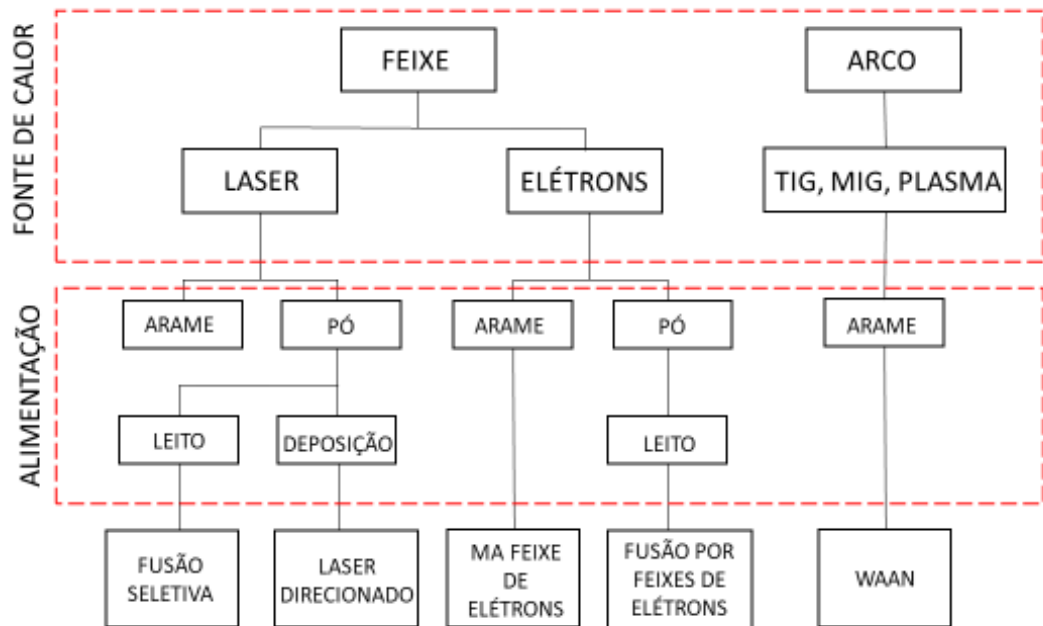


Figura 6 - Processos de Manufatura Aditiva classificados de acordo com a fonte de calor e alimentação (Adaptado de MARTINA; WILLIAMS, 2015).

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 razoavelmente desenvolvida em algumas universidades no exterior. 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

Neste projeto, foram avaliadas as características dos cordões depositados sobre chapas de aço ao carbono por processo MIG/MAG convencional com adição de arame frio. De forma a permitir uma avaliação mais detalhada, foram estabelecidos três tipos de variantes para o arame frio, sendo o tipo de arranjo (um arame frio e dois arames do mesmo diâmetro adicionados ao mesmo tempo), diâmetro do arame (Tabela 1) e a velocidade de alimentação, que foi aumentada gradualmente na faixa de 0,5 até 4,0 m/min.

Tabela 1 – Diâmetros dos arames utilizados.

Nº	Ø de arame [mm]
1	0,60
2	0,80
3	1,00

Em ambas configurações de arranjos o posicionamento dos arames frios foi feito da mesma maneira, ou seja, a ponta do arame foi posicionada na parte frontal da poça de fusão, alinhado com o arame principal.

Foram avaliados os seguintes fatores do cordão de solda:

- Área fundida (do metal de base, veja a Figura 18);
- Porcentagem de falta de fusão.

Avaliação a ser realizada:

- Entre um arranjo com dois arames de menor diâmetro e outro arranjo de um arame de maior diâmetro, visando verificar quais valores de velocidade de alimentação são mais benéficos para o aumento da taxa de deposição, e quais são os valores limite para a falta de fusão não acontecer;
- Entre os arranjos de um e de dois arames frios de mesmo diâmetro, visando determinar o arranjo que oferece mais vantagens;

Seguindo os princípios físicos, a fusão ocorre simultaneamente no metal de base, arame principal e arame frio. Ao adicionar o arame frio e ao aumentar a velocidade de alimentação dele, a seção transversal do cordão vai aumentar e a área fundida de metal de base vai reduzir, mas até um nível limite, até a falta de fusão aparecer. Em relação à diferença de diâmetros dos arames frios, entende-se que para o arame de menor diâmetro haverá uma taxa de fusão maior em relação a um arame de maior diâmetro, para os mesmos parâmetros de soldagem.

O arame energizado (arama-eletrodo), foi de diâmetro fixo de 1,0 mm. O arame de 0,6 mm de diâmetro será usado apenas na configuração de dois arames frios simultâneos, o arame de 0,8 mm será usado apenas na configuração de um arame frio, já o arame de 1,0 mm será usado tanto nas configurações de dois arames frios juntos, como de apenas um arame frio, formando as condições de arranjo x diâmetro de 2x0,6; 1x0,8; 1x1,0 e 2x1,0. Testes realizados vão ser apresentados apenas por dois testes-representantes em comparação com teste feito sem adição de arame frio.

3.2 Equipamentos e Consumíveis

A bancada operacional e experimental 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 (Figura 7). 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 Morais para trabalho de Kovalenko (2019).

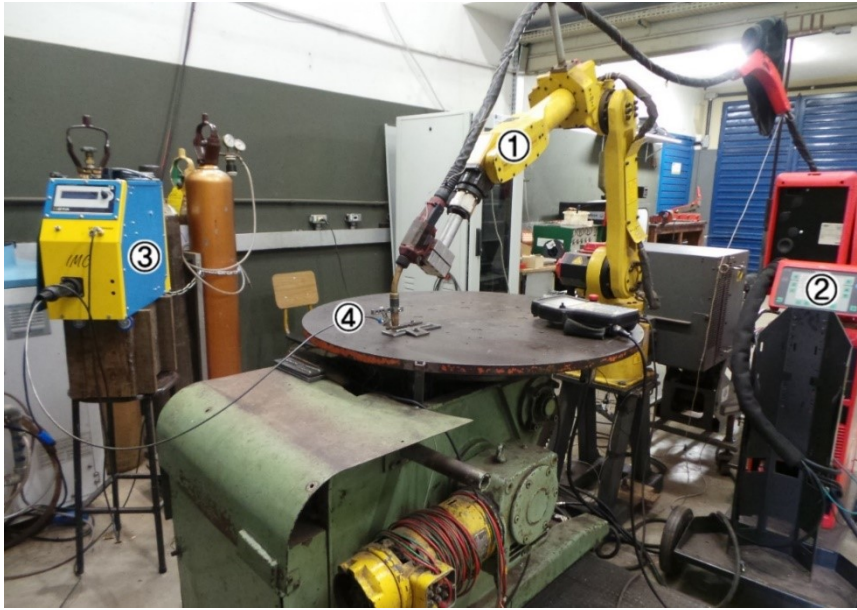


Figura 7 - Bancada Experimental.

- Robô de soldagem FANUC:

O robô industrial de soldagem (Figura 8) 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 8 – 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 9), 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 conduíte 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 9 – Fonte de soldagem TPS 5000, Fronius com alimentador de arame.

- Alimentador de arame frio STA IMC SOLDAGEM:

No caso de adição de apenas um arame frio, o alimentador foi usado de forma comum, ou seja, ele avançava o arame embobinado. Já no caso de adição de dois arames frios, 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 10. 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.

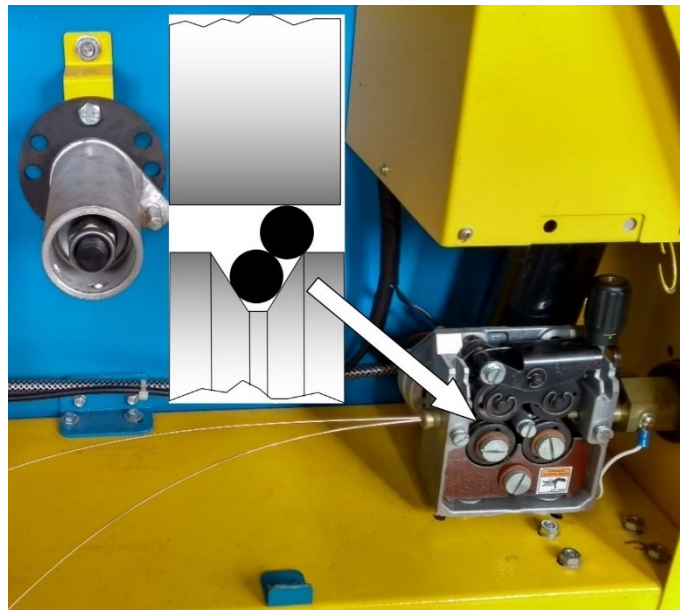


Figura 10 – Mecanismo de alimentação de arames frios.

Na alimentação de dois arames de 0,6 mm de diâmetro, foram utilizados os roletes para o diâmetro de arame de 1,0 mm. Já para a alimentação de dois arames de 0,8 ou 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 11. Ele permite realizar os ajustes da posição do arame frio na vertical, na horizontal e também o ajuste angular.

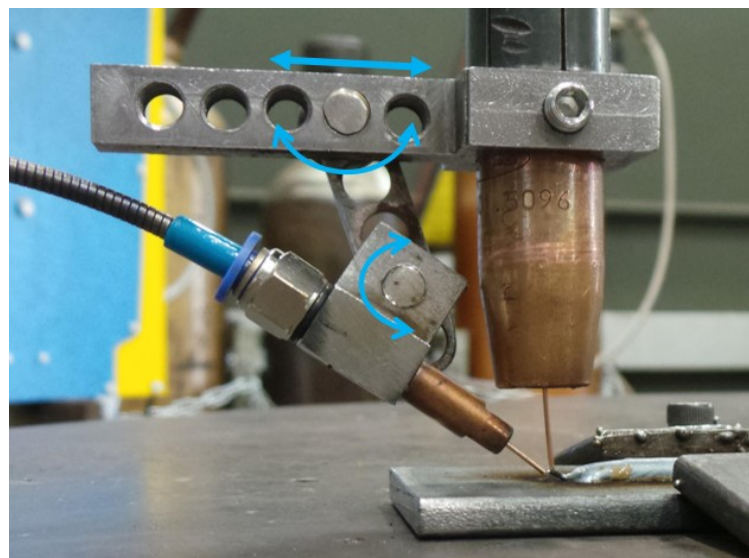


Figura 11 – Direcionador de arame frio.

- 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 12).



Figura 12 – Alimentação de dois arames frios pelo mesmo bico.

- Sistema de Aquisição de dados:

O monitoramento da corrente e da tensão foi 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 13), 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 14).

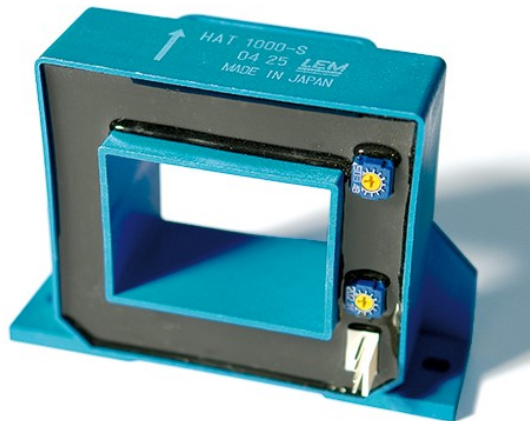


Figura 13 – Transdutor de Corrente Linha Industrial - Série HAT.



Figura 14 – 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 observar 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 15) ou da cortadora metalográfica do laboratório de tribologia (Figura 16).



Figura 15 – Cortadora Metalográfica do laboratório de soldagem.



Figura 16 – 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 17) 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 feito usando Nital 3%.



Figura 17 – Lixadeira Metalográfica dupla.

As comparações são importantes para o entendimento do processo, dessa forma é necessário realizar medição dos parâmetros dos cordões como: área fundida e falta de fusão. Para isso foi feita a análise macrográfica das amostras foi utilizado um microscópio especializado do tipo estereoscópio com aumento de até 64 vezes e posterior medição usando o programa de tratamento e análise de imagem, ImageJ.

A área fundida é definida como a área que foi fundida do material de base. Nessa região as temperaturas são superiores a temperatura de fusão do material de base. Ela está presente no metal de base com contornos destacados, depois seguidos por zona afetada pelo calor (Figura 18).

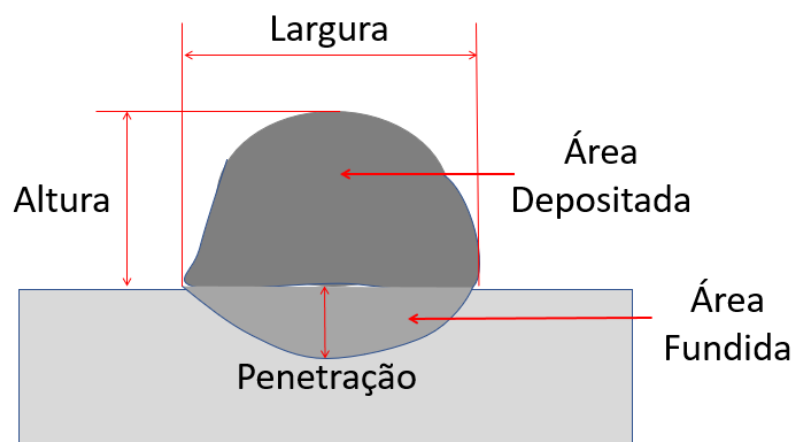


Figura 18 – Representação dos parâmetros avaliados no cordão.

Já a falta de fusão, ou fusão incompleta, é identificada pela falha na linha que separa o metal de base com o metal depositado. Esta falha é possível ser observada na Figura 19.

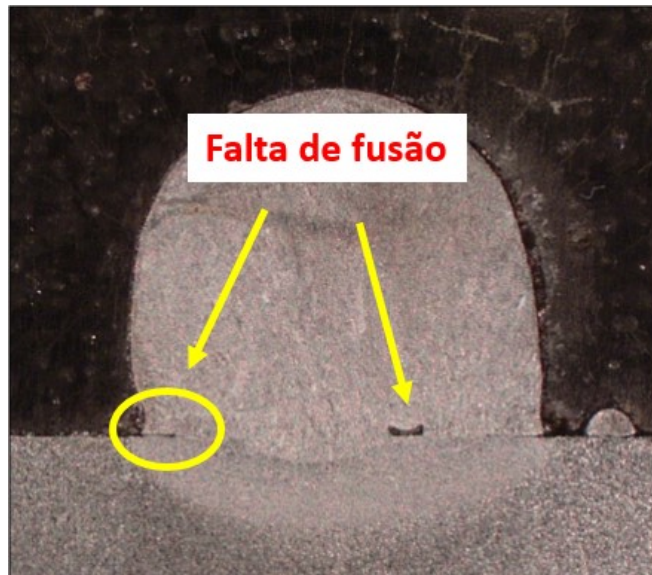


Figura 19 - Falta de fusão identificada na linha de largura do cordão de solda.

- 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) e o mesmo não foi esmerilhado.

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 Procedimento Experimental

Foram utilizadas as seguintes configurações para o processo de soldagem: posição plana, tocha perpendicular em relação a chapa, direcionador a 60° em relação ao arame energizado e com distância de 7 mm até o ponto de cruzamento com o arame energizado.

Foi utilizada transferência metálica por curto-circuito convencional. Velocidade de alimentação de arames frios foi variada em 0,5 m/min ou 1 m/min até o valor em que o arco

ainda é mantido estável, assim como as camadas se formam adequadamente. Na Tabela 2 são dispostos os parâmetros ajustados da soldagem MIG/MAG.

Tabela 2 – Parâmetros de configuração 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

Obs.: 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).

CAPÍTULO IV

ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A Tabela 3 mostra os parâmetros da soldagem MIG/MAG monitorados.

Tabela 3 – 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 20 apresenta os cordões depositados durante a etapa experimental com as marcações para a realização do corte.



Figura 20 – cordões depositados durante a etapa experimental.

As amostras cortadas e fixadas em resina estão mostradas na Figura 21 e algumas das amostras lixadas estão apresentadas na Figura 22.



Figura 21 – Amostras agrupadas e preparadas para serem dispostas em resina.



Figura 22 – Moldes após lixamento.

Avaliação de área fundida para cordões depositados com arame frio de diâmetros diferentes

A representação gráfica de área fundida para cordões depositados com arame frio de diâmetros diferentes está na Figura 23, enquanto as seções transversais de cordões estão apresentadas na Figura 24.

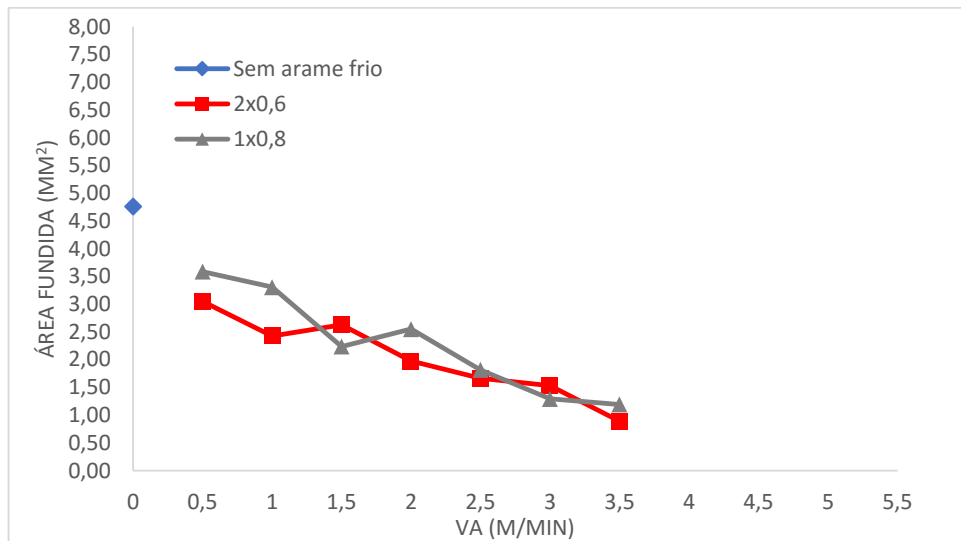


Figura 23 – Representação gráfica da influência da adição de arame frio de diâmetros diferentes na área fundida do metal de base. (Adaptado de KOVALENKO, 2019).

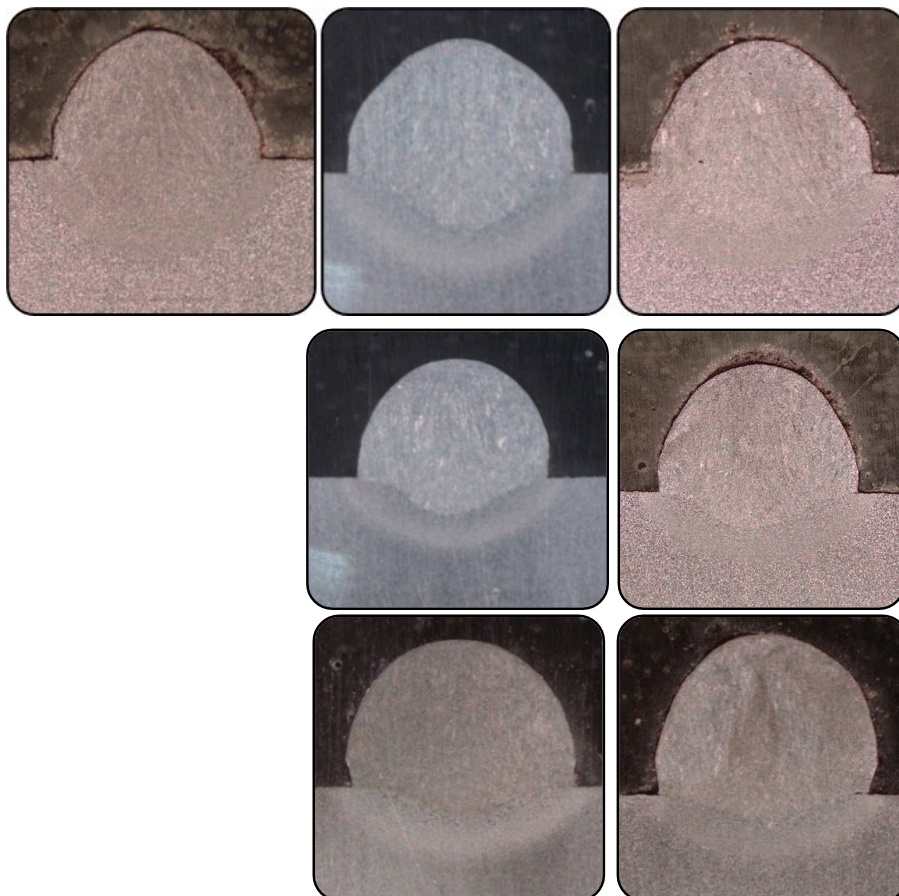


Figura 24 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: sem arame frio (superior esquerda); 2x0,6 e 1x0,8 com velocidade de alimentação de 0,5 m/min (superior central e direita, respectivamente); 2x0,6 e 1x0,8 com velocidade de alimentação de 1,5 m/min (intermediário central e direita, respectivamente); 2x0,6 e 1x0,8 com velocidade de alimentação de 3,0 m/min (inferior central e direita, respectivamente) (Adaptado de KOVALENKO, 2019).

Pela Figura 23 percebe-se que o maior nível da área fundida possui do cordão realizado sem uso de arame frio, que representa o padrão para comparação com cordões feitos com arame frio. Neste caso todo calor gerado para arco foi gasto para fusão de arame principal e de metal de base, formando a poça de fusão que no corte transversal do cordão resultou nesse valor de área fundida. Com a adição de arame frio, a área fundida segue reduzindo gradualmente conforme aumento da velocidade de alimentação de arame frio. Para um maior número de testes, o arranjo de dois arames com diâmetro de 0,6 mm apresenta menor área fundida quando comparado ao arranjo de um arame de diâmetro de 0,8 mm, pois há mais metal adicionado para a mesma velocidade de alimentação. Entretanto, nas velocidades de alimentação de 1,5 m/min e 3,0 m/min observa-se que o arranjo de um arame com diâmetro igual a 0,8 mm possui menor área fundida, que pode ser a influência de margem de erros envolvidos.

A representação gráfica de área fundida para cordões depositados com arame frio de arranjos diferentes está na Figura 25, enquanto as seções transversais de cordões estão apresentadas na Figura 26.

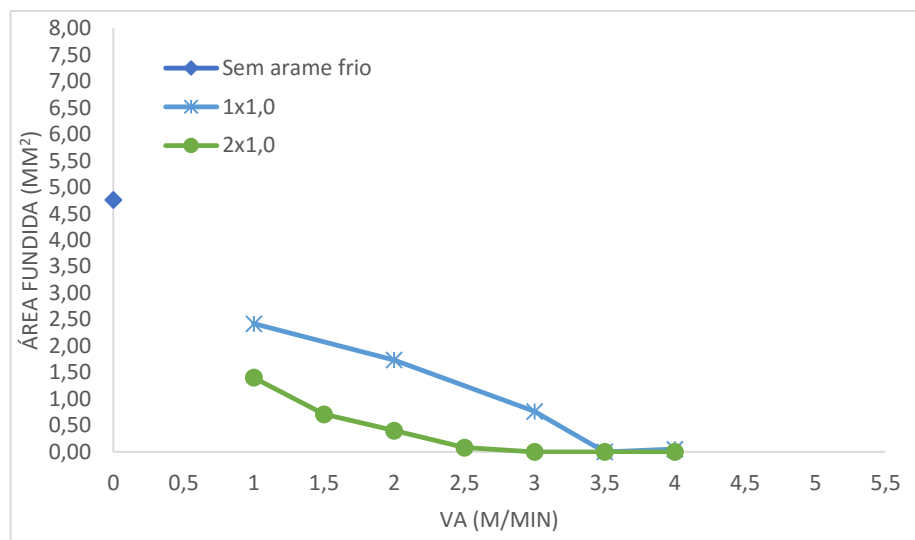


Figura 25 - Gráfico da influência da adição de arame frio com diferentes arranjos na área fundida do metal de base (Adaptado de KOVALENKO, 2019).

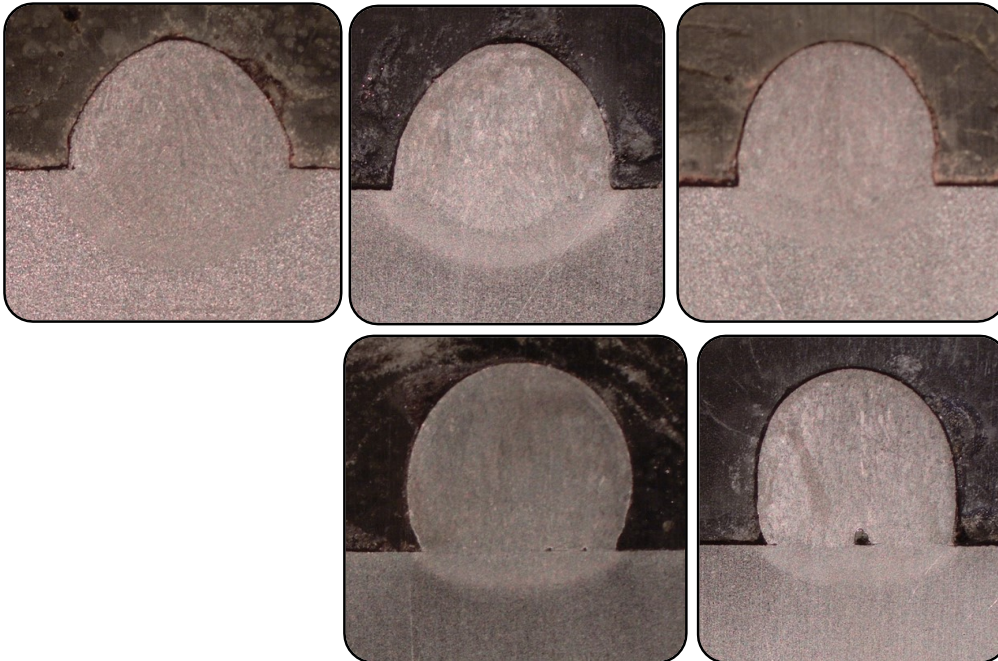


Figura 26 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: sem arame (superior esquerda); 1x1,0 e 2x1,0 com velocidade de alimentação de 1,0 m/min (superior central e direita, respectivamente); 1x1,0 e 2x1,0 com velocidade de alimentação de 3,5 m/min (inferior central e direita, respectivamente) (Adaptado de KOVALENKO, 2019).

Como observado na Figura 25 e Figura 26, a área fundida da configuração padrão (sem arame frio) é maior do que com adição de arame frio em ambos os arranjos, devido à menor quantidade de metal adicionado por arame principal a ser fundido em relação aos arranjos. Nesse mesmo sentido, observa-se que na velocidade de 1 m/min, o arranjo com menor quantidade de metal adicionado, ou seja, 1x1,0 tem uma maior área fundida, e o arranjo com adição de dois arames frios possui menor área fundida. O arranjo com dois arames frios de 1,0 mm, que possui uma maior quantidade de metal adicionado, levará mais rápido às menores áreas fundidas e também ao seu ponto limite de deposição, que é aproximadamente na velocidade de alimentação de 2,5 m/min. Já o arranjo de um arame frio apresenta o mesmo comportamento a partir da velocidade de alimentação 3,5 m/min. O ponto limite corresponde à área fundida igual a zero, que indica uma alerta à possibilidade de surgimento de defeitos, como falta de fusão.

Avaliação de falta de fusão para cordões depositados com arame frio de diâmetros diferentes

A representação gráfica de falta de fusão para cordões depositados com arame frio de diâmetros diferentes está na Figura 27, enquanto as seções transversais de cordões estão apresentadas na Figura 28.

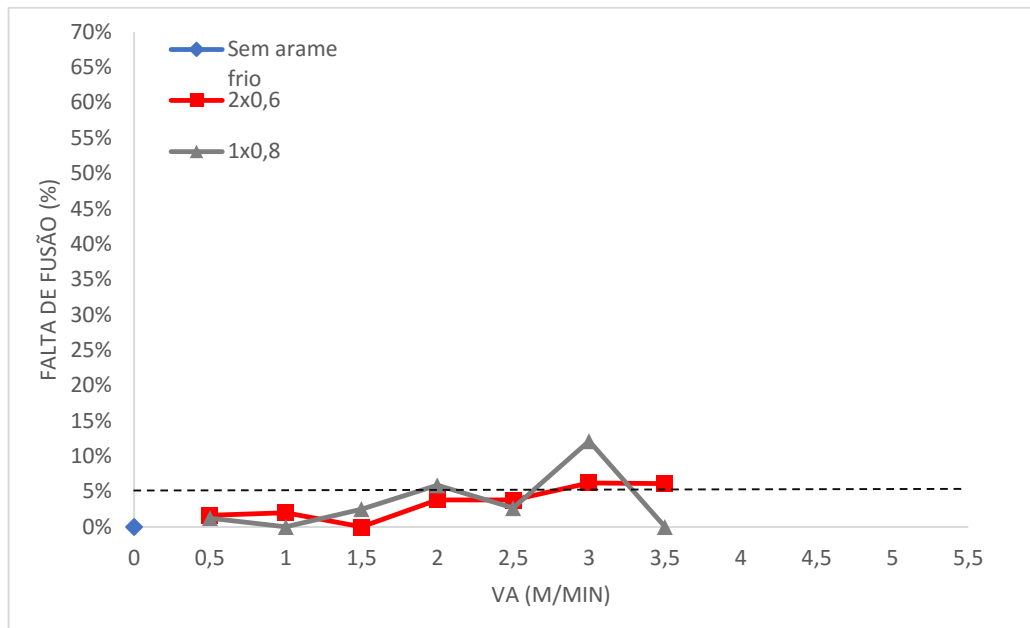


Figura 27 – Gráfico da influência da adição de arame frio na falta de fusão (Adaptado de KOVALENKO, O. 2019).



Figura 28 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: com arranjo de 1x0,8 mm nas velocidades de alimentação de 1,5 m/min, 2,0 m/min e 3,0 m/min (Adaptado de KOVALENKO, 2019).

A configuração sem arame frio (padrão) não apresenta a falta de fusão, pois há calor suficiente para impedir surgimento da mesma (para fundir bem o metal de base). Já com adição de arame frio e aumento da velocidade de alimentação, o calor gerado passa a não ser suficiente para fundir o material de base. Assim, inicialmente atinge-se mínima ou nula área fundida e seguidamente inicia-se o surgimento da falta de fusão, mesmo externamente ainda assegurando a formação de cordão.

Foi definido um nível de falta de fusão aceitável de até 5 % devido a fatores que possam de alguma forma influenciar a mesma, como a presença de óxidos no metal de base, que dificultam a transferência de calor para metal de base. Assim, as faltas de fusão

correspondentes aos cordões depositados com arames frios de arranjos 2x0,6 mm de até 4 % e de arranjo de 1x0,8 mm de até 5 % para velocidade de alimentação de até 2,0 m/min, consideraram-se possível de serem evitadas com a retirada da camada superficial de óxidos na chapa. Já a partir de 2,0 m/min o nível de falta de fusão passou ser mais evidente, mesmo que ainda houve a fusão do metal de base. Esperava-se que o arranjo de um arame frio com diâmetro de 0,8 mm deveria ter uma menor falta de fusão, visto que possui menor quantidade de metal quando comparado com o arranjo de dois arames de 0,6 mm. No entanto, nas velocidades de alimentação de 1,5 m/min, 2,0 m/min e 3,0 m/min a falta de fusão supera valores de cordões depositadas com dois arames frio.

Avaliação de falta de fusão para cordões depositados com arame frio de arranjos diferentes

A representação gráfica de falta de fusão para cordões depositados com arame frio de arranjos diferentes está na Figura 29, enquanto as seções transversais de cordões estão apresentadas na Figura 30.

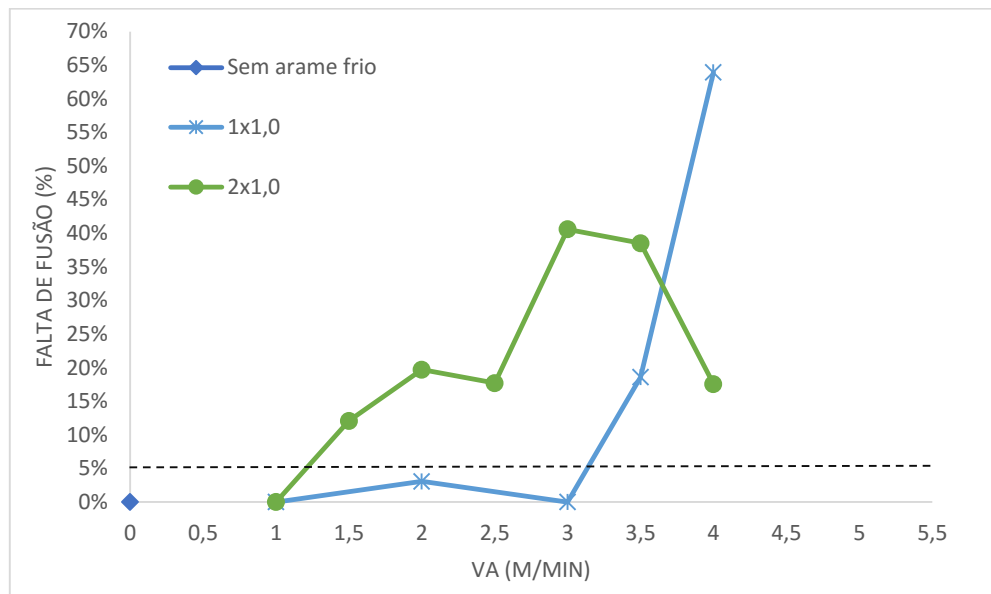


Figura 29 - Gráfico da influência da adição de arame frio na falta de fusão (Adaptado de KOVALENKO, 2019).

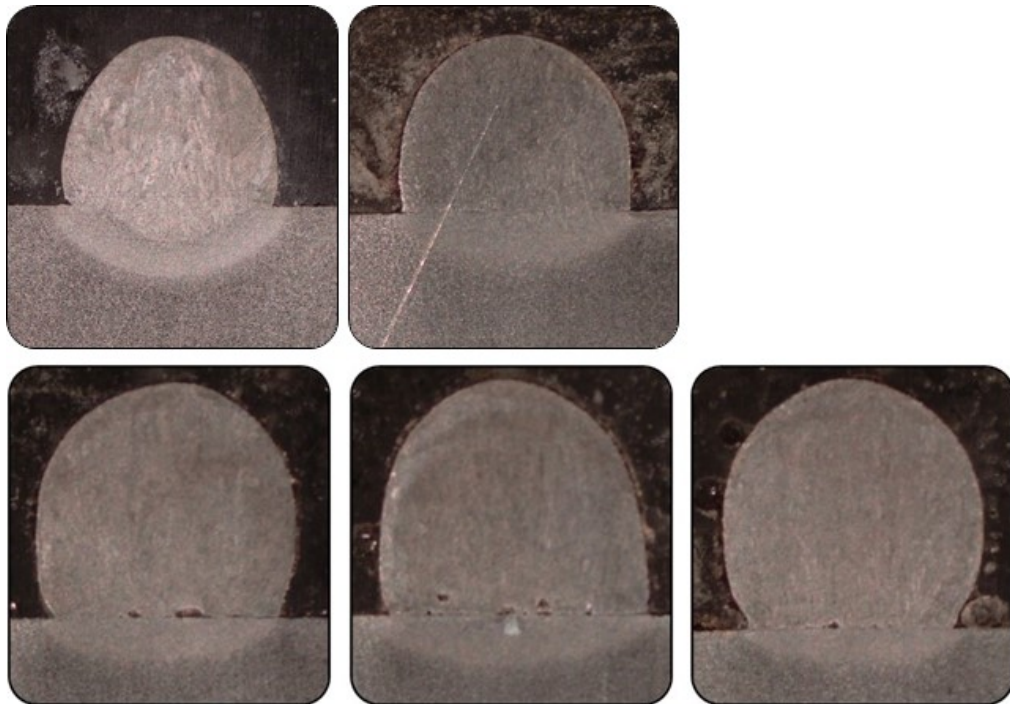


Figura 30 – Seção transversal de cordões de solda nas respectivas configurações: 1x1,0 e 2x1,0 com velocidade de alimentação de 2,0 m/min (superior esquerda e direita, respectivamente); 2x1,0 com velocidades de alimentação de 3,0 m/min, 3,5 m/min e 4 m/min (inferior, de esquerda para direita, respectivamente) (Adaptado de KOVALENKO, 2019).

A Figura 29 mostra que para velocidade de alimentação de arame frio de 1 m/min não houve a falta de fusão evidente, apesar dos arranjos serem dotados de uma maior quantidade de metal de que as condições de 2x0,6 mm e 1x0,8 mm. Ao comparar os dois arranjos na velocidade de alimentação de 2 m/min é notável uma falta de fusão lateral no arranjo com 1x1,0 mm (Figura 30, superior esquerda) o que ainda está dentro do aceitável, em torno de 3%. Porém no arranjo de 2x1,0 já é possível observar a falta de fusão visível ao longo da linha que separa o metal de solda do metal de base. A curva do arranjo de 2x1,0 mm da Figura 29 nas velocidades de 3,0 m/min, 3,5 m/min e 4,0 m/min apresentou comportamento atípico, de um aumento e logo redução da falta de fusão, evidenciando também na Figura 30, que pode ser induzido pelo maior volume do próprio material de cordão de solda.

O gráfico da figura 31, apresenta os parâmetros de dispersão dos valores de área fundida dos arranjos sem arame frio, 2 arames frios de diâmetro 0,6 mm e 1 arame frio de diâmetro 0,8 mm.

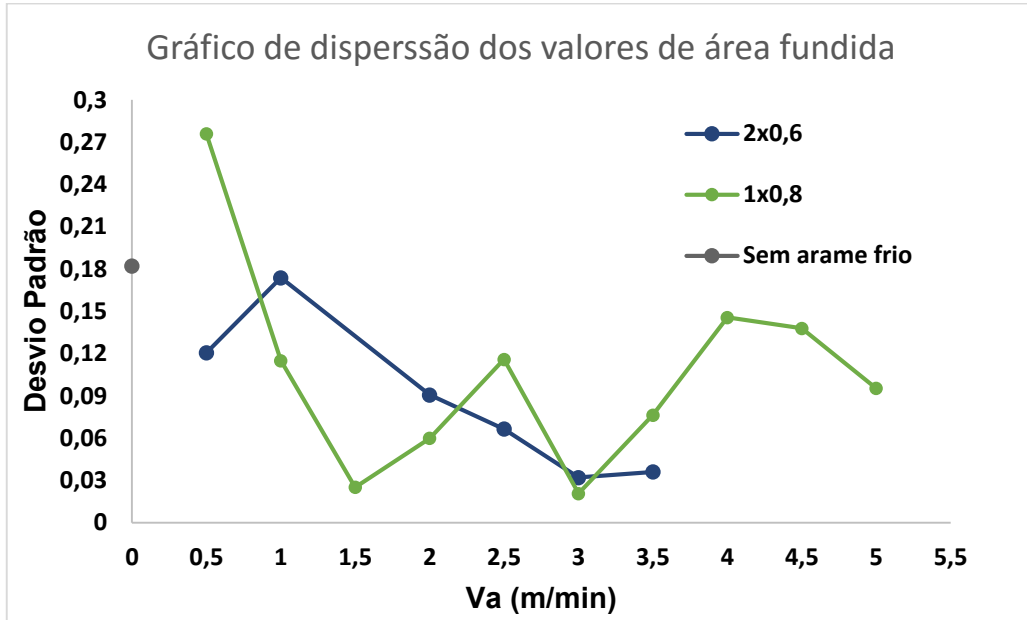


Figura 31 - Gráfico de dispersão dos valores de área fundida em relação a velocidade de alimentação.

O gráfico de dispersão apresenta valores que não são lineares. Essa aleatoriedade pode ser explicada devido à dificuldade em identificar a área fundida, uma vez que as imagens dos cordões de solda não ficaram nítidas, apesar de ter sido utilizado equipamentos de alta qualidade. Outro fator que pode ter influenciado a dispersão dos valores é o fato da medição ter sido feita por mais de uma pessoa.

O gráfico da figura 32, apresenta os parâmetros de dispersão dos valores de área fundida dos arranjos sem arame frio, 2 arames frios de diâmetro 1,0 mm e 1 arame frio de diâmetro 1,0 mm.

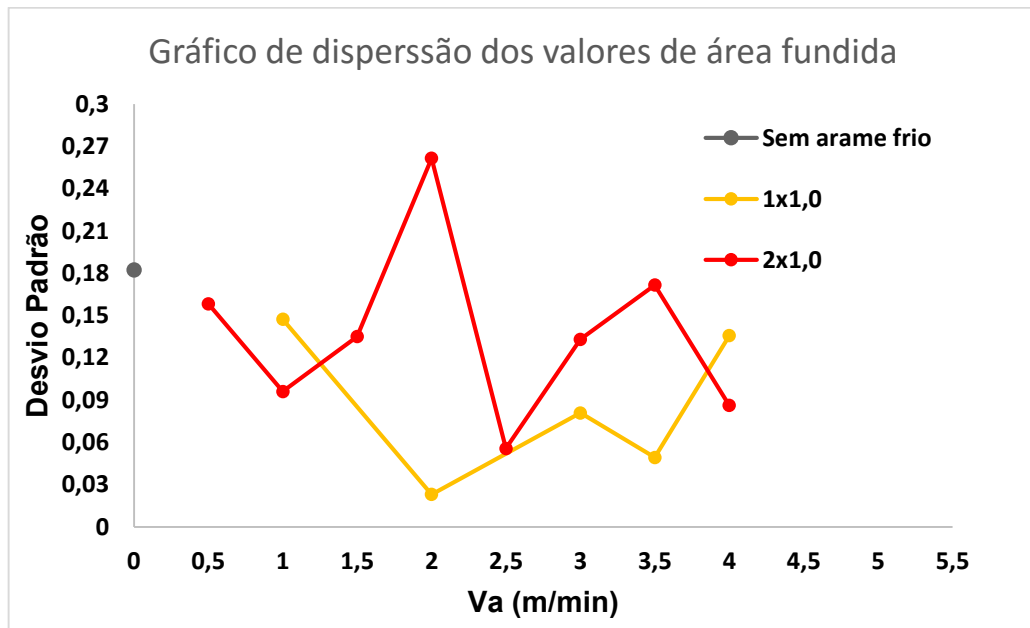


Figura 32 - Gráfico de dispersão dos valores de área fundida dos arranjos sem arame frio, 2 arames frios de diâmetro 1,0 mm e 1 arame frio de diâmetro 1,0 mm.

Porém é possível notar que no arranjo com um arame frio de 0,8 mm com velocidade de alimentação 3 m/min a falta de fusão chegou a 12%, enquanto o arranjo com um arame frio de 1,0 mm na velocidade de alimentação 3 m/min a falta de fusão não foi evidente, 0%. No gráfico de dispersão esses valores podem ser notados. O primeiro arranjo citado apresenta desvio padrão igual 0,02 e o segundo arranjo citado apresenta dispersão igual a 0,081. Assim pode-se concluir que apesar da diferença de valores de desvio padrão entre os arranjos citados, essa diferença não é suficiente para justificar a diferença de falta de fusão em questão.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitem concluir que a adição de arame frio ao processo MIG/MAG convencional é uma técnica adequada para aumentar a taxa de deposição, mas, ao mesmo tempo, ela promove certa redução da área fundida, que pode evoluir até o surgimento de falta de fusão, uma vez que quanto mais metal adicionado, menos calor vai sobrar, ou seja, haverá maior dificuldade de fusão de metal de base.

Adição de arame frio de maior diâmetro, assim como adição de arame frio no arranjo de dois arames, acarreta uma redução de área fundida mais acentuada e surgimento de falta de fusão nos menores níveis de velocidade de alimentação de que do arame de menor diâmetro ou arranjo de um arame frio.

O fato que as opções dos arranjos de arames frios foram muito limitadas (1x0,8 mm, 1x1,0 mm, 2x0,6 mm e 2x1,0 mm) não permitiu determinar qual arranjo seria melhor (para a aplicação na manufatura aditiva) o de apenas um arame ou de dois arames.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

De acordo com o que foi avaliado neste trabalho, pode-se propor para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência da adição de arame frio em outros modos de transferência metálica do processo MIG/MAG, como pulsado ou spray;
- Verificar a influência de presença de camada de óxidos na superficial nas características de cordão;
- Determinar a ordem de distribuição do calor gerado pelo arco entre o arame principal, arame frio e metal de base, variando o local de entrada de arame frio.

REFERÊNCIAS

AWS. **Welding Handbook**; Welding technology. 8. ed. vol.1 Miami: American Welding Society, 1987.

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.

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>

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.

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

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.