

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DOUGLAS AFONSO DE CASTRO REZENDE

Avaliação das técnicas de soldagem no processo MIG/MAG com arame-eletrodo ultrafino de 0,6 mm

UBERLÂNDIA – MG

2021

DOUGLAS AFONSO DE CASTRO REZENDE

Avaliação das técnicas de soldagem no processo MIG/MAG com arame-eletrodo ultrafino de 0,6 mm

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de **bacharel em**
Engenharia Mecânica

Área de concentração: Materiais e
processos de fabricação

Orientador: Professor Dr. Volodymyr
Ponomarov

UBERLÂNDIA - MG

2021

DOUGLAS AFONSO DE CASTRO REZENDE

Avaliação das técnicas de soldagem no processo MIG/MAG com arame-eletrodo ultrafino de 0,6 mm

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de **bacharel em**
Engenharia Mecânica

Área de concentração: Materiais e
processos de fabricação

Uberlândia, 03 de setembro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov (FEMEC, UFU) – Orientador

Prof. Dr. Maksym Ziberov (Universidade de Brasília, UnB)

AGRADECIMENTOS

Esta é a última etapa para a conclusão da faculdade de Engenharia Mecânica, curso este que sempre tive a certeza em fazer, mesmo diante das adversidades.

Primeiramente agradeço aos meus pais pelos conselhos e apoio incondicional prestados a mim durante toda a graduação, além de todo esforço para me manter em outra cidade e poder estudar.

À minha namorada Isabella por toda ajuda, incentivo e paciência durante os anos de graduação.

Aos meus amigos e demais familiares por compartilharem o sentimento de alegria na conclusão desta etapa da minha vida.

Ao Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov pela orientação durante o desenvolvimento deste e outros trabalhos.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia (LAPROSOLDA/UFU) pela disponibilização dos equipamentos e materiais utilizados neste trabalho.

Por fim agradeço a Deus por me permitir o encerramento desta fase com saúde, alegria e amadurecimento.

RESUMO

Usualmente, arames ultrafinos de \varnothing 0,6 mm são utilizados para soldagem MIG/MAG em chapas finas (até 1 mm). O modo de transferência metálica usado é por curto circuito, embora é conhecido que o modo de transferência por spray no processo de soldagem MIG/MAG promove melhor acabamento do cordão de solda, menor quantidade de respingos gerados e maior penetração comparados ao curto circuito. Trabalhos anteriores mostraram que o uso do modo de transferência metálica spray acarretou certa dificuldade no que se refere a formação do cordão por causa de falta de molhamento das bordas da junta pelo metal líquido da poça de fusão. Este trabalho verificou a possibilidade de soldagem MIG/MAG com arame ultrafino de \varnothing 0,6 mm e transferência por spray utilizando a técnica de deslocamento de tocha “empurrando”, com objetivo de comparar a qualidade do cordão de solda e averiguar se as dificuldades deste processo observadas em trabalhos anteriores foram causadas pela técnica “puxando” usada neles. Para o procedimento experimental foram usados dois corpos de prova da junta de topo com as folgas variáveis. Em cada corpo de prova, foram soldados dois cordões de solda, sendo que para um o soldador utilizou a técnica “puxando” e para o outro a técnica “empurrado”. Mesmo que a mudança da técnica de deslocamento de tocha de “puxando” para “empurrando” promoveu melhor acabamento do cordão de solda, as outras dificuldades na realização da soldagem MIG/MAG com arame-eletrodo ultrafino de 0,6 mm, relatadas em trabalhos anteriores, não foram sanadas e se fizeram presentes durante os testes experimentais.

Palavras-chave: MIG/MAG, Arame ultrafino, Técnica Puxando, Técnica Empurrando, Transferência metálica.

ABSTRACT

Usually, ultra-thin wires of \varnothing 0.6 mm are used for MIG/MAG welding thin plates (up to 1 mm). The metal transfer mode used is of a short-circuit type, although the spray transfer mode in the MIG/MAG welding process is known to provide better bead finish, less spatter and greater penetration compared to short-circuit welding. Previous works have shown that the use of the spray metal transfer mode has caused some difficulty with respect to bead formation due to lack of wetting of the joint edges by the liquid metal from the welding pool. This work verified the possibility of MIG/MAG welding with ultra-thin wire of \varnothing 0.6 mm and spray transfer using the "pushing" torch displacement technique, with the objective of comparing the quality of the welding bead and to verify if the difficulties of this process observed in previous works were caused by the "pulling" technique used in them. For the experimental procedure, two butt joint specimens with varying clearances were used. In each specimen two weld seams were welded in a way that for one the welder used the "pulling" technique and for the other the "pushing" technique. Even though changing the torch displacement technique from "pulling" to "pushing" promoted better finishing of the weld bead, the other difficulties in performing MIG/MAG welding with 0.6 mm ultra-thin wire electrode, reported in previous works, were not solved and were present during the experimental tests.

Keywords: MIG/MAG, Ultra-thin wire, Pulling technique, Pushing technique, Metal transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Novos processos de soldagem de acordo com tempo. (WAINER et al., 2004).	13
Figura 2 - Desenho esquemático da abertura de arco e poça de fusão do processo MIG/MIG. (WAINER et al., 2004).	15
Figura 3 - Aparelhamento e estrutura para soldagem MIG/MAG. Fonte: https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag	16
Figura 4 - Tocha seca para soldagem MIG/MAG. (Apostila ESAB, 2006).	17
Figura 5 - Sistema alimentador de arame. (Autor).	17
Figura 6 - Transferência metálica por curto circuito. (Apostila ESAB, 2006).	20
Figura 7 - Transferência metálica no modo globular. (Apostila ESAB, 2006).	21
Figura 8 - Transferência metálica por spray. (Apostila ESAB, 2006).	22
Figura 9 - Posição de solda de topo. (MARQUES et al., 2011).	24
Figura 10 - Posição de solda de filete. (MARQUES et al., 2011).	24
Figura 11 - Posição de solda para tubulações. (MARQUES et al., 2011).	24
Figura 12 - Ângulos de posicionamento (ângulos de ataque) de tocha para técnicas “puxando” e “empurrando”. (Apostila ESAB, 2006).	25
Figura 13 - Cordão de solda em vista superior referente as posições de tocha. (A) “empurrando”, (B) Vertical e (C) “puxando”. (WEMAN, 2003).	26
Figura 14 - Técnicas de soldagem referentes ao deslocamento da tocha. (WEMAN, 2003).	26
Figura 15 - Movimento da tocha para soldagem vertical. (Apostila ESAB, 2006).	26
Figura 16 - Fonte de soldagem multiprocessos. (Autor).	27
Figura 17 - Cabeçote alimentador de arame. (Autor).	28
Figura 18 - Rolete de tração de 0,8 e 1,0 mm. (Autor).	29
Figura 19 - Arame eletrodo Ø 0,6 mm. (Autor).	30
Figura 20 - Tocha utilizada para os testes. (MARTINS, 2018).	30
Figura 21 - Gás de proteção e instrumentos de medição de pressão e vazão. (Autor).	31
Figura 22 - Soldador utilizando os equipamentos de proteção. (Autor).	32
Figura 23 - Corpo de prova 1. (Autor).	33

Figura 24 - Corpo de prova 2. (Autor).	33
Figura 25 - Painel para seleção de parâmetros. (Autor).....	34
Figura 26 - Ajuste do bico guia de arame de solda. (Autor).	35
Figura 27 - Bico de contato Ø 0,8 mm. a) Bico original e b) Bico adaptado. (Autor).	35
Figura 28 – Comprimento aparente do arco elétrico. (Autor).	37
Figura 29 - Posicionamento de tocha para soldagem. a) Puxando; b) Empurrando. (Autor).	38
Figura 30 - Cordões de solda do corpo de prova 1. a) "puxando"; b)"empurrando". (Autor).	38
Figura 31 - Penetração da solda corpo de prova 1. a) "puxando"; b) "empurrando". (Autor).	38
Figura 32 - Cordões de solda do corpo de prova 2. a) "puxando"; b)"empurrando". (Autor).	39
Figura 33 - Penetração da solda corpo de prova 2. a) "puxando"; b) "empurrando". (Autor).	39
Figura 34 - Comparação dos cordões de solda. 1) Corpo de prova 1; 2) Corpo de prova 2. (Autor).	40
Figura 35 - Arame de solda enrolado no cabeçote alimentador. (Autor).	41
Figura 36 - Numeração inscrita na face dos roletes. (Autor).	42
Figura 37 - Roletes de arraste de 1,0 mm/1,2 mm. Rasgos diferentes. (Autor).	42
Figura 38 - Roletes com indicação de rasgo invertidas e também com o tamanho dos rasgos diferentes. (Autor).	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de soldagem tendo como fonte de energia o arco elétrico. (Adaptado de MARQUES et al., 2009).....	14
Tabela 2 - Corrente de transição para diferentes materiais e diâmetros de arame. (MARQUES et al., 2011).	23
Tabela 3 - Resultados para testes preliminares e escolha de melhores parâmetros de soldagem. (Autor).....	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. ASPECTOS HISTÓRICOS	12
2.2. PROCESSOS DE SOLDAGEM	13
2.3. PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.....	15
2.3.1. PRINCÍPIO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.....	15
2.3.2. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO MIG/MAG	18
2.3.3. TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	19
2.4. POSIÇÕES DE SOLDAGEM	23
2.5. TÉCNICAS DE DESLOCAMENTO DE TOCHA.....	24
3. METODOLOGIA.....	27
3.1. EQUIPAMENTOS	27
3.2. CORPOS DE PROVA	32
3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	33
4. RESULTADOS	36
4.1. TESTES PRELIMINARES.....	36
4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
4.3. DIFICULDADES E ADVERSIDADES DO PROCESSO	40
5. CONCLUSÕES	43
6. BIBLIOGRAFIA.....	45

1. INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de atendimento da demanda global, cada vez mais os processos industriais devem passar por atualizações e melhorias. Um dos métodos para processamento de materiais e equipamentos mais utilizados no meio industrial é, sem dúvida, a soldagem, que tem se desenvolvido rapidamente desde as duas grandes guerras mundiais.

Dentre os processos de soldagem, o GMAW (Gas Metal Arc Welding) ou MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) é um dos mais versáteis e mais utilizados métodos de união de materiais da indústria, já que possui alta produtividade, boa qualidade de solda e pode ser automatizado facilmente.

O processo de soldagem MIG/MAG semiautomático, geralmente usa arames-eletrodo finos de diâmetros na faixa de 0,9 mm até 1,2 mm. No caso da soldagem MIG/MAG automática, o diâmetro aplicável do arame-eletrodo pode ser mais grosso (até 2,0 mm), o que aumenta bastante a taxa de deposição (produção) do processo.

Abaixo de 0,8 mm de diâmetro, os consumíveis do processo são conhecidos como arames ultrafinos. A soldagem MIG/MAG com arames-eletrodo ultrafinos, não sendo considerado como um processo de alto interesse para a indústria (pois é caracterizado pela baixa produção e por dificuldades de alimentação devido ao diâmetro muito fino), não foi estudado o bastante para revelar suas potencialidades, especialmente no que diz respeito ao uso da transferência metálica do tipo spray (goticular). Os arames ultrafinos geralmente são utilizados em soldagem de chapas finas (≤ 1 mm), com modo de transferência metálica por curto circuito. A transferência por curto circuito é o modo que utilizada as menores faixas de tensão e corrente de soldagem para o processo MIG/MAG, no entanto, a taxa de deposição de material é reduzida comparada ao modo de transferência por spray.

Outro fator que pode interferir na qualidade da solda é o ângulo de ataque e posicionamento da tocha. É conhecido na literatura que a utilização de um movimento de tocha “empurrando” promove melhor fusão entre metal de base e metal depositado em relação ao movimento “puxando”. Desta forma, este trabalho tem por objetivo realizar o estudo comparativo das técnicas de posicionamento de tocha (“puxando” ou “empurrando”) na soldagem com arames ultrafinos de 0,6 mm de diâmetro e utilização

de modo de transferência por spray, além de realizar a soldagem em chapas mais espessas, os quais são mais adequadas para este modo de transferência metálica, e equiparar com estudos anteriores.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos dispostos da seguinte maneira:

CAPÍTULO 1 – Introduz o tema, apresentando de forma geral definições e aplicações gerais da soldagem e de arames eletrodos ultrafinos. A estrutura do trabalho e o objetivo geral também são apresentados neste capítulo.

CAPÍTULO 2 – Conta com a revisão bibliográfica acerca dos assuntos tratados e embasamento teórico do trabalho.

CAPÍTULO 3 – Ilustra e explica os métodos experimentais que foram adotados, materiais e parâmetros de entrada escolhidos devidamente para realização dos testes planejados.

CAPÍTULO 4 – Apresenta a análise dos resultados obtidos nos testes. Além disso, foram discutidos problemas e adversidades que eventualmente surgem durante procedimentos de soldagem rotineiros ou não, mas que podem interferir na qualidade da junta soldada.

CAPÍTULO 5 – Apresenta as devidas conclusões com base nos resultados discutidos no capítulo 4 e também sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS HISTÓRICOS

Soldagem pode ser definida como coalescência localizada de metais ou não metais (união entre duas partes metálicas ou não metálicas), usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão e metal de adição (WAINER et al., 2004; WELDING HANDBOOK, 1987).

Existem indícios de práticas de união de materiais há cerca de quatro mil e oitocentos anos (MACHADO, 1996). No museu do Louvre na França, está em mostra um pingente de ouro com indicações que foi soldado 4000 A.C. na antiga Pérsia. (MODENESI et al., 2012).

Segundo Machado (1996) os primeiros experimentos com arco elétrico utilizando baterias foram feitos em 1801 por Sir Humphrey Davy, abrindo-se o arco elétrico entre dois eletrodos de carvão. A união dos metais como conhecemos hoje foi desenvolvida no final do século XIX (MACHADO, 1996). Em 1885 na Inglaterra foi registrada a primeira patente de processo de soldagem por Nikolay Benardos e Stanislav Olszewsky, que foi utilizado ao longo dos 30 – 40 anos a seguir. O trabalho foi baseado na abertura de arco elétrico na peça utilizando eletrodo de carvão. (MODENESI et al., 2012). Charles Coffin, nos Estados Unidos e N. G. Slavianoff, na Rússia, realizaram estudos em 1890 referentes ao processo a arco elétrico com eletrodo metálico nú, ambos com patentes americanas. (MACHADO, 1996).

De acordo com Wainer et al. (2004), foi durante a segunda guerra mundial que houve um impulso na utilização e desenvolvimento de processos de soldagem, já que havia necessidade de fabricação de navios e aviões soldados. A Figura 1 ilustra a evolução de novos processos de soldagem com o tempo.

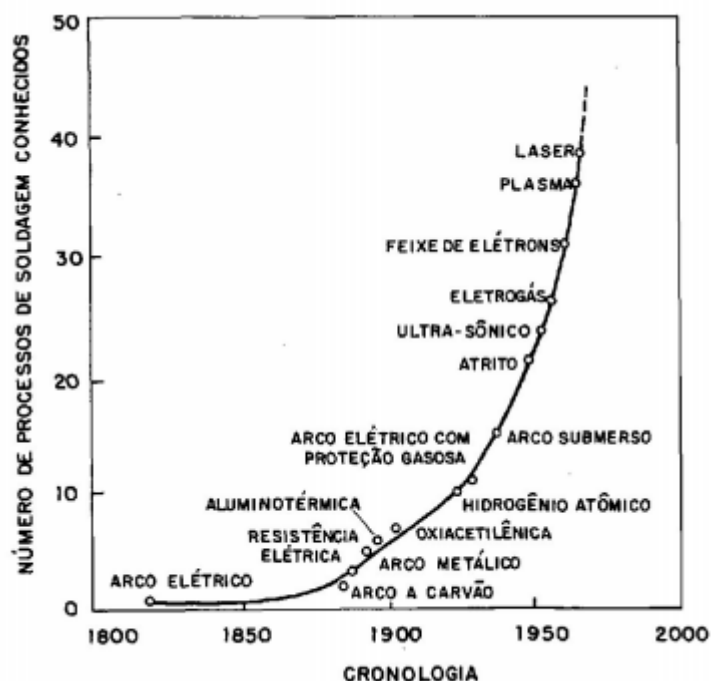


Figura 1 - Novos processos de soldagem de acordo com tempo. (WAINER et al., 2004).

Conforme Modenesi et al. (2012) o desenvolvimento da robótica, eletrônica e consumíveis contribuíram para o aperfeiçoamento dos processos de soldagem. Além disso, parcerias entre universidades e empresas tem grande importância na evolução das técnicas e processos existentes.

2.2. PROCESSOS DE SOLDAGEM

Os processos de soldagem podem ser divididos entre processos por pressão (ou deformação) e processos por fusão.

Para processos de soldagem por pressão ou deformação, incluem-se processos como forjamento, ultrassom, fricção, difusão, explosão entre outros. (MARQUES et al., 2009). Estes processos de soldagem não são objetos de estudo deste trabalho.

Para os processos de soldagem por fusão, existem uma série de grupos e subgrupos, pois é grande a quantidade de variáveis que determina cada processo deste tipo. Em relação a fonte de calor é comentado por Modenesi et al. (2012) que se trabalha com elevada temperatura (1.000 a 20.000 °C), concentradas em uma região e de elevada intensidade. Os processos de soldagem a arco são os de maior importância e utilização na indústria atualmente. (MARQUES et al., 2009). A Tabela 1

ilustra os processos de soldagem por fusão, utilizando como fonte de energia o arco elétrico.

Tabela 1 - Processos de soldagem tendo como fonte de energia o arco elétrico. (Adaptado de MARQUES et al., 2009).

Processo	Tipo de corrente	Agente protetor	Outras características	Aplicações
Arco submerso	Contínua ou alternada Eletrodo +	Escória	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arco abre sob uma camada de fluxo granular.	Soldagem aço carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão etc,
Eletrodo revestido	Contínua (eletrodo + ou -) ou alternada	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de revestimento	Soldagem de todos metais, exceto cobre puro, metais preciosos reativos e de baixo ponto de fusão
Arame tubular	Contínua Eletrodo +	Escória e gases gerados ou por fonte externa	Automático ou semiautomático. Fluxo contido dentro de um arame de pequeno diâmetro.	Soldagem aço carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 1 mm.
MIG/MAG	Contínua Eletrodo +	Argônio, Hélio, CO_2 , O_2 ou mistura	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arame é sólido.	Soldagem aço carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 1 mm. Qualquer posição.
Plasma	Contínua Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. Arame adicionado separadamente. Eletrodo de tungstênio. Arco constricto por bocal.	Todos os metais com exceção de Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm, Passes de raiz.
TIG	Contínua (Eletrodo -) ou alternada	Argônio, Hélio ou mistura destes	Manual ou automática. Eletrodo de tungstênio não consumível. Arame adicionado separadamente.	Todos os metais com exceção de Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm, Solda ferrosos e não ferrosos.

Conforme Marques et al. (2009), por ser uma técnica que une segurança e economia à montagem rápida de conjuntos, a soldagem é atualmente o mais importante processo industrial para união de materiais. Marques et al. (2009) ainda cita a versatilidade da soldagem, pois seus diversos processos trabalham com praticamente todos os tipos de ligas metálicas mais usadas e em situação de campo,

onde as variáveis são inúmeras. Outro ponto positivo é a larga faixa de espessuras atendidas e custo competitivo, aliando a qualidade e a produtividade.

2.3. PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

2.3.1. PRINCÍPIO DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

Para este trabalho, o processo de soldagem escolhido para realização de testes foi o GMAW (GAS METAL ARC WELDING) ou popularmente conhecido no Brasil por MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas). Segundo O'Brien (1997), os fundamentos do GMAW foram apresentados em meados 1920, no entanto, após 1947 o processo se tornou comercialmente viável. Wainer et al. (2004) complementa afirmando que o processo foi viabilizado após a segunda guerra mundial, utilizado para soldagem de ligas de magnésio e em seguida para outros metais.

Conforme descrito por Machado (1996), o processo de soldagem MIG/MAG usa como fonte de calor um arco elétrico formado entre a peça e um eletrodo maciço consumível nu, que é alimentado de forma contínua e existe uma proteção gasosa sobre a poça de fusão. Ainda segundo Machado (1996), o gás de proteção da poça de fusão pode ter caráter inerte ou oxidante (ativo) e, por isso, o processo é comumente conhecido no Brasil por MIG (Metal Inert Gas) ou MAG (Metal Active Gas). Na Figura que segue (Figura 2), mostra-se esquematicamente o processo descrito acima.

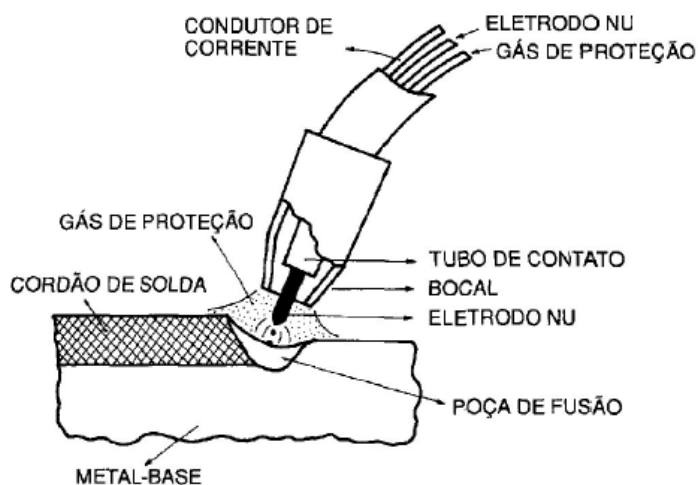


Figura 2 - Desenho esquemático da abertura de arco e poça de fusão do processo MIG/MIG. (WAINER et al., 2004).

Na Figura 3 é ilustrado um esquema do aparelhamento do processo de soldagem MIG/MAG semiautomático, com sistema opcional de refrigeração.

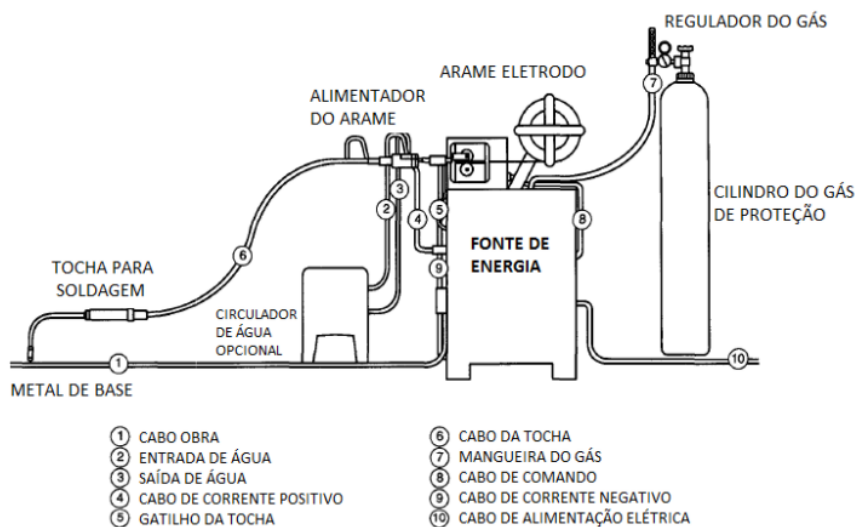


Figura 3 - Aparelhamento e estrutura para soldagem MIG/MAG. Fonte: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag>

A soldagem MIG/MAG é um processo que pode ser realizado de forma semiautomática ou automatizada. Resumidamente, no processo semiautomático a tocha é guiada pelo soldador, de maneira que quatro componentes principais são necessários (ESAB, 2006), sendo eles:

- Tocha de soldagem e acessórios;
- Alimentador de arame;
- Fonte de energia;
- Sistema de fornecimento do gás de proteção.

A tocha neste caso é empunhada e movimentada pelo soldador, sendo o elemento que direciona o arame eletrodo, o gás de proteção e é condutor da corrente de soldagem. A tocha de soldagem pode ser usada com refrigeração a água ou a seco (próprio gás de proteção) passando pela tocha, o que depende do ciclo de produção e valores de corrente de soldagem, por exemplo (ESAB, 2006). É apresentada na Figura 4 uma tocha seca típica de soldagem MIG/MAG.

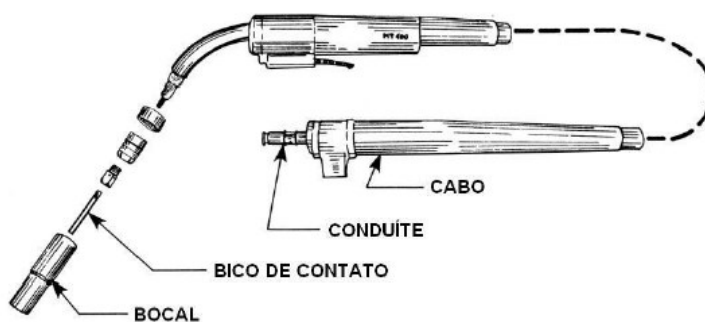


Figura 4 - Tocha seca para soldagem MIG/MAG. (Apostila ESAB, 2006).

O arame para soldagem MIG/MAG é disponibilizado em bobinas/carretéis. Para que o arame chegue até a tocha e ocorra abertura do arco elétrico é necessário um sistema alimentador, conforme Figura 5. Esse sistema é composto basicamente por um motor alimentador e roletes de arraste ou tração graduados de acordo com o diâmetro do arame.



Figura 5 - Sistema alimentador de arame. (Autor).

A variável de controle para o alimentador de arame é a velocidade de alimentação, que deve ser escolhida antes de começar a soldagem de acordo com fatores como o diâmetro do arame e corrente de soldagem, por exemplo.

A fonte de soldagem para o processo MIG/MAG controla a variável de tensão de soldagem que implica diretamente no comprimento do arco elétrico. Quase todos os processos de soldagem MIG/MAG utilizam polaridade reversa (Corrente Contínua Eletrodo Positivo, CCEP ou CC+), vide Tabela 1.

O gás de proteção é essencial para soldagem MIG/MAG, visto que seu uso mantém a poça de fusão protegida contra contaminações presentes na atmosfera, causadas principalmente por nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e vapor de água (H₂O),

além de influenciar em variáveis como molhabilidade, modo de transferência metálica e estabilidade do arco elétrico. (ESAB, 2006). O sistema de gás de proteção conta basicamente com cilindro gás, reguladores de pressão e vazão e mangueira de gás.

Para os processos automáticos são necessários dispositivos especiais de fixação, carrinhos de movimentação e pórticos. As configurações para mecanismos automáticos são basicamente as mesmas em relação ao semiautomático, mudando posicionamento de tocha e caminho do arco controlados pela velocidade de deslocamento do dispositivo e modos de fixação. Por não haver intervenção humana durante a soldagem, a qualidade e padronização da solda tendem a ser melhores com processo automático, sendo indicado para atividades repetitivas de soldagem ou peças maiores que podem ser transportadas até a máquina de solda (ESAB, 2006).

2.3.2. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO MIG/MAG

O processo de soldagem GMAW é um dos mais importantes e versáteis processos para união de materiais utilizado industrialmente, principalmente graças a suas seguintes vantagens conforme listadas por O'Brien (1997):

- Processo que utiliza eletrodo consumível contínuo (arame) que pode ser usado na soldagem de todos os metais e ligas metálicas comerciais;
- Possui alimentação contínua de arame, limitante encontrado em processos de soldagem a arco por eletrodo revestido. Portanto, o fator de operação é alto;
- Permite soldagem em todas as posições;
- Grande capacidade de deposição de material;
- Devido a altas taxas de deposição (alta produção) permite maiores velocidades de soldagem e, conseqüentemente, maior produtividade;
- Exigência de pouca limpeza do cordão de solda após o procedimento de soldagem.

Diante disso, afirma O'Brien (1997) que para trabalhos que exigem alta produtividade e que podem ser robotizados, o processo de soldagem GMAW é o mais interessante para ser usado. Entretanto, o mesmo autor ainda cita algumas limitações do GMAW, conforme lista abaixo:

- O equipamento é mais complexo e menos portátil que o eletrodo revestido, por exemplo;
- Em espaços menores ou de difícil acesso, o tamanho da tocha e a necessidade de proximidade da tocha com o material a ser soldado para garantir a proteção gasosa são fatores limitantes;
- Não é aconselhado utilizar este processo de soldagem em locais abertos, devido a interferência de ventos que podem deslocar a proteção gasosa e contaminar o cordão de solda;
- Níveis relativamente altos de calor irradiado e intensidade do arco podem afetar a saúde do soldador.

2.3.3. TRANSFERÊNCIA METÁLICA

De acordo com Scotti e Ponomarov (2014), por utilizar eletrodo consumível, o processo GMAW é caracterizado pelos diferentes modos de transferência metálica para a poça de fusão através do arco elétrico.

Ainda segundo os autores, o modo como a transferência metálica acontece depende de parâmetros como material e diâmetro do arame eletrodo, gás de proteção, intensidade e polaridade da corrente de soldagem, comprimento do arco e pressão ambiente. Além disso, a transferência metálica afeta diretamente o resultado da soldagem.

Conforme dito por O'Brien (1997), existem três tipos de transferência metálica que ocorrem no processo GMAW:

- Transferência por curto circuito;
- Transferência globular;
- Transferência por spray (goticular).

2.3.3.1. TRANSFERÊNCIA POR CURTO CIRCUITO

MIG/MAG é um processo de soldagem largamente aplicado industrialmente e um dos modos operacionais mais utilizados desse processo é o da soldagem por curto-circuito, conforme afirmou Souza et al. (2011). A transferência metálica por curto circuito engloba menores faixas de corrente, tensão e diâmetros de eletrodos para o processo GMAW. A transferência metálica por curto circuito ocorre basicamente por tensão superficial (Figura 6). A poça de fusão formada é resfriada rapidamente, sendo uma boa característica para soldagem de chapas finas, soldagem fora de posição e para preencher aberturas de raiz com sucessivos passes.

Mesmo que a transferência ocorra apenas durante o curto circuito, a composição do gás de proteção é um fator determinante no tamanho da gota e na duração do curto circuito, além de influenciar na penetração e no arco elétrico.

Conforme explicado por Martins (2018), para controle de picos de corrente é importante realizar o controle da indutância, pois dessa forma pode-se controlar a velocidade de aumento de corrente. Outra característica promovida pelo controle da indutância é o decréscimo do número de curtos-circuitos por segundo e aumento do tempo de arco aberto, de modo a produzir um cordão de solda liso e mais plano.

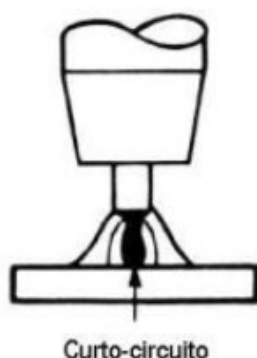


Figura 6 - Transferência metálica por curto circuito. (Apostila ESAB, 2006).

Outro fator importante para a qualidade da solda é a regularidade da transferência metálica, que é influenciada pelo comprimento do arco (pela tensão de soldagem regulada) e pelo gás de proteção.

2.3.3.2. TRANSFERÊNCIA GLOBULAR

Segundo O'Brien (1997), a transferência metálica tipo globular é caracterizada pelo diâmetro da gota ser maior que o diâmetro do arame eletrodo (Figura 7). Diante disso, a transferência globular é geralmente indesejável e, se for aplicada, o uso dela é restrito a posições de soldagem planas.

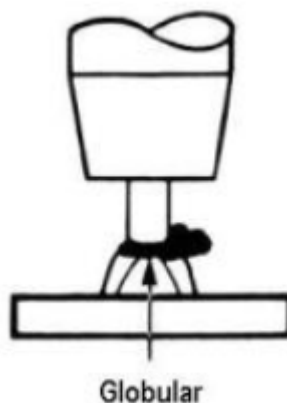


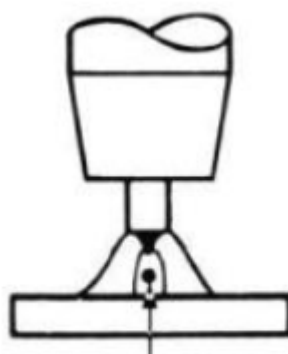
Figura 7 - Transferência metálica no modo globular. (Apostila ESAB, 2006).

Em relação a transferência por curto circuito, o modo globular apresenta valores médios de corrente levemente maiores ou iguais, enquanto que para a tensão os valores são maiores que os níveis máximos do curto circuito, afirma Martins (2018). Conforme dito por O'Brien (1997), o arco elétrico deve ter comprimento suficiente para garantir o desprendimento da gota antes do seu contato com a poça de fusão. Caso o arco seja pequeno (tensão baixa), pode haver um curto na peça, superaquecimento, possível explosão da ponte metálica e, logo, aumento na quantidade de respingos, atingindo diretamente a qualidade final da solda.

A utilização de dióxido de carbono (CO_2) como gás de proteção promove movimento desordenado das gotas da transferência globular, conforme afirma O'Brien (1997). Já com a utilização de gases a base de argônio, Cruz (2014) diz que as gotas tem tamanho mais homogêneo e deslocamento predominantemente axial.

2.3.3.3. TRANSFERÊNCIA SPRAY

Segundo Machado (1996), o modo de transferência spray ou goticular (Figura 8) possui valores de corrente e tensão maiores que os modos curto circuito e globular, acarretando em maior penetração e alta taxa de deposição. Machado (1996) ainda cita que para gases de proteção altamente oxidantes (MAG) não é possível a realização de transferência metálica por spray. Além disso, ocorre mudança no ruído emitido pelo arco e na sua aparência.



Spray

Figura 8 - Transferência metálica por spray. (Apostila ESAB, 2006).

Para que a transferência por spray ocorra, a corrente de soldagem deve ultrapassar o valor de transição ou crítico. É ilustrado na Tabela 2 uma relação entre materiais e os valores necessários para que a corrente seja a de transição.

Nesse modo de transferência metálica, são formadas grandes quantidades de gotas e que possuem diâmetro inferior ao do arame eletrodo, conforme explica Marques et al., (2009). Em comparação com os outros modos de transferência, o mesmo autor afirma que o arco é bem estável, sem presença de respingos e boa qualidade do cordão de solda.

Soldagem utilizando modo de transferência por spray não é utilizada para chapas finas devido a corrente relativamente alta exigida, além de ser aplicada apenas em posições planas devido ao maior tamanho da poça de fusão.

Tabela 2 - Corrente de transição para diferentes materiais e diâmetros de arame.
(MARQUES et al., 2011).

Material	Diâmetro do arame (mm)	Gás de proteção	Corrente de transição (A)
Aço carbono	0,8	Argônio 2% Oxigênio	150
	1,0	Argônio 2% Oxigênio	165
	1,2	Argônio 2% Oxigênio	220
	1,6	Argônio 2% Oxigênio	275
Aço inoxidável	0,8	Argônio 2% Oxigênio	170
	1,2	Argônio 2% Oxigênio	225
	1,6	Argônio 2% Oxigênio	285
Alumínio	0,8	Argônio	95
	1,2	Argônio	135
	1,6	Argônio	180
Cobre desoxidado	0,8	Argônio	180
	1,2	Argônio	210
	1,6	Argônio	310
Bronze silício	0,8	Argônio	165
	1,2	Argônio	205
	1,6	Argônio	270

2.4. POSIÇÕES DE SOLDAGEM

A soldagem utilizando como fonte de energia o arco elétrico é muito aplicada devida a sua robustez, facilidade em utilização, grande capacidade de produção entre outros. Uma característica importante é a possibilidade de realizar o procedimento de soldagem em várias posições. Marques et al., (2009) cita que as posições de soldagem são nomeadas e classificadas pela ASME - American Society of Mechanical Engineers. Para posições de topo plana, horizontal, vertical e sobre cabeça, nomeia-se respectivamente como 1G, 2G, 3G e 4G (Figura 9). Para solda de filete plana, horizontal, vertical e sobre cabeça, tem-se respectivamente 1F, 2F, 3F e F (Figura 10).

Na Figura 11, representam-se as posições de soldagem para tubulações. A nomenclatura para solda deste tipo é 1G para plana, 2G para horizontal e 3G para circunferencial.

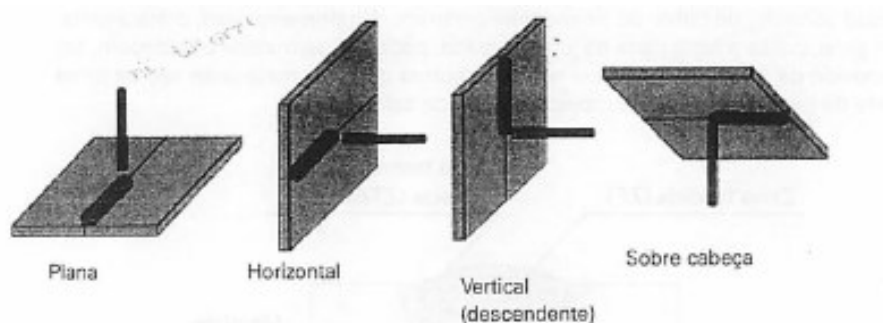


Figura 9 - Posição de solda de topo. (MARQUES et al., 2011).

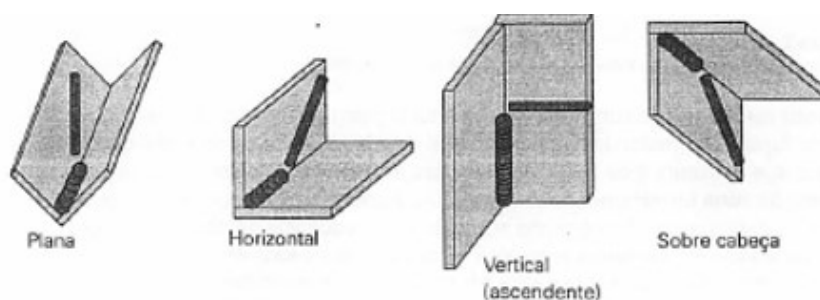


Figura 10 - Posição de solda de filete. (MARQUES et al., 2011).

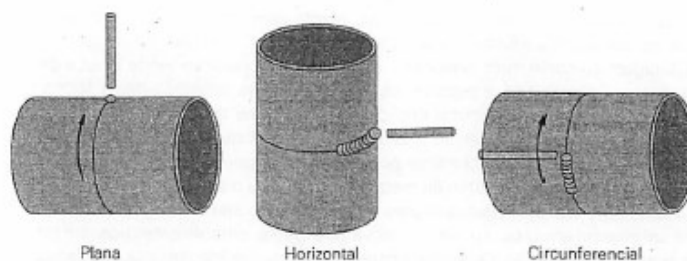


Figura 11 - Posição de solda para tubulações. (MARQUES et al., 2011).

2.5. TÉCNICAS DE DESLOCAMENTO DE TOCHA

É possível classificar três técnicas de soldagem quanto ao deslocamento da tocha: “puxando”, “empurrando” e “ângulo reto” (Figura 12). Para a diferenciação da técnica os ângulos entre a tocha e a linha de junta a ser soldada (na direção de soldagem; ângulos de ataque) e os ângulos laterais entre a tocha e a chapa (ângulos de trabalho) devem ser observados.

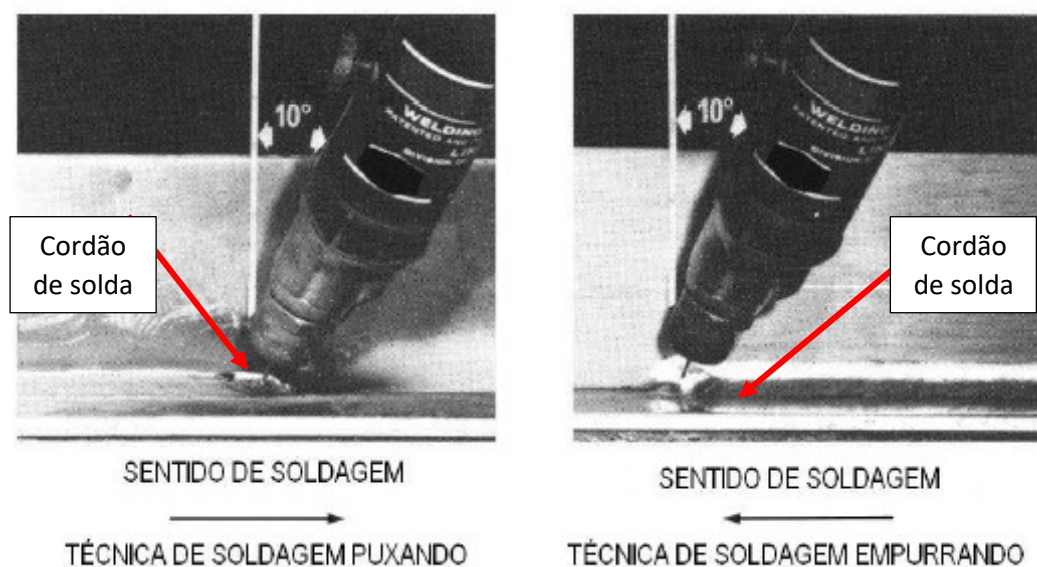


Figura 12 - Ângulos de posicionamento (ângulos de ataque) de tocha para técnicas “puxando” e “empurrando”. (Apostila ESAB, 2006).

Quando a tocha está na posição em que usa a técnica “puxando”, o arame é alimentado no sentido oposto ao do deslocamento do arco, de forma que o arame é adicionado ao metal de solda já depositado. No caso em que a tocha está posicionada “empurrando”, o arame é depositado no mesmo sentido de deslocamento do arco e muitas vezes diretamente na peça soldada. Usualmente, a técnica de soldagem “empurrando” proporciona um cordão de solda mais largo, e um reforço menor, com uma menor penetração (Figuras 13 e 14). Enquanto a técnica de soldagem “puxando” (a mais usada), proporciona um cordão de solda mais estreito, e reforço do cordão de solda e penetração maiores (ESAB, 2006). Quando a tocha é posicionada verticalmente, ou seja, o ângulo de ataque reto, o cordão de solda tem características médias entre as técnicas “empurrando” e “puxando”.

Em procedimentos de soldagem que a peça está em posição vertical, a técnica de soldagem passa a ser chamada de ascendente (técnica “empurrando”), ou descendente (técnica “puxando”), conforme é lustrado na Figura 15.

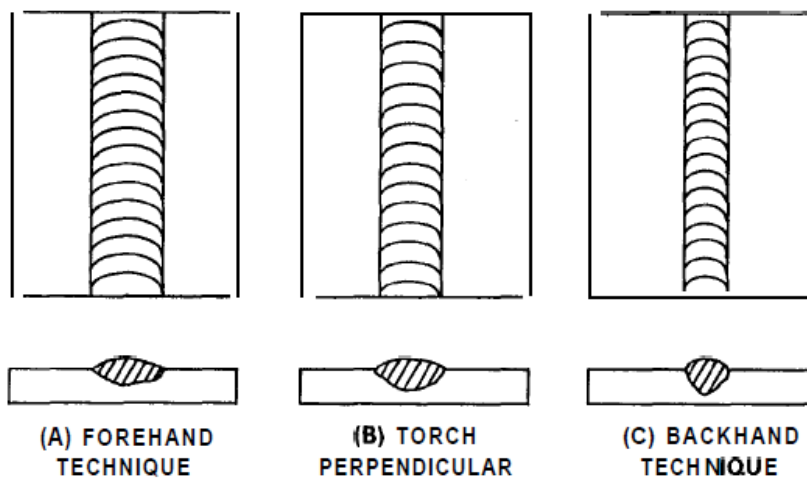


Figura 13 - Cordão de solda em vista superior referente às posições de tocha. (A) “empurrando”, (B) Vertical e (C) “puxando”. (WEMAN, 2003).

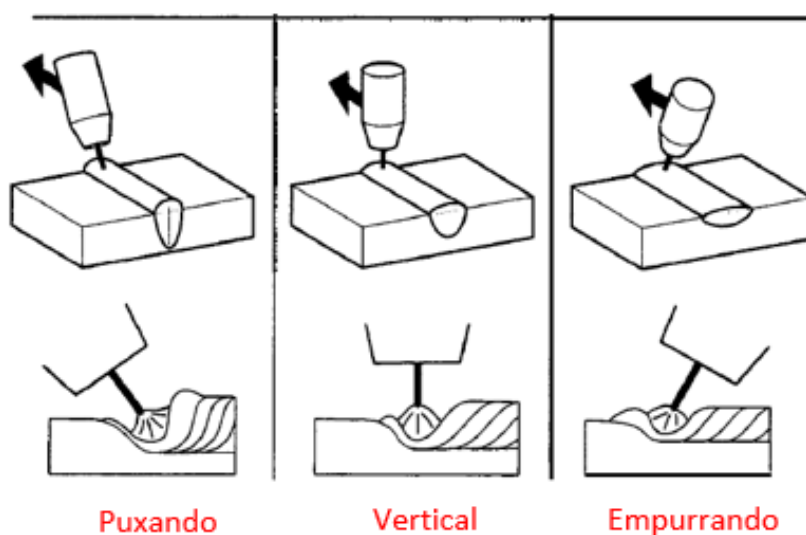


Figura 14 - Técnicas de soldagem referentes ao deslocamento da tocha. (WEMAN, 2003).

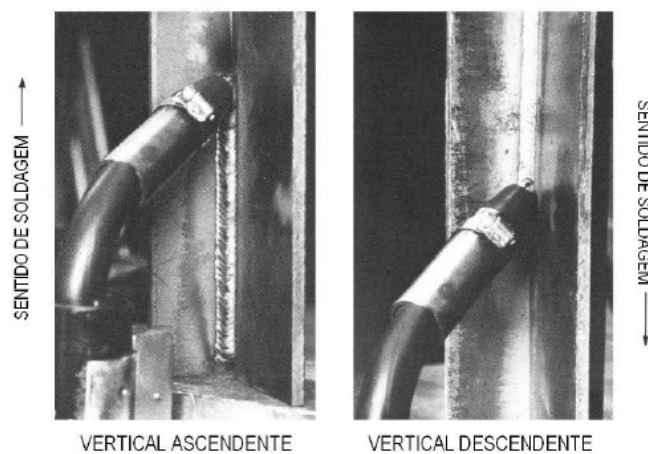


Figura 15 - Movimento da tocha para soldagem vertical. (Apostila ESAB, 2006).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados a metodologia experimental aplicada para realização do trabalho, os equipamentos utilizados, consumíveis e parâmetros de soldagem, assim como algumas dificuldades e pontos importantes de atenção.

3.1. EQUIPAMENTOS

Fonte de soldagem e cabeçote alimentador

Para os ensaios foi utilizada como fonte de soldagem MIG/MAG a máquina de solda multiprocessos apresentada na Figura 16, do fabricante IMC, modelo Inversal 450 que pertence ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia (LAPROSOLDA/UFU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).



Figura 16 - Fonte de soldagem multiprocessos. (Autor).

Dados técnicos da fonte de soldagem disponibilizados no manual de operação do equipamento:

Corrente Nominal: 280 A;

Corrente Máxima: 450 A;

Tensão de alimentação: 200, 380 ou 440 V, trifásico;

Tensão em vazio: 68 V;

Potência nominal: 13 kVA;

Tipos de corrente: Contínua ou alternada (Constante ou pulsada);

Dimensões: 0,5 x 0,6 x 1,2 m (comprimento x largura x altura);

Peso: 170 kg;

Circuito de arrefecimento: 3,5 litros de água destilada;

Fator de Potência 0,95;

Corrente a 100% Fc: 280 A / 35 V;

O cabeçote alimentador de arame é também do fabricante IMC e modelo STA-20, conforme ilustrado na Figura 17.



Figura 17 - Cabeçote alimentador de arame. (Autor).

Este equipamento permite velocidade de alimentação de até 20,7 m/min, o que é um valor considerado bastante alto para o processo MIG/MAG.

Roletes de arraste ou tração

Conforme o nome indica, os roletes de arraste tem a função de guiar e tracionar o arame de solda da bobina até o cabo da tocha. Para os testes, foram selecionados dois roletes de tração com ranhuras de \varnothing 0,8 e \varnothing 1,0 mm (Figura 18). O lado utilizado do rolete foi de \varnothing 0,8 mm.



Figura 18 - Rolete de tração de 0,8 e 1,0 mm. (Autor).

Conforme é mostrado na Figura 18, o valor do diâmetro destacado na face do rolete indica a ranhura ou rasgo do lado oposto, sendo que o arame vai ser acomodado neste rasgo.

Arame eletrodo

A soldagem dos corpos de prova foi realizada com arames maciços ultrafinos de \varnothing 0,6 mm de especificação AWS A5.18 ER70S-6 e composição química percentual de: C: 0,06 a 0,15; Si: 0,8 a 1,15; Mn: 1,4 a 1,85; P: 0,025 (máximo); S: 0,035 (máximo); Cu: 0,5 (máximo). A bobina de arame eletrodo utilizado nos testes é mostrada na Figura 19.



Figura 19 - Arame eletrodo \varnothing 0,6 mm. (Autor).

Tocha de soldagem

A tocha para soldagem (Figura 20) escolhida para realização dos testes é do tipo seca e possui cabo de 0,5 metros. Apesar de boa empunhadura, o cabo de alimentação da tocha possui curto comprimento, o que pode restringir a movimentação e conforto do soldador. Para justificativa da escolha deste cabo curto, trabalhos anteriores feitos por Vittorino (2018) e Martins (2018), mostraram que para velocidade de alimentação alta e o diâmetro pequeno do arame de solda, cabos mais longos poderiam provocar o enrolamento do arame no alimentador ou na entrada da tocha.



Figura 20 - Tocha utilizada para os testes. (MARTINS, 2018).

Gás de proteção

O gás de proteção utilizado foi disponibilizado pelo LAPROSOLDA, composto por uma mistura de 92%Ar + 8%CO₂, fornecido ao laboratório pela distribuidora White Martins. Durante os testes, os valores escolhidos para vazão de gás foram de 10 e 15 L/min. Esses valores de vazão foram escolhidos pelos resultados obtidos por Vittorino (2018) e Martins (2018). A pressão do cilindro foi de 125 Bar. O sistema de gás é composto por cilindro de armazenamento compatível com a norma ISO 14175-M20-ArC-8, manômetros de pressão para argônio, registro de fluxo e mangueiras para gás (Figura 21).



Figura 21 - Gás de proteção e instrumentos de medição de pressão e vazão. (Autor).

Equipamentos de proteção individual e coletivos

Amplamente utilizados em indústrias de diversos portes e até mesmo para usos pessoais, os processos de soldagem exigem equipamentos de proteção individuais (EPI'S) e coletivos (EPC'S), pois podem haver riscos durante a operação. Para os testes propostos, foram utilizados todos os EPI'S recomendados para atividades de soldagem, goivagem e corte a arco elétrico (Figura 22).



Figura 22 - Soldador utilizando os equipamentos de proteção. (Autor).

3.2. CORPOS DE PROVA

Para realização dos testes e confecção dos corpos de prova, foram utilizadas para metal base quatro chapas de aço carbono 1020, com espessura de 6 mm, 200 mm de comprimento e 52 mm de largura montadas em juntas de topo. Ao todo foram utilizados dois corpos de prova para os testes, ilustrados nas Figuras 23 e 24.

Usualmente, arames ultrafinos são indicados para soldagem em chapas finas de até 1 mm de espessura. Para este estudo a utilização de chapas mais grossas foi embasada no trabalho de Vittorino (2018), que realizou testes em corpos de prova mais espessos com parâmetros de entrada semelhantes.



Figura 23 - Corpo de prova 1. (Autor).

Corpo de prova 1

Abertura (t): 2,8 mm
 Espessura da chapa (e): 6 mm
 Dimensões: 200 x 52 x 6 mm



Figura 24 - Corpo de prova 2. (Autor).

Corpo de prova 2

Abertura (t): 3,8 mm
 Espessura da chapa (e): 6 mm
 Dimensões: 200 x 52 x 6 mm

Para controle dimensional da distância de abertura de raiz, as duas extremidades das chapas foram ponteadas (ponto localizado de solda) com a utilização do processo de eletrodo revestido.

Após confecção do corpo de prova, para início dos testes foi feita a limpeza da superfície das chapas para remoção de camadas de óxidos através de esmerilhadeira rotativa e disco flap para aço carbono.

3.3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho tem por objetivo verificar a soldagem por processo MIG/MAG com arames ultrafinos utilizando a técnica de soldagem “empurrando” e transferência metálica por spray, observando e comparando os resultados em relação aos trabalhos de Vittorino (2018) e Martins (2018), que utilizaram a técnica “puxando” e transferência também por spray.

Os corpos de prova foram soldados em posição plana, sendo todos os testes realizados no (LAPROSOLDA/UFU). Para avaliação dos cordões de solda foram utilizados inspeção visual e dados de trabalhos anteriores.

O tipo de transferência metálica usado foi o spray. Para a escolha dos parâmetros que melhor proporcionariam este tipo de transferência metálica e estabilidade do arco, foram feitos alguns testes e chegou-se nos seguintes valores:

- 1 - Tensão de arco (U): 30 V;
- 2 - Corrente média (I_m): 120 A;
- 3 - Velocidade de Alimentação (V_a): 19,9 m/min;
- 4 - Vazão de Gás: 15 L/min.

É ilustrado na Figura 25 a seleção dos parâmetros de entrada no painel da máquina de solda.



Figura 25 - Painel para seleção de parâmetros. (Autor).

Vittorino (2018) concluiu que o processo de soldagem com arames ultrafinos necessita de altas velocidades de alimentação de arame e tensão de soldagem. Além disso, o mesmo autor citou dificuldades em relação a alta velocidade de alimentação do arame, visto que em alguns ensaios o arame enrolou no alimentador. Para minimizar este problema, Martins (2018) verificou que o uso do cabo curto promoveu melhora na alimentação.

Diante disso, além do uso de um cabo curto para tocha, uma alteração no tubo guia do alimentador foi realizada conforme é mostrado na Figura 26, utilizando um tubo de comprimento maior que chegasse mais próximo aos roletes de arraste, impedindo que o arame de solda flambasse ou tivesse algum tipo de folga e viesse a enrolar.

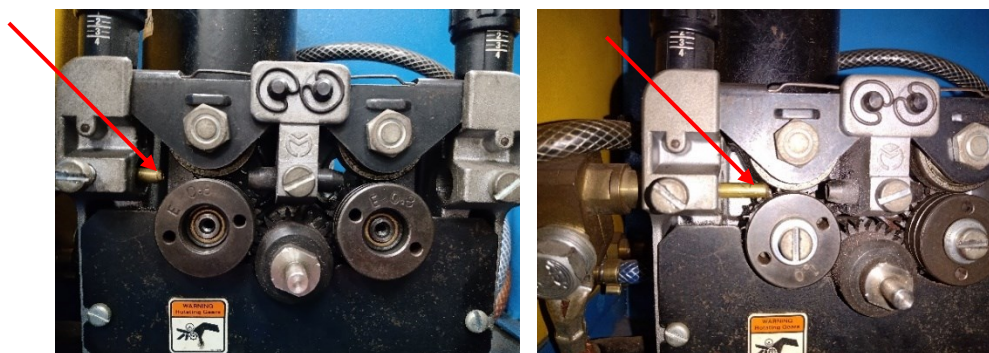


Figura 26 - Ajuste do bico guia de arame de solda. (Autor).

Durante os testes por diversas vezes o arame de solda estava fundindo no bico de solda, não havendo abertura do arco elétrico. Foi observado que o alimentador de arame necessita de um certo tempo para que a velocidade de alimentação chegue até o valor programado e, com a bobina totalmente tensionada o mecanismo não conseguia desenrolar o arame efetivamente. Logo, foi realizado um alívio no tensionamento do enrolamento da bobina, o que propiciou melhor tempo de reação do alimentador de arame e melhor desempenho, de forma que o arco elétrico abrisse e permanecesse estabilizado.

Diante da dificuldade de encontrar bicos de contato de $\varnothing 0,6$ mm em lojas especializadas, foi adaptado um bico de $\varnothing 0,8$ mm para os testes. Conforme é mostrado na Figura 27, o bico foi cortado na ponta e o furo de passagem foi um pouco estrangulado, de forma que não houvesse folga e dobramento do arame eletrodo durante a soldagem.



Figura 27 - Bico de contato $\varnothing 0,8$ mm. a) Bico original e b) Bico adaptado. (Autor).

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados de qualidade, aparência e penetração das amostras após o processo de soldagem, bem como as imagens obtidas das superfícies acabadas.

4.1. TESTES PRELIMINARES

Para verificação dos parâmetros de soldagem que melhor proporcionariam abertura e estabilidade do arco com a transferência metálica por spray, foram realizados cinco testes preliminares, embasados pelos trabalhos anteriores de Vittorino (2018) e Martins (2018).

Os testes para escolha dos melhores parâmetros de soldagem foram realizados pelo professor Dr. Volodymyr Ponomarov e pelo autor deste trabalho, com auxílio do técnico responsável do LAPROSOLDA/UFU.

Como observado por Vittorino (2018), tensões entre 17 e 19 V e correntes de soldagem de 43 a 60 A, promoveram boa estabilidade e soldagem para arames ultrafinos com transferência metálica por curto circuito. Portanto, não foi de interesse deste trabalho a verificação destas faixas de tensão e corrente para este tipo de transferência metálica.

É mostrado na Tabela 3 os valores escolhidos como parâmetros de entrada e constantes e as variáveis obtidas com os cinco testes preliminares. Todos os testes foram realizados com arco elétrico longo, visualmente com cerca de 7 a 10 mm de comprimento (Figura 28).

Tabela 3 - Resultados para testes preliminares e escolha de melhores parâmetros de soldagem. (Autor).

Teste	Tensão média (V)	Corrente média (A)	Velocidade de alimentação (m/min)	Transferência metálica	Vazão de gás (L/min)
1	29	113	19	Spray	10
2	30	116	19,9	Spray	10
3	30	100	17,5	Globular	15
4	30	120	19,9	Spray	15
5	30	123	20,2	Spray	15



Figura 28 – Comprimento aparente do arco elétrico. (Autor).

Nos testes 1 e 2, o arco elétrico foi aberto com dificuldade e não houve estabilização satisfatória. Além disso, sem a folga promovida na bobina de arame eletrodo, o arame por vezes fundia-se no bico de contato, impossibilitando a abertura do arco. Para o teste 3 foi aumentada a vazão de gás de 10 para 15 L/min e ocorreu abertura do arco elétrico, mas não houve estabilidade e ocorreu aumento na quantidade de respingos, visto que o modo de transferência foi o globular. Os parâmetros escolhidos para o teste 4 se mostraram mais eficientes, tanto para abertura e estabilização do arco, quanto para qualidade do cordão de solda. Por fim, para o teste 5 foram utilizados os valores limites permitidos pelo equipamento de soldagem. Neste caso, pouco após abertura do arco elétrico ocorrer, o arame eletrodo enrolou-se no alimentador e o teste foi interrompido. Esse resultado era esperado, visto que velocidades altas de alimentação provocaram enrolamento do arame também em testes realizados por Vittorino (2018). Diante destas análises preliminares, os parâmetros de soldagem escolhidos para os testes oficiais foram os executados no teste 4.

4.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dois corpos de prova oficiais utilizados para soldagem tinham apenas a abertura de raiz diferentes um do outro, sendo realizados dois cordões de solda em cada corpo de prova. Para melhor comparação visual, utilizando-se dos parâmetros de soldagem escolhidos no tópico 5.1, os dois corpos de prova foram soldados pelas técnicas de posicionamento de tocha “puxando” e “empurrando”.

Como padrão, o cordão de solda da esquerda (Figura 29, a) foi feito com a utilização da técnica “puxando” e o da direita (Figura 29, b) com a técnica “empurrando”. Os resultados obtidos com uso da técnica “puxando” e em posição plana nos dois casos apresentados foram semelhantes aos de Vittorino (2018) e Martins (2018).

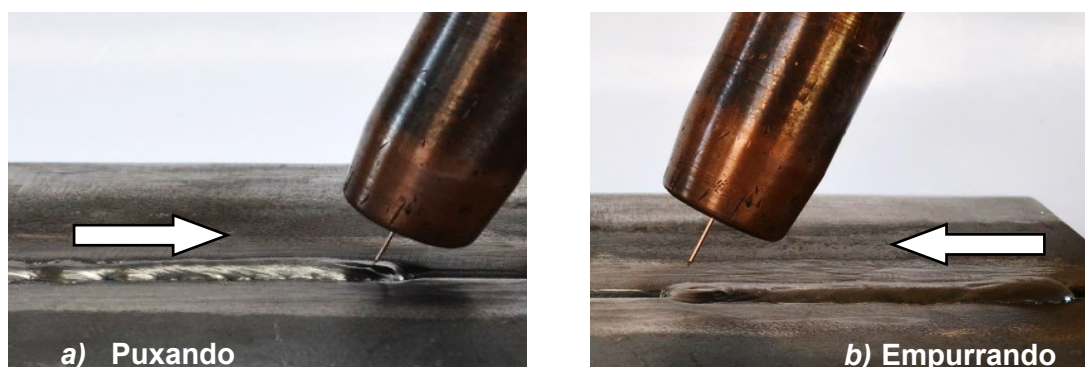


Figura 29 - Posicionamento de tocha para soldagem. a) Puxando; b) Empurrando. (Autor).

O corpo de prova 1 (Figuras 30 e 31) foi soldado com abertura de raiz de 2,8 mm. A Figura 30 mostra os cordões de solda obtidos pela técnica “puxando” (Figura 30, a) e “empurrando” (Figura 30, b). Observou-se que a penetração da solda no corpo de prova 1 foi menor para técnica “puxando” (Figura 31, a), mas houve melhor distribuição de material fundido. Já para técnica “empurrando” a penetração da solda foi maior (Figura 31, b).



Figura 30 - Cordões de solda do corpo de prova 1. a) "puxando"; b)"empurrando". (Autor).



Figura 31 - Penetração da solda corpo de prova 1. a) “puxando”; b) “empurrando”. (Autor).

Para o corpo de prova 2 (Figuras 32 e 33) foi feita a mesma sequência de soldagem, mas utilizando-se cobrejunta removível devido maior abertura de raiz. Com espaçamento de abertura de raiz de 3,8 mm, os resultados foram mais interessantes. Comparando-se os cordões de solda do corpo de prova 1 (Figura 30) é possível observar que a técnica “empurrando” promoveu melhor acabamento superficial e

maior penetração de material depositado (Figura 33). É mostrado na Figura 32 os cordões de solda para técnica “puxando” (Figura 32, a) e “empurrando” (Figura 32, b).



Figura 32 - Cordões de solda do corpo de prova 2. a) "puxando"; b) "empurrando". (Autor).



Figura 33 - Penetração da solda corpo de prova 2. a) "puxando"; b) "empurrando". (Autor).

Comparando os corpos de prova 1 e 2 (Figura 34), verifica-se que a mudança da técnica de posicionamento de tocha promove melhoria no acabamento do cordão de solda. Isso ocorreu porque ao utilizar a técnica “puxando” o arco elétrico se acopla ao metal líquido, promovendo menor fusão do metal de base. Apesar de ocorrer deposição de material, o arco elétrico atua sobre o próprio metal depositado. Quando aplicada a técnica “empurrando”, o arco elétrico é forçado para ficar à frente do metal depositado e sobre o metal base, de maneira que ocorre melhor umectação e fusão das bordas, formando-se um cordão de solda melhor acabado.

É observado que o tecimento melhorou a molhabilidade da solda para as duas técnicas, visto que quando descontinuado houve diferença na qualidade do cordão (Figura 34 a, c), no entanto, mesmo quando utilizado um tecimento menor (Figura 34, b, d) o resultado foi melhor com a técnica “empurrando” em relação a técnica “puxando”.

Como já era esperado, pode-se observar também que o maior espaçamento da abertura de raiz do corpo de prova 2 promoveu melhor penetração para os dois cordões de solda (Figura 34 c, d), principalmente para técnica “empurrando”. Segundo Martins (2018), aberturas de raiz menores provocam a falta de penetração. Outro fator que interfere na penetração é que apesar de utilizar transferência por spray (alta taxa de fusão), para maior estabilidade faz-se necessário maior comprimento do arco, acarretando em perda de energia do arco e, conseqüentemente, uma poça de fusão com menor aporte térmico. Portanto, o espaçamento maior do corpo de prova 2 e utilização de cobrejunta promoveu melhor penetração da solda.

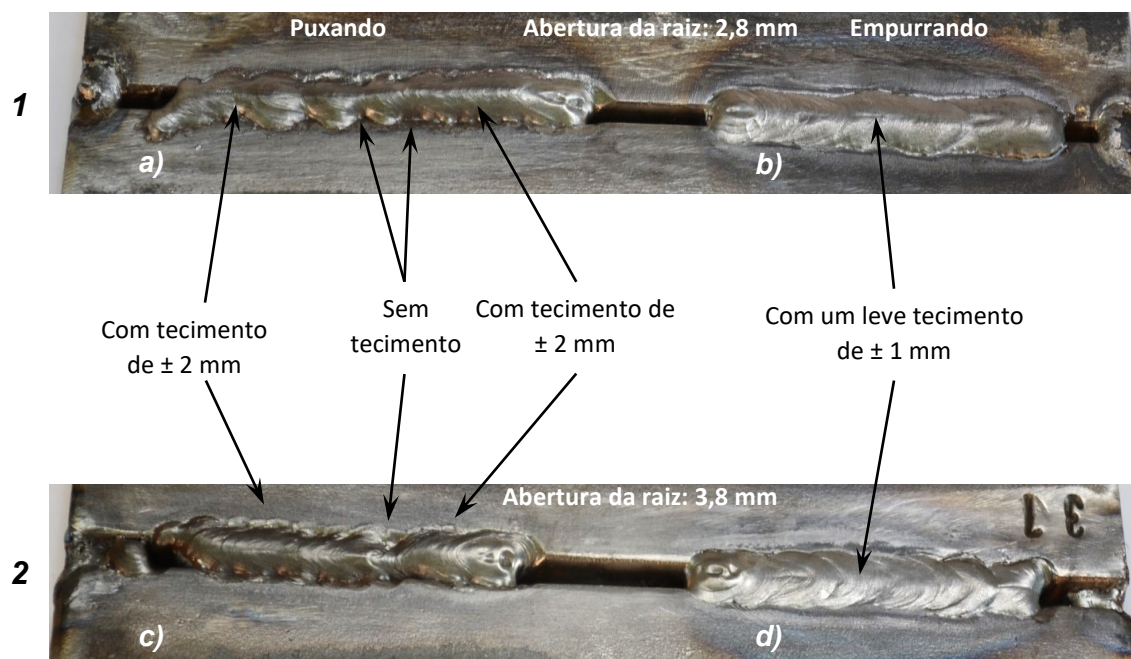


Figura 34 - Comparação dos cordões de solda. 1) Corpo de prova 1; 2) Corpo de prova 2. (Autor).

4.3. DIFICULDADES E ADVERSIDADES DO PROCESSO

Neste tópico serão abordadas algumas dificuldades na utilização de arames ultrafinos e adversidades que podem aparecer durante procedimentos rotineiros de soldagem.

Conforme já mencionado, um dos maiores problemas para realização de soldagem MIG/MAG com arame ultrafino de $\varnothing 0,6$ mm e transferência por spray é a necessidade de alta velocidade de alimentação (acima de 19 m/min), o que muitas vezes pode ser limitado pelo equipamento alimentador disponível. Além disso, atrelado a alta velocidade de alimentação tem-se o risco do enrolamento do arame no cabeçote alimentador ou na tocha de soldagem. Durante alguns testes para escolha dos melhores parâmetros de soldagem, o arame enrolou no cabeçote (Figura 35) mesmo com a utilização do cabo mais curto.

Para a realização dos testes deste trabalho, a utilização de uma tocha com o cabo curto e as regulagens feitas na bobina de arame e tubo guia promoveram melhora na alimentação do arame, no entanto, geraram desconforto para o soldador e limitação para soldagem de peças maiores.

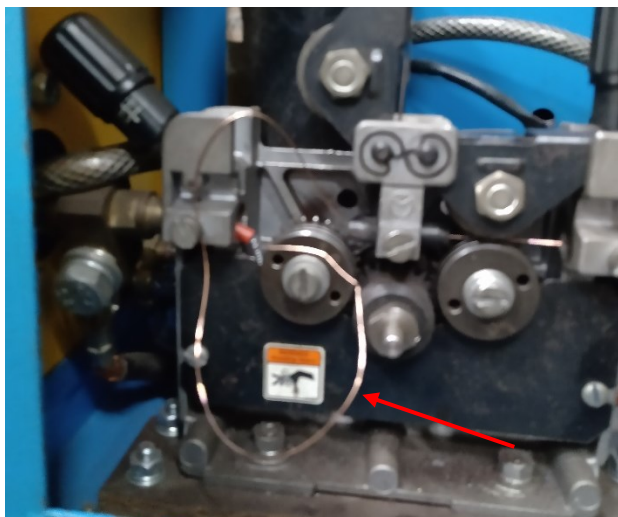


Figura 35 - Arame de solda enrolado no cabeçote alimentador. (Autor).

Outro problema recorrente foi a fusão do arame eletrodo no bico de contato. Com a necessidade de velocidade alta de alimentação de arame e alta corrente de soldagem, o tempo hábil para que o arame chegue nesta velocidade é curto, provocando fusão do arame no bico de contato e impedindo abertura do arco elétrico. Quando não foi promovido alívio no tensionamento da bobina de arame, por muitas vezes o alimentador não conseguia sequer desenrolar o arame.

Além das dificuldades encontradas durante a soldagem, um ponto importante a ser mencionado foi a dificuldade de encontrar materiais compatíveis para soldagem com arame de \varnothing 0,6 mm na cidade de Uberlândia/MG e região, principalmente bico de contato e roletes de tração. O próprio arame eletrodo de \varnothing 0,6 mm não foi encontrado facilmente. Isso mostra que apesar de um processo possível de ser realizado, a soldagem com arames ultrafinos é de certa forma inviável para processos industriais de larga escala.

Por fim, uma adversidade observada durante a montagem dos equipamentos e bancada de testes, foi a incompatibilidade dos valores da graduação dos roletes de tração de arame. Conforme já mencionado no item 3.1, existe um procedimento padrão para montagem e leitura dos roletes de tração no cabeçote alimentador. Foi verificado que alguns roletes não seguiam a padronização de indicação de diâmetro do arame em face oposta a ranhura e, em outros casos, os roletes possuíam ranhuras diferentes do valor indicado na sua face (Figuras 36 e 37).



Figura 36 - Numeração inscrita na face dos roletes. (Autor).

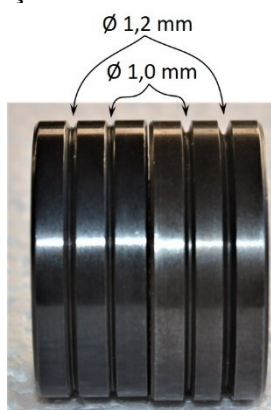


Figura 37 - Roletes de arraste de 1,0 mm/1,2 mm. Rasgos diferentes. (Autor).

Pode-se observar na Figura 36 que os dois roletes possuem mesma numeração. Entretanto, na Figura 37 ficou clara a diferença no tamanho dos rasgos.

Outra situação que foi pontuada é a numeração da face do rolete não indicar o rasgo correto para montagem no alimentador de arame. A Figura 38 ilustra a situação encontrada em dois roletes de 1,0 e 1,2 mm.

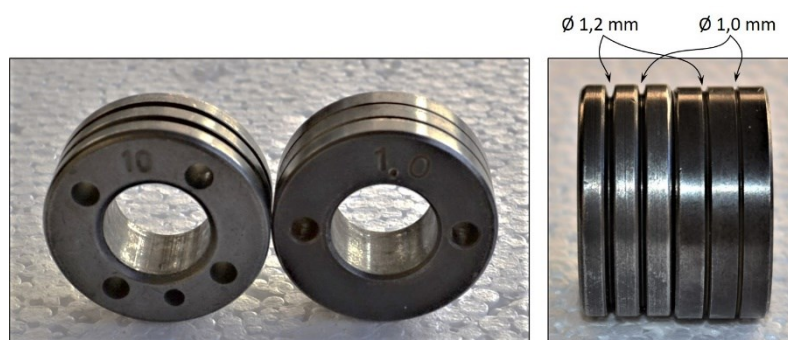


Figura 38 - Roletes com indicação de rasgo invertidas e também com o tamanho dos rasgos diferentes. (Autor).

Diante disso, pode-se verificar que existem variáveis que muitas vezes passam despercebidas em linhas de produção que podem influenciar nos procedimentos, na vida útil dos equipamentos e na qualidade do produto final.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram estabelecidas as conclusões perante os experimentos realizados de acordo com os parâmetros de entrada escolhidos e resultados obtidos.

Apesar da melhor qualidade obtida do cordão de solda com modo transferência spray, a necessidade de alta velocidade de alimentação chegando ao limite do equipamento aliado ao diâmetro ultrafino do arame, ocorreram situações de enrolamento do arame no cabeçote alimentador (Figura 35) e até fusão do arame no bico de contato.

A utilização de uma tocha com o cabo curto para solda gerou limitação de movimento para o soldador, além de poder impedir soldagem manual de peças maiores em passe único.

Em comparação com a técnica “puxando”, foi observada melhor qualidade final em acabamento do cordão de solda com o movimento de tocha “empurrado”. Além disso, para aberturas de raiz maiores houve melhoria na penetração da solda, como já era esperado.

Por utilizar um processo semiautomático, algumas variáveis como habilidade do soldador, condições do equipamento e velocidade de soldagem podem interferir no resultado final da solda em caso de automatização de todo processo.

Diante disso, apesar de potencial melhoria do cordão de solda com utilização da técnica de deslocamento de tocha “empurrando”, a alta velocidade de alimentação de arame, necessidade de cabo curto para solda, níveis maiores de tensão e corrente de soldagem comparados com transferência por curto circuito e dificuldade para encontrar arames eletrodo e acessórios de soldagem para $\varnothing 0,6$ mm, pode-se afirmar a inviabilidade deste procedimento de soldagem nas condições e parâmetros propostos para níveis de escala industrial.

Sugestões para trabalhos futuros

1. Realizar a soldagem por processo MIG/MAG com o arame de $\varnothing 0,6$ mm, modo de transferência spray e técnica de posicionamento de tocha “empurrando” em chapas finas (até 2 mm), comparando com trabalhos anteriores.

2. Verificar a possibilidade da soldagem por processo MIG/MAG com o arame de \varnothing 0,6 mm em posição vertical ascendente com transferência metálica do tipo spray.

6. BIBLIOGRAFIA

Apostila de Soldagem MIG/MAG ESAB. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoIdagemmigmag_nova.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

Apostila ESAB. Apostila Regras para Segurança em soldagem, goivagem e corte ao arco elétrico. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostila_seguranca_na_soldagem_rev1.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

CRUZ, J. A. G. **Uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW.** 2014. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

DE ALMEIDA, H. A. L.; DA MOTA, C. A. M.; SCOTTI, A. **Efeitos do Comprimento de Reversão e do Ângulo de Ataque sobre a Estrutura de Solidificação do Cordão em Soldagem MIG/MAG com “Switch Back”.** São Paulo, v. 17, ed. 2, p. 123-137, 3 mar. 2012.

DE SOUZA, C. I. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto circuito na posição horizontal.** 2011. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

MACHADO, I. G. (1996). **Soldagem e técnicas conexas: Processos.** Porto Alegre: UFRGS.

MARQUES, P. V., Modenesi, P. J., & Bracarense, A. Q. (2011). **Soldagem: Fundamentos e tecnologia.** Belo Horizonte: UFMG.

MARTINS, R. Z. **Aplicabilidade de arame ultrafino na soldagem MIG/MAG de chapas finas.** 2018. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MODENESI, P. J., Marques, P. V., & Santos, D. B. (2012). **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** Belo Horizonte.

O'BRIEN, R. L. (1997). **Welding handbook: Welding processes**. Miami: American Welding Society.

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F.; DO NASCIMENTO, V. C.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. **Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito**. São Paulo, v. 16, ed. 2, p. 114-122, 20 jun. 2011.

SCOTTI, A., PONOMAROV, V. (2014). **Soldagem MIG/MAG: Melhor entedimento, melhor desempenho**. São Paulo: ArtLiber.

VILARINHO, L. O. **Modos Fundamentais de Transferência Metálica: Naturais e Controlados**. *Revista da Soldagem*, p. 14 - 19, 10 maio 2007.

VITTORINO, A. A. O. F. **Avaliação de potencialidades do processo de soldagem MIG/MAG com arames eletrodo ultrafinos**. 2018. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia 2018.

WAINER, E., Brandi, S. D., & Mello, F. D. (2004). **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: EDGARD BLÜCHER LTDA.

WEMAN, K. (2003). **Welding processes handbook**. New York: Woodhead Publishing Ltd.