

PEDRO HENRIQUE RESENDE RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DE
ARAMES-ELETRODO NA TAXA DE FUSÃO NO
PROCESSO MIG/MAG**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

PEDRO HENRIQUE RESENDE RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DE
ARAMES-ELETRODO NA TAXA DE FUSÃO NO PROCESSO
MIG/MAG**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia (FEMEC – UFU), como parte dos
requisitos para a obtenção do título de **Bacharel
em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Materiais e processos
de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

UBERLÂNDIA – MG

2019

PEDRO HENRIQUE RESENDE RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DE
ARAMES-ELETRODO NA TAXA DE FUSÃO NO PROCESSO
MIG/MAG**

Banca Examinadora:

Prof.º Dr. Volodymyr Ponomarov
Universidade Federal de Uberlândia

Prof.º Dr. Douglas Bezerra de Araújo
Universidade Federal de Uberlândia

Prof.º Dr. Maksym Ziberov
Centro Universitário UNA Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2019

AGRADECIMENTOS

Deixo os meus sinceros agradecimentos:

A Deus, por todas as graças e conquistas obtidas;

Aos meus pais, Edson e Juliana, por toda a dedicação e apoio na minha formação pessoal e profissional;

Ao meu irmão Paulo por todas as conversas e conselhos recebidos e por toda a motivação nos momentos em que precisei;

Ao professor Volodymyr Ponomarov, pela paciência, dedicação e pela valiosa orientação que recebi durante o processo de desenvolvimento deste trabalho;

A todos os colegas que tive o prazer de conhecer e, que de alguma forma, contribuíram para que a passagem pelo curso de Engenharia Mecânica fosse descontraída e alegre.

RIBEIRO, P. H. R. **Análise da influência do diâmetro de arames-eletrodo na taxa de fusão no processo MIG/MAG**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a análise da influência do diâmetro de arames-eletrodo na taxa de fusão no processo MIG/MAG utilizando, para isso, a comparação entre a configuração convencional de um arame maciço de 1,0 mm de diâmetro e uma configuração especial formada por três arames com diâmetro de 0,6 mm alimentados ao mesmo tempo. Assim consegue-se assegurar uma mesma densidade de corrente, eliminando a influência da variação do efeito Joule, para que apenas o efeito da relação dos parâmetros geométricos do arame A_s/V (área superficial sobre volume) fosse observado. Para que fossem válidas as comparações, os parâmetros da fonte de alimentação foram mantidos constantes durante todos os testes. Com base nas informações obtidas, concluiu-se que a configuração formada por três arames finos obteve um aumento de apenas 0,7% na taxa de deposição. Logo, pode ser concluído que um notável aumento da taxa de fusão observado para casos de uso de arames finos (aproximadamente 1,5% para cada 0,1 mm da redução do diâmetro do arame) é a contribuição do efeito Joule, como resultado do aumento da densidade de corrente.

Palavras-chave: MIG/MAG. Taxa de deposição. Soldagem com três arames.

RIBEIRO, P. H. R. **Analysis of the influence of diameter of electrode wire on deposition rate in the MIG/MAG process.** 2019. 46 p. Final paper, Federal University of Uberlandia.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the influence of the electrode wire diameter on the melting rate in the MIG/MAG process, using the comparison between the conventional configuration of a 1.0 mm diameter solid wire and a special configuration. formed by three wires with a diameter of 0.6 mm fed at the same time. This ensures the same current density by eliminating the influence of the Joule effect variation, so that only the effect of the A_s/V (surface area over volume) geometric parameters ratio is observed. For valid comparisons, the power supply parameters were kept constant throughout the tests. Based on the information obtained, it was concluded that the configuration consisting of three thin wires obtained an increase of only 0.7% in the deposition rate. Therefore, it can be concluded that a remarkable increase in melt rate observed for thin wire use cases (approximately 1.5% for each 0.1 mm of wire diameter reduction) is the contribution of the Joule effect as a result. increasing current density.

Key-words: MIG/MAG. Deposition rate. Welding with three electroded wires.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão de Bernados. Fonte: Marques <i>et al.</i> (2007)	2
Figura 2.2 – Evolução dos processos de soldagem. Fonte: Wainer <i>et al.</i> (1992)	4
Figura 2.3 – Esquema do processo de soldagem MIG/MAG. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof.º Dr. Volodymyr Ponomarov	7
Figura 2.4 – Característica estática da fonte. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof.º Dr. Valtair Ferraresi	10
Figura 2.5 – Gás de proteção agindo no cordão de solda	11
Figura 2.6 – Tipos de transferências metálicas	12
Figura 2.7 – Corrente e tensão x tempo para transferência metálica curto circuito. Fonte: ESAB (2005)	13
Figura 2.8 – Transferência metálica do tipo goticular (spray). Fonte: ESAB (2005)	16
Figura 3.1 – Velocidade de alimentação em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Welding Handbook (1991)	18
Figura 3.2 – Taxa de fusão (consumo) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Machado (1996)	18
Figura 3.3 – Taxa de fusão (consumo) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Palmar (1995)	19
Figura 3.4 – Taxa de fusão (consumo) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Cary (1979)	19
Figura 4.1 – Confecção de bobina com três arames finos enrolados simultaneamente	26
Figura 4.2 – Configuração com três arames de diâmetro nominal igual a 0,6 mm passando pelos roletes da máquina de soldagem	26
Figura 4.3 – (a) Tocha de soldagem do processo MIG/MAG com alimentação de três arames consecutivamente e (b) três arames com gota fundida na ponta	27

Figura 5.1 – Testes de soldagem realizados onde (a) é o cordão de solda feito com o arame de diâmetro $\varnothing = 1,0$ mm e (b) é o cordão feito com os três arames de diâmetro $\varnothing = 0,6$ mm	29
Figura 5.2 – Gráfico de tensão x tempo para o arame-eletrodo de $\varnothing = 1,0$ mm	29
Figura 5.3 – Gráfico de corrente x tempo para o arame-eletrodo de $\varnothing = 1,0$ mm	30
Figura 5.4 - Gráfico de tensão x tempo para os três arames de $\varnothing = 0,6$ mm.....	30
Figura 5.5 - Gráfico de corrente x tempo para os três arames de $\varnothing = 0,6$ mm	31
Figura 5.6 – Taxa de fusão (kg/h) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Cary (1979)	33
Figura 5.7 – Taxa de fusão (kg/h) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Adaptado de Welding Handbook (1991)	33
Figura 5.8 – Influência da densidade de corrente na taxa de fusão (kg/h) para diferentes diâmetros de arame-eletrodo	34
Figura 5.9 – Influência da relação A_s/V na taxa de fusão (kg/h) para diferentes diâmetros de arame-eletrodo	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens do processo MIG/MAG	11
Tabela 2.2 – Recomendação de corrente média de soldagem para o modo de transferência metálica do tipo curto-circuito para alguns diâmetros de arames-eletrodo. Fonte: ESAB (2005)	14
Tabela 2.3 – Corrente mínima para soldagem com modo de transferência do tipo goticular. Fonte: ESAB (2005)	15
Tabela 3.1 – Densidade de corrente para diferentes diâmetros de arame-eletrodo para uma corrente de 150 A	21
Tabela 3.2 – Relação A_s/V para arames-eletrodo de 0,6 a 1,2 mm	23
Tabela 4.1 – Valores da seção transversal, relação A_s/V e densidade de corrente para o arame-eletrodo de $\varnothing = 1,0$ mm e para três arames de $\varnothing = 0,6$ mm	27
Tabela 5.1 – Dados experimentais obtidos para o arame-eletrodo de diâmetro igual a $\varnothing = 1,0$ mm e velocidade de alimentação igual a 6,0 m/min	28
Tabela 5.2 – Dados experimentais obtidos para os três arames-eletrodo de diâmetro igual a $\varnothing = 0,6$ mm e velocidade de alimentação igual a 6,0 m/min	28

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ΔT	Varição de temperatura
\varnothing	Diâmetro
Ar	Argônio
A_s	Área superficial
c	Calor específico
CO ₂	Dióxido de carbono
h	Altura
H ₂	Gás hidrogênio
He	Hélio
I	Corrente
J	Densidade de corrente
m	Massa
N ₂	Gás nitrogênio
O ₂	Gás oxigênio
q	Calor
r	Raio
T	Temperatura
V	Volume
AWS	American Welding Society
ER	Eletrodo Revestido
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gas

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 História da soldagem	2
2.2 Definição de soldagem	5
2.3 Soldagem MIG/MAG	7
2.4 Variáveis do processo MIG/MAG	8
2.4.1 Componentes do equipamento	8
2.4.2 Característica estática da fonte	9
2.4.3 Gases de proteção	10
2.4.4 Vantagens e desvantagens	11
2.5 Tipos de transferências metálicas	12
2.5.1 Curto circuito	12
2.5.2 Globular	14
2.5.3 Goticular (spray)	14
3 ANÁLISE DA DINÂMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM	17
3.1 Análise da fusão do arame-eletrodo	17
3.2 Análise termodinâmica simplificada da fusão do eletrodo	20
3.3 Densidade de corrente versus diâmetro do arame-eletrodo ..	20
3.4 Análise da relação dos parâmetros geométricos A_s/V	22
4 METODOLOGIA	25
4.1 Materiais e equipamentos utilizados	25
4.2 Procedimento experimental	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
6 CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1 INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos anos fez com que os processos de fabricação se tornassem mais eficientes. Isso fez com que as empresas desenvolvessem novas estratégias de produção para se manterem competitivas no mercado. Dessa forma, uma das principais necessidades das grandes indústrias é se tornarem eficientes nos processos de fabricação, para conseguirem vantagens econômicas sobre os concorrentes e para atenderem as altas demandas solicitadas atualmente. Uma maneira de alcançar tal objetivo é através de inovações que permitam ganhos de produtividade.

A soldagem é um processo de fabricação antigo e existem indícios que datam mais de cinco mil anos. Sua evolução, no Brasil, se deu a partir da década de 60, nos setores de energia, transportes e siderurgia, que estavam em grande desenvolvimento após o despertar industrial ocorrido na época do presidente Juscelino Kubitschek (WAINER, 1992).

Além disso, a soldagem é um processo de união permanente de materiais com grande importância mundial, pois possui grande gama de aplicações e é relativamente barata quando comparada com outros processos de fabricação como, por exemplo, a manufatura aditiva através da impressão 3D, conformação mecânica e usinagem. Outra de suas principais vantagens é o fato de se obter uma união onde os materiais continuam com suas características mecânicas e químicas.

Dentre os tipos mais comuns de soldagem destacam-se o processo de eletrodos revestidos (ER), MIG/MAG (*Metal Inert Gas* e *Metal Active Gas*) (ou GMAW que significa *Gas Metal Arc Welding*) e TIG (*Tungsten Inert Gas*). Cada processo possui parâmetros específicos que controlam o rendimento do trabalho executado. No processo MIG/MAG, pode-se observar que a vazão de gás, tensão, corrente e geometria do arame eletrodo, foco deste trabalho, influenciam diretamente no processo de soldagem.

O objetivo deste trabalho é promover os resultados dos ensaios realizados entre diferentes geometrias de arames eletrodos, mais especificamente um arame maciço de diâmetro nominal igual a $\varnothing = 1$ mm e outra configuração composta por três arames de diâmetro nominal de $\varnothing = 0,6$ mm ao mesmo tempo, para avaliar os ganhos obtidos por tal configuração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História da soldagem

Até o século XIX, a soldagem era considerada um processo secundário de fabricação, mas essa perspectiva mudou com o avanço da tecnologia da época. A partir das experiências de Sir Humphrey Davy (1801 – 1806) com o arco elétrico, da descoberta do acetileno por Edmund Davy e do desenvolvimento de fontes de energia elétrica que possibilitaram o aparecimento dos processos modernos de soldagem por fusão, a soldagem tornou-se um dos principais processos de fabricação utilizado industrialmente (MODENESI, 2012).

Um inglês chamado Wilde obteve a primeira patente de soldagem por arco elétrico em 1865, depois de muitas experiências com a novidade tecnológica da época. Ele conseguiu unir duas peças de ferro de pequena dimensão através de uma corrente elétrica que passava por elas, criando a solda por fusão. Aproximadamente vinte anos depois, Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky registraram na Inglaterra a primeira patente de um processo de soldagem, baseado em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada, fundindo os metais à medida que o arco era manualmente passado sobre a junta a ser soldada, mostrada na Figura 2.1.

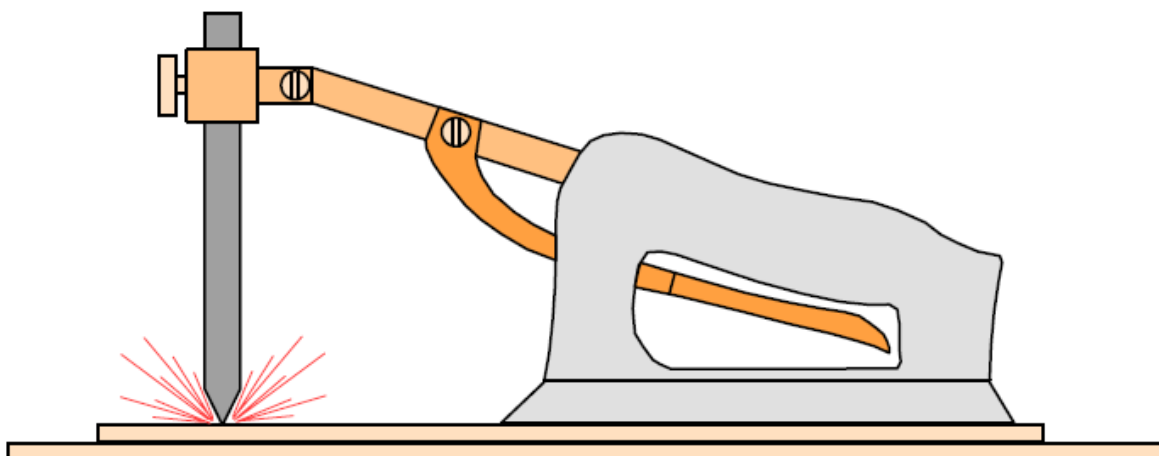


Figura 2.1 – Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão de Bernados. Fonte: Marques *et al.* (2007)

Em 1890, o russo Slavianoff e o estadunidense Charles Coffin desenvolveram, de forma independente, a soldagem com eletrodo metálico nu consumível. Dessa forma, nos anos seguintes, o processo de soldagem por arco foi realizado com eletrodos nus, que eram consumidos na poça de fusão e tornavam-se parte do metal de solda. Porém, este processo apresentava problemas como a formação de óxidos e nitretos no cordão de solda, fazendo com que as soldas fossem de baixa qualidade.

No início do século XX, percebeu-se a importância da proteção do arco contra os agentes atmosféricos (O_2 e N_2). Para conseguirem proteger o cordão de solda durante a soldagem, revestiu-se o eletrodo com um material que se decompunha sob o calor do arco para formar uma proteção gasosa. Como resultado, foram tentados vários métodos de revestir os eletrodos, tais como o acondicionamento e imersão.

Em 1904, Oscar Kjellberg, engenheiro sueco, inventou o primeiro eletrodo revestido. Para facilitar a abertura do arco e aumentar a sua estabilidade, Kjellberg, originalmente, criou um revestimento composto por uma camada de cal. Posteriormente, o engenheiro sueco fundou a empresa ESAB, que está presente no mercado internacional até os dias atuais (MODENESI, 2012).

A princípio, no começo do século XX, a soldagem teve pouca utilização, sendo restrita, principalmente, à execução de reparos de emergência. Isso mudou com a eclosão da 2ª Guerra Mundial, período no qual a soldagem começou a ter maior relevância como um processo de fabricação. Assim, na década de 30, esses esforços culminaram no eletrodo revestido extrudado, melhorando a qualidade do metal de solda, acarretando no que muitos consideram o mais significativo avanço na soldagem por arco elétrico.

Nesta mesma época, outro processo de soldagem, largamente utilizado nos dias atuais, surgiu como consequência dos desenvolvimentos tecnológicos aplicados na indústria bélica, sendo ele o MIG/MAG. Este processo utiliza um arame-eletrodo nu e a proteção gasosa é feita com gases como argônio, hélio e gás carbônico. A Figura 2.2 mostra um gráfico com a evolução dos processos de soldagem com o passar do tempo.

O desenvolvimento de novos processos de soldagem foi resultado direto da busca contínua pelo aumento da produtividade. Atualmente, mais de 50 processos diferentes de soldagem, onde alguns estão listados na Figura 2.2,

possuem alguma aplicação industrial e a soldagem é o mais importante método para união permanente de metais. Esta relevância é ainda mais evidente pela utilização de processos de soldagem nas mais diversas atividades industriais e pela necessidade de se ter uma boa soldabilidade nos novos tipos de aços e outras ligas metálicas desenvolvidas atualmente (MARQUES *et al.*, 1992).

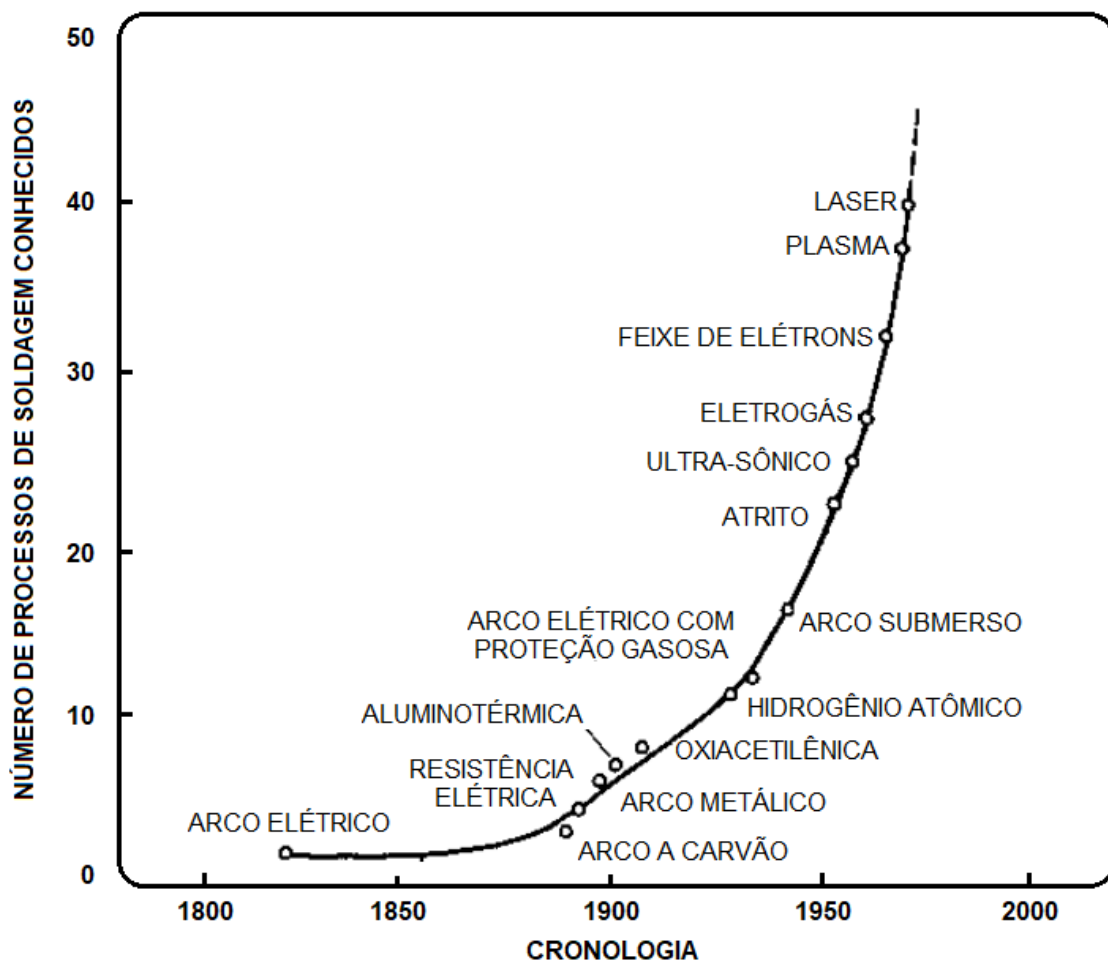


Figura 2.2 – Evolução dos processos de soldagem. Fonte: Wainer *et al.* (1992)

Durante a escolha do processo de soldagem, deve-se analisar, principalmente, a posição de soldagem, velocidade, penetração e deposição de material. Além disso, também deve-se levar em consideração a produtividade desejada, a disponibilidade de soldadores e/ou operadores qualificados. O acabamento da solda requerido, os recursos disponíveis e o ambiente de trabalho também são fatores relevantes na escolha do processo. Mesmo com muitos processos de soldagem disponíveis, o processo MIG/MAG possui larga

aplicação industrial devido sua alta produtividade, elevada versatilidade e boa portabilidade da tocha (SCOTTI, A. e PONOMAREV, V., 2008).

Nas Seções a seguir serão abordadas a definição de soldagem (2.2) e será dado um enfoque no processo MIG/MAG (2.3), tema deste trabalho. Também serão comentadas algumas variáveis do processo (2.4), tipos de transferências metálicas (2.5) e algumas vantagens e desvantagens que a soldagem MIG/MAG possui (2.6).

2.2 Definição de soldagem

Um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas se encaixa no termo soldagem. De acordo com definições antigas, a soldagem é considerada um método de união, porém, muitos desses processos ou variações desses são usados para a deposição de material sobre uma superfície. Diferentes processos diretamente relacionados com os processos de soldagem são utilizados para o corte de peças metálicas, por exemplo, a solda com oxiacetileno. Os aspectos térmicos dessas operações de recobrimento e corte são bastante semelhantes aos de soldagem e, por isso, muitos pontos abordados na metalurgia da soldagem são válidos para essas operações.

Segundo Marques *et al.* (2007), existem diferentes definições propostas para a soldagem:

- “Processo de junção de metais por fusão”.

Deve-se ressaltar outros materiais também podem ser unidos através de fusão, como os materiais poliméricos. Além disso, segundo Marques *et al.* é possível soldar sem que haja a fusão dos materiais envolvidos.

- “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas”.

Aqui, o termo “continuidade” tem um significado similar ao da continuidade das funções matemáticas, ou seja, a junta soldada contém as mesmas propriedades do metal de base.

- “Operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição”.

Esta definição é adotada pela AWS – *American Welding Society*, e, segundo Marques *et al.*, é meramente operacional e não contribui para o aspecto operacional do processo.

- “Processo de junção de materiais no qual as forças de união estabelecidas entre as partes a serem unidas são de natureza similar àquelas existentes no interior das partes e responsáveis pela própria existência destas, como materiais sólidos, isto é, as forças de ligação química”.

Esta definição coloca a soldagem e a brasagem juntas e diferencia estes dois processos da colagem, pois esta é baseada em forças de ligação de diferente tipo para a formação da junta.

Conforme descrito no texto *Introdução à Metalurgia da Soldagem*, de Modeseni *et al.* (2012), existem duas categorias mais abrangentes para os métodos de união dos metais, a saber, aqueles baseados no aparecimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles baseados em forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares).

Na primeira categoria, tem-se como exemplos a parafusagem e a rebiteagem. Neste caso, a resistência da junta de união é dada pela resistência ao cisalhamento do parafuso ou rebite, mais as forças de atrito entre as superfícies em contato. Na segunda categoria, a união é conseguida através da aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, ou destas e um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas primárias (metálica, covalente ou iônica) ou

secundárias (ligação de Van der Waals). Como exemplos desta última categoria, pode-se citar a soldagem, a brasagem e a colagem.

2.3 Soldagem MIG/MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW) é um processo em que o arco elétrico fornece calor suficiente para fundir o eletrodo metálico nu e consumível, permitindo que se possa fazer a união de peças metálicas (MARQUES *et al.*, 2007). Para isso, a poça de metal fundido precisa de proteção contra contaminação da atmosfera (gases como O_2 , N_2 e H_2), feita através de um gás de proteção, podendo ser puro ou uma mistura. A Figura 2.3 ilustra os equipamentos do processo de soldagem MIG/MAG assim como o cordão de solda e o gás de proteção atuando na poça de fusão.

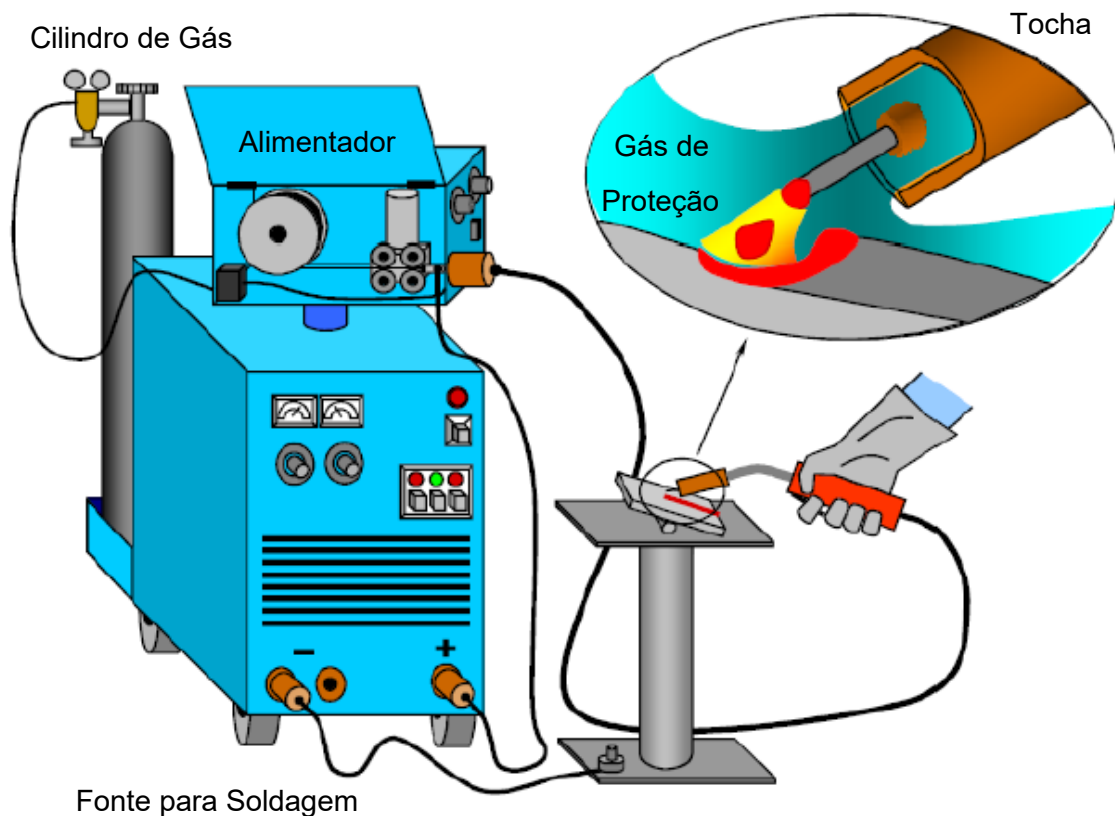


Figura 2.3 – Esquema do processo MIG/MAG. Fonte: Material didático a disciplina de Soldagem e Fundição do Prof.º Dr. Volodymyr Ponomarov

Utilizam-se também as nomenclaturas MIG (*Metal Inert Gas*) para os casos onde o gás utilizado é inerte e, portanto, apenas protege a poça de fusão, e MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás, além de proteger a poça, também reage proporcionando maior estabilidade do arco. Usualmente denomina-se MIG/MAG pelo fato de existir a possibilidade de se usar uma mistura de gases inertes e ativos como, por exemplo, a mistura de argônio (Ar) com gás carbônico (CO₂).

O processo MIG/MAG possui ótimas características para ser utilizado com robôs, permitindo com que a soldagem seja feita de forma automática ou semiautomática. Isto se deve pelo fato de ser um processo em que se pode soldar em todas as posições, desde que os parâmetros de soldagem sejam escolhidos de forma correta, possibilitando uma boa estabilidade no arco, quase nenhuma escória e mais de um passe sem nenhuma limpeza prévia.

2.4 Variáveis do processo MIG/MAG

As variáveis e parâmetros importantes presentes no processo são a velocidade de alimentação do arame eletrodo (corrente de soldagem), tensão (comprimento do arco), velocidade de soldagem, gás de proteção utilizado, diâmetro do arame eletrodo e ângulos da tocha.

2.4.1 Componentes do equipamento

O conjunto básico do equipamento para realizar a soldagem é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame e uma tocha de soldagem. O alimentador de arame é o responsável por deslocar o arame-eletrodo em direção à tocha por meio de roletes propulsores. É muito importante que a velocidade de alimentação do arame seja constante para uma solda uniforme e de boa qualidade.

A tocha é um importante componente do sistema, pois é ela que tem a função de direcionar o arame-eletrodo e o gás de proteção para a poça de fusão. Visto que fica posicionada próxima ao arco elétrico e a poça de fusão, a tocha precisa de refrigeração, podendo ser feita pelo mesmo gás de proteção ou água, dependendo das condições de trabalho.

O bico de contato assegura a passagem de corrente vinda da fonte para o arame, através do contato entre os dois. Um contato seguro entre o bico e o arame é indispensável para que se tenha uma boa estabilidade no processo MIG/MAG. Em geral, são utilizados bicos de cobre puro ou de ligas de cobre.

Os arames eletrodos são disponíveis em vários diâmetros diferentes, sendo que os mais comuns são os diâmetros de 0,8, 1,0, 1,2 e 1,6 mm. Além de diâmetros diferentes, são encontrados também arames de diferentes materiais, para a soldagem de praticamente todas as ligas ferrosas e muitas não ferrosas, como é o caso do cobre, alumínio e até mesmo materiais mais reativos, como é o caso do titânio.

2.4.2 Característica estática da fonte

A fonte que irá fornecer a corrente e tensão para o procedimento é comumente caracterizada pela curva estática do tipo tensão constante, fazendo com que a corrente não seja regulada diretamente no equipamento e sim através da regulagem da velocidade de alimentação do arame. Outro ponto a ser destacado é que a tensão regulada na fonte é quem irá determinar o comprimento do arco, ou seja, distância entre as regiões catódicas e anódicas. Essa característica estática da fonte assegura o fenômeno do auto ajuste do comprimento do arco. A Figura 2.4 ilustra o comportamento estático da tensão do processo MIG/MAG.

O fenômeno do auto ajuste é um fator que influencia muito no processo de soldagem, quando se avalia a dificuldade de soldar. Quando os diferentes processos de soldagem são comparados pelo parâmetro de dificuldade de realizar a solda, o processo MIG/MAG é o que exige menos treinamento e habilidade por parte do soldador. Tanto o processo de soldagem com eletrodo revestido, quanto o processo TIG demandam certa habilidade e treinamento considerável para a execução de um cordão de solda bem feito. Já a execução utilizando o processo MIG/MAG, por ser mais simples, permite que, com pouca prática, o soldador consiga cordões de solda com boa qualidade. Deve-se ressaltar que existe uma dificuldade na configuração dos parâmetros de soldagem, sendo mais complexos que no caso da soldagem ER.

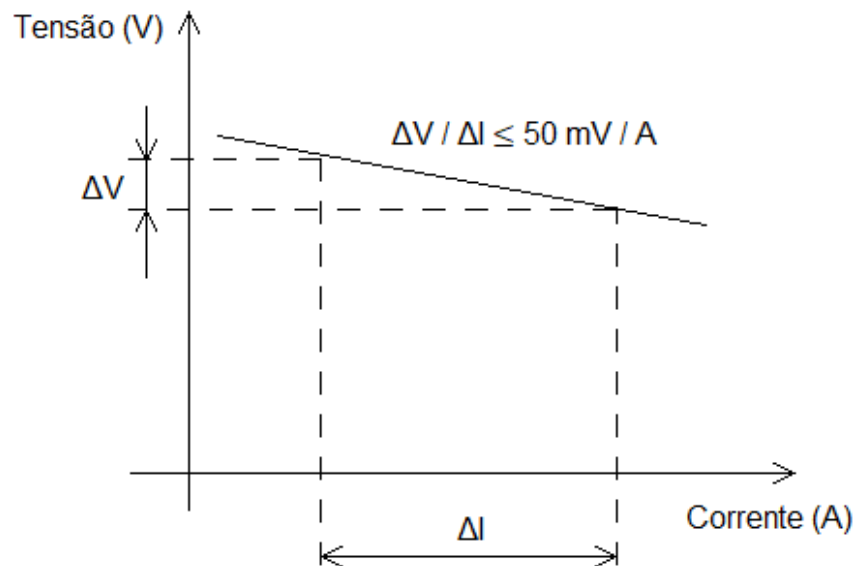


Figura 2.4 – Característica estática da fonte. Fonte: Material didático da disciplina de Fundição e Soldagem do Prof.º Dr. Valtair Antônio Ferraresi

2.4.3 Gases de proteção

Os gases (Figura 2.5) mais utilizados na soldagem são: argônio (Ar), dióxido de carbono (CO₂) e, em alguns casos, hélio (He). Cada um dos gases citados possui propriedades diferentes e auxiliam a soldagem da seguinte forma:

- O argônio possui baixa capacidade de troca de calor e baixo potencial de ionização. Sua aplicação pura deve ser feita em ligas de alumínio, níquel, cobre, magnésio e titânio. Para o uso em outras ligas metálicas, utiliza-se mistura de argônio com outros gases, por exemplo, o CO₂.
- O dióxido de carbono possui alta capacidade de troca de calor, necessita de tensões maiores para que o arco fique aberto e possibilita cordões de solda mais largos e com alta penetração. É utilizado pura para a solda de aços de baixo carbono.
- O hélio tem como principais características a alta capacidade de troca de calor, alto potencial de ionização, permite a utilização de maiores velocidades de soldagem, além de permitir a formação de um cordão de

solda mais largo e com alta penetração. A desvantagem é o elevado custo, quando comparado com o Ar e o CO₂.

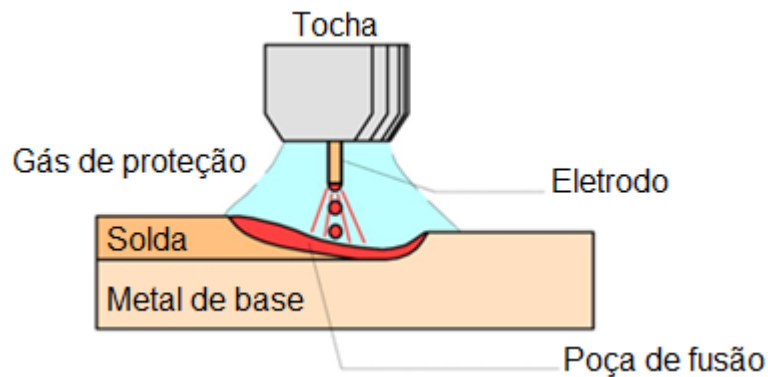


Figura 2.5 – Gás de proteção agindo no cordão de solda

2.4.4 Vantagens e desvantagens

Algumas das vantagens e limitações do processo MIG/MAG estão ilustradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do processo MIG/MAG.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada taxa de deposição • Pode ser operado de forma automática ou semiautomática • A soldagem pode ser realizada em qualquer posição • O processo é aplicável a uma grande quantidade de metais • Processo de fácil domínio prático • Requer pouca limpeza do cordão após a soldagem 	<ul style="list-style-type: none"> • O equipamento é mais complexo, caro e menos portátil que ER • A soldagem deve ser realizada em ambientes sem a ação do vento, para não remover a proteção gasosa • Dificuldade de soldar em locais de difícil acesso <ul style="list-style-type: none"> • Ação metalúrgica limitada • Altos níveis de calor e iluminação irradiados • Dificuldades em manter a proteção gasosa em trabalhos no campo

2.5 Tipos de transferências metálicas

Basicamente, o processo MIG/MAG possui três técnicas distintas de modo de transferência de metal: curto circuito, globular e goticular ou spray. Essas técnicas descrevem a maneira pela qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão. Na transferência por curto circuito, a transferência ocorre quando um curto circuito elétrico é estabelecido. Isso acontece quando o metal fundido na ponta do arame toca a poça de fusão.

Na transferência do tipo goticular, pequenas gotas de metal fundido são desprendidas da ponta do arame e são projetadas por forças eletromagnéticas em direção a poça de fusão. A transferência globular ocorre quando as gotas de metal fundido são muito grandes e movem-se em direção à poça de fusão sob a influência da gravidade.

Os fatores que determinam o modo de transferência metálica são a corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte e o gás de proteção. A Figura 2.6 mostra os tipos de transferências metálicas citadas acima.

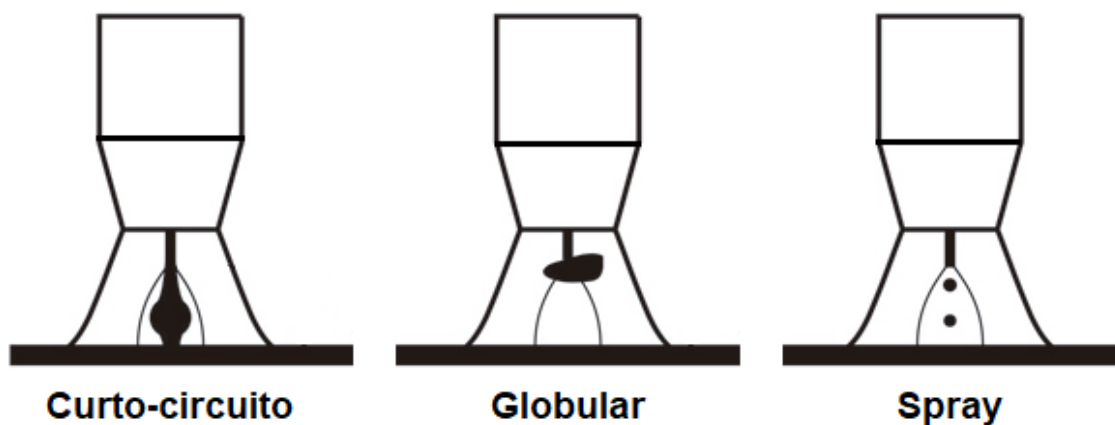


Figura 2.6 – Tipos de transferências metálicas

2.5.1 Transferência metálica por curto circuito

Na soldagem com transferência metálica do tipo curto circuito geralmente são utilizados arames de diâmetros na faixa de 0,8 a 1,2 mm, aplicados pequenos comprimentos de arco (baixas tensões) e baixas correntes de

soldagem. É obtida uma pequena poça de fusão de rápida solidificação. Essa técnica de soldagem é particularmente útil na união de materiais de pequena espessura em qualquer posição, materiais de grande espessura nas posições vertical e sobre cabeça, e no enchimento de largas aberturas. A soldagem por curto circuito também deve ser empregada quando se tem como requisito uma distorção mínima da peça (ESAB, 2005).

O metal é transferido do arame à poça de fusão apenas quando há contato entre os dois, ou a cada curto circuito. O arame entra em curto circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo. A Figura 2.7 ilustra um ciclo completo de curto circuito. Quando o arame toca a poça de fusão (A), a corrente começa a aumentar para uma corrente de curto circuito. Quando esse valor alto de corrente é atingido, o metal é transferido. O arco é então reaberto e, como o arame está sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue fundi-lo, o arco será eventualmente extinguido por outro curto (I). O ciclo recomeça e não há metal transferido durante o período de arco aberto, somente nos curtos circuitos (ESAB, 2005).

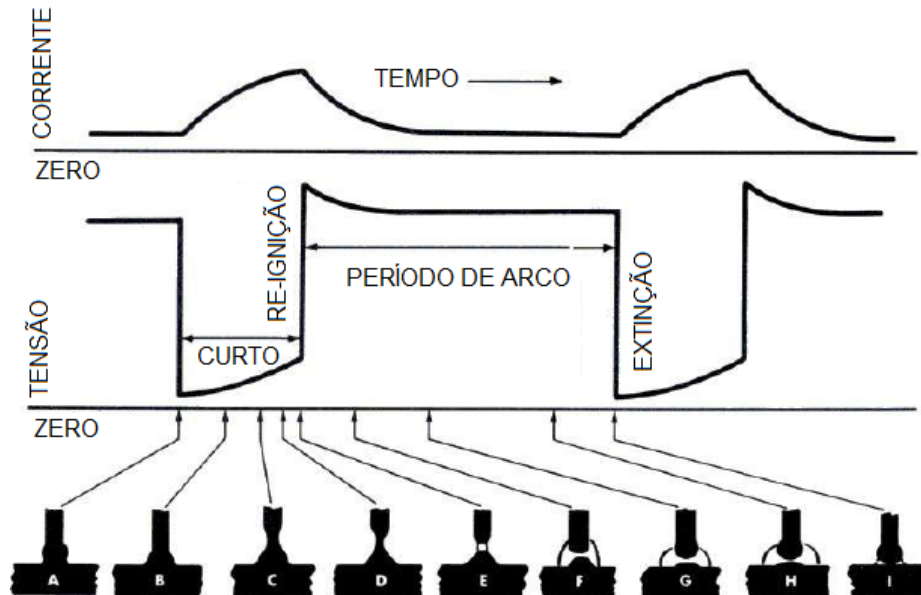


Figura 2.7 – Corrente e tensão x tempo para transferência metálica curto circuito. Fonte: ESAB (2005)

Para garantir uma boa estabilidade do arco na técnica do curto circuito, devem ser empregadas correntes de soldagem baixas. A Tabela 2.2 ilustra a

faixa de corrente ótima para a transferência do metal por curto circuito para vários diâmetros de arames. Essas faixas podem ser ampliadas dependendo do gás de proteção utilizado.

Tabela 2.2 – Recomendação de corrente média de soldagem para o modo de transferência metálica do tipo curto-circuito para alguns diâmetros de arames-eletrodo. Fonte: ESAB (2005)

Diâmetro do arame [mm]	Corrente de soldagem (A)	
	Mínima	Máxima
0,76	50	150
0,89	75	175
1,10	100	225

2.5.2 Transferência metálica do tipo globular

Quando a corrente e a tensão de soldagem são aumentadas para valores acima do recomendado para a soldagem por curto circuito, a transferência de metal começará a tomar um aspecto diferente. Essa técnica de soldagem é comumente conhecida como transferência globular, na qual o metal se transfere através do arco. Usualmente as gotas de metal fundido tem diâmetro maior que o do próprio arame. Esse modo de transferência pode ser errático, com respingos e curtos circuitos ocasionais (ESAB, 2005).

2.5.3 Transferência metálica do tipo goticular (spray)

Aumentando-se a corrente e a tensão de soldagem ainda mais, a transferência de metal torna-se um verdadeiro jato de minúsculas gotas, justificando o nome deste modo de transferência como goticular (spray). A corrente mínima à qual esse fenômeno ocorre é a chamada corrente de transição. A Tabela 2.3 mostra alguns valores típicos de corrente de transição para várias combinações de metais de adição e de gases de proteção.

A Figura 2.8 mostra a transferência fina e axial do arco em spray. As gotas que saem do arame são muito pequenas, proporcionando boa estabilidade ao arco. Curto circuitos são raros nesse tipo de soldagem e poucos respingos são associados com essa técnica (ESAB, 2005).

A soldagem com a transferência metálica do tipo goticular pode produzir altas taxas de deposição do metal de solda. Essa técnica de soldagem é geralmente empregada para unir materiais de espessura iguais ou maiores que 2,4 mm. Exceto na soldagem de alumínio ou cobre, o processo de arco em spray fica geralmente restrito apenas à soldagem na posição plana por causa da grande poça de fusão. No entanto, aços carbono podem ser soldados fora deposição usando essa técnica com uma poça de fusão pequena, geralmente com arames de diâmetros de 0,89 mm a 1,10 mm (ESAB, 2005).

Tabela 2.3 – Corrente mínima para soldagem com modo de transferência do tipo goticular. Fonte: ESAB (2005)

Material do arame eletrodo	Diâmetro do arame [mm]	Gás de proteção	Corrente de transição (A)
Aço carbono	0,89	98% Ar + 2% O ₂	165
	1,10		220
	1,30		240
Aço inoxidável	0,89	98% Ar + 2% O ₂	170
	1,10		225
	1,60		285
Alumínio	0,76	100% Ar	95
	1,19		135
	1,60		180
Cobre desoxidado	0,89	100% Ar	180
	1,10		210
	1,60		310
Bronze ao silício	0,89	100% Ar	165
	1,10		205
	1,60		270

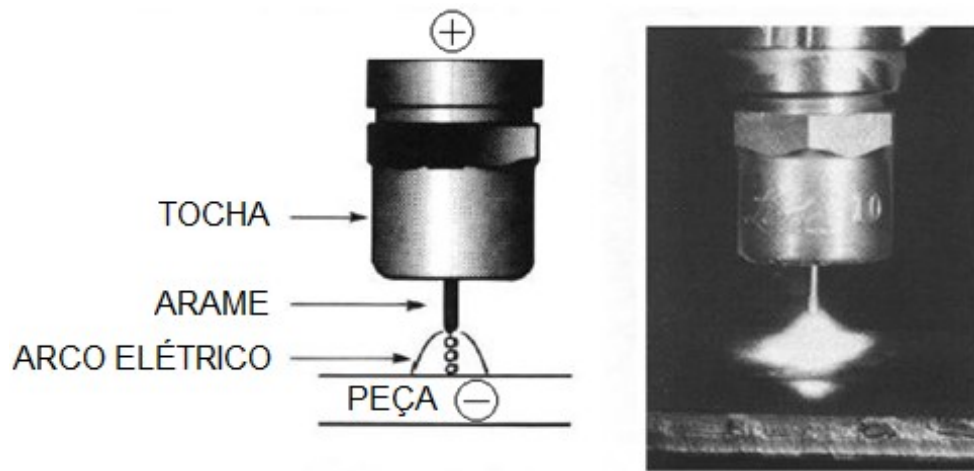


Figura 2.8 – Transferência metálica goticular (spray). Fonte: ESAB (2005)

3 ANÁLISE DA DINÂMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM

3.1 Análise da fusão do arame-eletrodo

A soldagem MIG/MAG usa arames eletrodos consumíveis, ou seja, ele se funde durante o processo e se torna o metal de adição. Sabe-se que arames eletrodos mais finos se caracterizam por taxas de fusão (medidas em g/min ou kg/h) mais altas comparados com arames mais grossos usados com a mesma corrente (CARY, 1979; AWS Welding Handbook, 1991; PALMAR, 1995; MACHADO, 1996). Infelizmente há uma grande confusão acerca de dados encontrados na literatura disponível sobre esse assunto.

A Figura 3.1 mostra que, para a mesma corrente (por exemplo, 150 A), a velocidade de alimentação do arame fino (0,9 mm) é quase duas vezes maior comparada com a do arame de 1,2 mm (6,5 m/min versus 3,5 m/min), o que é certo. Por outro lado, as taxas de fusão destes arames, medidas em kg/h, são muito próximas: 1,934 kg/h para o arame de 0,9 mm e 1,852 kg/h para o arame de 1,2 mm. O ganho na taxa de fusão e, conseqüentemente, na taxa de deposição do arame fino é apenas de 4,5%. Na Figura 3.2 Machado (1996) apresenta um acréscimo na taxa de fusão bem maior, cerca de 50% ao trocar um arame de 0,9 mm por um de 1,1 mm, o que é pouco provável.

Na Figura 3.3, Palmar (1995) mostra dados ainda mais impressionantes, relatando um aumento de cerca de 100% para o mesmo caso. E mais, os valores da taxa de fusão têm unidades de kg/min, o que absolutamente irreal. Os dados encontrados no livro do Cary (1979) parecem ser adequados (Figura 3.4). Em contrapartida, Wainer et al. (1992) relatam que, na utilização de dois eletrodos de diâmetros diferentes, submetidos as mesmas condições de soldagem, o de maior diâmetro dará maior taxa de deposição. Ou seja, infelizmente esse assunto ainda gera polemicas.

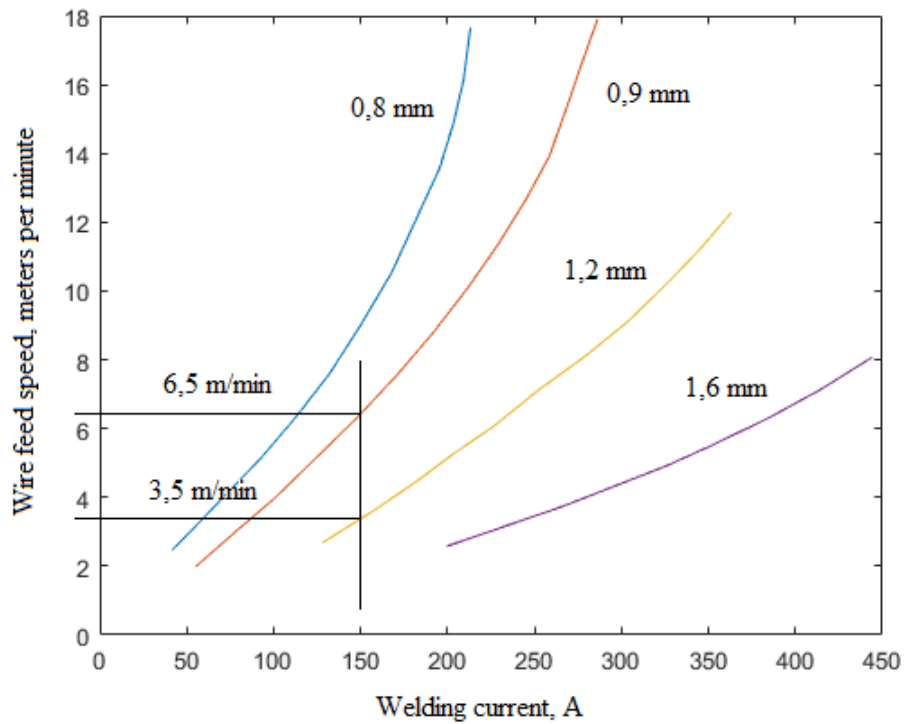


Figura 3.1 – Velocidade de alimentação em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Welding Handbook (1991)

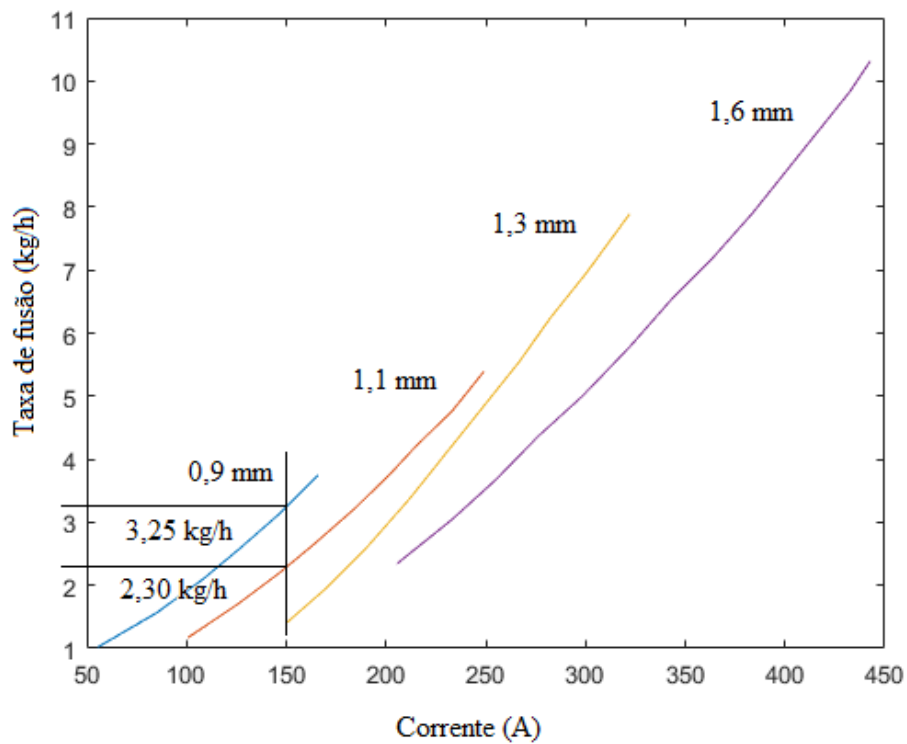


Figura 3.2 – Taxa de fusão (consumo) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Machado (1996)

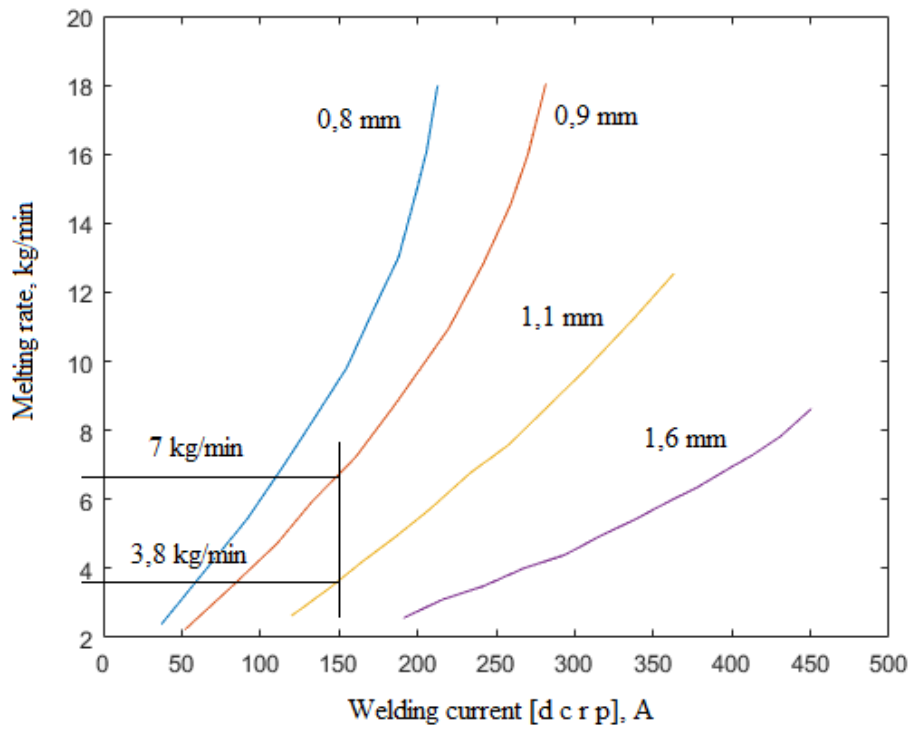


Figura 3.3 – Taxa de fusão (consumo) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Palmar (1995)

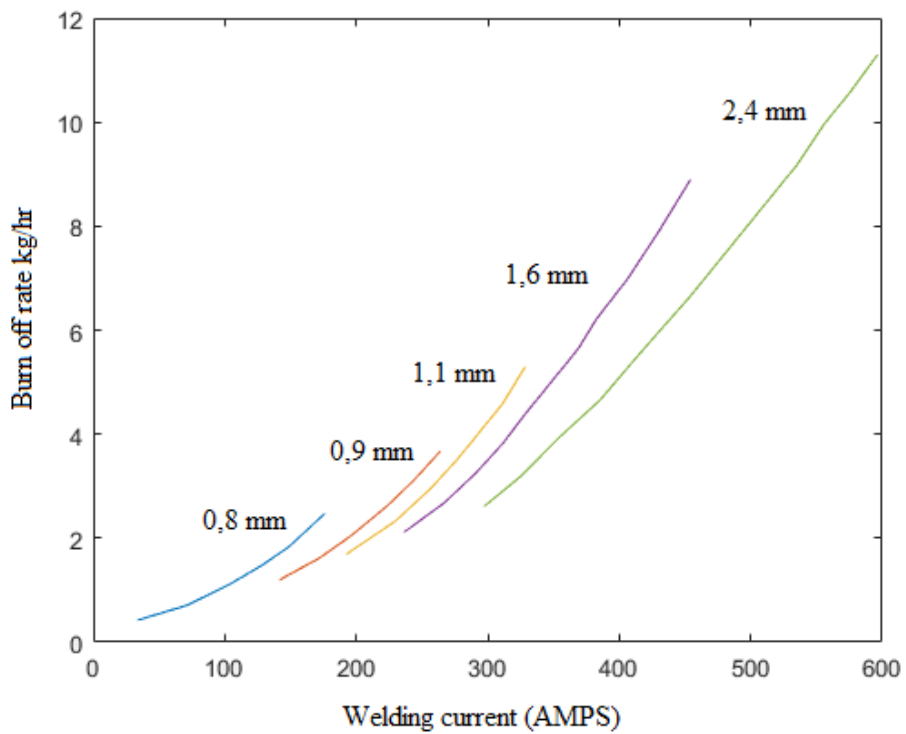


Figura 3.4 – Taxa de fusão (consumo) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Cary (1979)

3.2 Análise termodinâmica simplificada da fusão do eletrodo

De acordo com a literatura básica da Física, dois objetos feitos do mesmo material, como o aço por exemplo, possuem capacidades térmicas proporcionais a suas massas, pois eles têm uma constante, a saber calor específico, sendo a “capacidade térmica” por unidade de massa (HALLIDAY *et al.*, 2009).

Fundir um sólido significa fazê-lo passar do estado sólido para o estado líquido. O processo requer energia porque os átomos ou moléculas do sólido devem ser liberados de sua estrutura rígida. A fusão de um arame eletrodo e do metal de base para formar a poça de fusão requer uma quantidade de energia para fazer com que os átomos se adequem a estrutura do metal líquido.

A Equação (3.1) ilustra a relação entre a quantidade de calor absorvido ou retirado de um material (q) em função da massa (m), do calor específico (c) e da variação de temperatura (ΔT) do sistema analisado.

$$q = c m \Delta T = c m (T_f - T_i) \quad (3.1)$$

Quando a mudança é da fase sólida para a fase líquida (caso em que o arame eletrodo e o metal de base absorvem calor) ou da fase líquida para a sólida (caso em que liberam calor), o calor de transformação é chamado de calor de fusão. O que é importante observar é que, para um mesmo material, a quantidade de energia necessária para a mudança de fase é dependente apenas do calor específico, da massa e da variação de temperatura, como mostra a Equação (3.1) (HALLIDAY *et al.*, 2009).

Mas como explicar o fato de que arames finos apresentam taxas de fusão maiores de que arames mais espessos (medidas em g/min ou kg/h)? Para obter a resposta, deve-se analisar os dois fenômenos que ocorrem quando um arame de diâmetro maior for substituído por um de diâmetro menor: o aumento da densidade de corrente no arame-eletrodo e o aumento da relação área superficial sobre volume (A_s/V), que são parâmetros que auxiliam no entendimento da dinâmica do processo de fusão dos eletrodos.

3.3 Densidade de corrente versus diâmetro do arame-eletrodo

A corrente elétrica é definida como a quantidade de cargas elétricas que atravessa a seção transversal de um condutor por unidade de tempo. A Equação 3.2 ilustra de forma algébrica a definição de corrente elétrica.

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (3.2)$$

A corrente elétrica por unidade de área transversal define o módulo do vetor densidade de corrente (Equação 3.3).

$$J = \frac{i}{A} \quad (3.3)$$

A Tabela 3.1 ilustra os valores da densidade de corrente para arames de diâmetros de 1,2 a 0,6 mm para uma corrente de 150 A, tomada neste trabalho como corrente de referência.

Tabela 3.1 – Densidade de corrente para diferentes diâmetros de arame-eletrodo para uma corrente de 150 A

Diâmetro do arame [mm]	Densidade de corrente [A/mm²]
1,2	132,63
1,0	190,99
0,8	298,42
0,6	530,52

Através das informações presentes na Tabela 3.1, percebe-se que, quanto menor o diâmetro do arame-eletrodo, maior é o valor da densidade de corrente atuante. Isso faz com que o efeito Joule (responsável pelo aquecimento do eletrodo) favoreça o crescimento da taxa de fusão dos arames-eletrodos mais finos.

3.4 Análise da relação dos parâmetros geométricos A_s/V

Conforme descrito nas Seções anteriores, a quantidade de energia para fundir uma determinada quantidade de material não varia para uma mesma quantidade de matéria. Dessa forma, a energia necessária para fundir um arame de diâmetro igual a 1,2 mm deve ser a mesma para uma configuração composta por três arames de diâmetro aproximadamente igual a 0,7 mm, mas com mesma área de seção transversal.

Tomando como base o gráfico da Figura 3.1, onde tem-se um arame de diâmetro igual a 1,2 mm e outro com diâmetro igual a 0,9 mm, para uma corrente de 150 A, através da Equação (3.4), tem-se que:

$$\frac{S_{1,2}}{S_{0,9}} < \frac{V_{al}^{0,9}}{V_{al}^{1,2}} = \frac{V_f^{0,9}}{V_f^{1,2}}, \frac{1,13 \text{ mm}^2}{0,64 \text{ mm}^2} < \frac{6,5 \text{ m/min}}{3,5 \text{ m/min}}, 1,78 < 1,86 \quad (3.4)$$

O aumento da velocidade de alimentação, medida em m/min (que é proporcional a taxa de fusão, medida em g/min) dos arames mais finos (para a mesma corrente) pode ser explicado pelo aumento da densidade de corrente e, logo, intensificação do efeito Joule ao longo do eletrodo. Mas os cálculos mostram que, para a mesma corrente, a velocidade de alimentação (a taxa de fusão do arame) cresce mais do que a redução da seção transversal dele, conforme Equação (3.4).

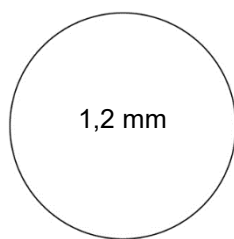
Logo, há mais um fator a ser levado em consideração quando se analisa a eficiência da fusão do metal de adição. Percebe-se que o metal de adição (energizado ou não) se funde mais rápido caso a razão entre a área superficial dele sobre o seu volume (A/V) for maior (do mesmo jeito que na fundição a parte do fundido com o valor do A/V mais alto se resfria mais rápido). Considerando o arame eletrodo como um cilindro, temos a relação da área superficial sobre o volume do arame expressa pela Equação (3.5).

$$\frac{A_s}{V} = \frac{2 \pi r h}{\pi r^2 h} = \frac{2}{r} \quad (3.5)$$

onde A_s é a área superficial do eletrodo, V é o volume, r é o raio do arame e h é o comprimento do cilindro.

Logo, quanto menor o diâmetro (raio), maior será a relação A_s/V . A Tabela 3.2 mostra a relação A_s/V para pedaços de arames eletrodos de diâmetros iguais a 0,6 mm, 0,8 mm, 1,0 mm e 1,2 mm, ambos com 1 mm de comprimento.

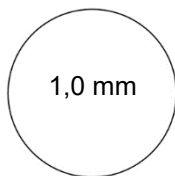
Tabela 3.2 – Relação A_s/V para arames-eletrodo de 0,6 a 1,2 mm



$$A_{S1,2} = \pi d_{1,2}h = 3,77 \text{ mm}^2$$

$$V_{1,2} = \frac{\pi d_{1,2}^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 1,2^2}{4} \times 1 = 1,13 \text{ mm}^3$$

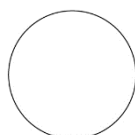
$$\frac{A_{S1,2}}{V_{1,2}} = \frac{3,77}{1,13} = \mathbf{3,33 \text{ mm}^{-1}}$$



$$A_{S1,0} = \pi d_{1,0}h = 3,14 \text{ mm}^2$$

$$V_{1,0} = \frac{\pi d_{1,0}^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 1,0^2}{4} \times 1 = 0,79 \text{ mm}^3$$

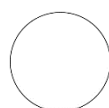
$$\frac{A_{S1,0}}{V_{1,0}} = \frac{3,14}{0,79} = \mathbf{4,00 \text{ mm}^{-1}}$$



$$A_{S0,8} = \pi d_{0,8}h = 2,51 \text{ mm}^2$$

$$V_{0,8} = \frac{\pi d_{0,8}^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 0,8^2}{4} \times 1 = 0,50 \text{ mm}^3$$

$$\frac{A_{S0,8}}{V_{0,8}} = \frac{2,51}{0,50} = \mathbf{5,00 \text{ mm}^{-1}}$$



$$A_{S0,6} = \pi d_{0,6}h = 1,88 \text{ mm}^2$$

$$V_{0,6} = \frac{\pi d_{0,6}^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 0,6^2}{4} \times 1 = 0,28 \text{ mm}^3$$

$$\frac{A_{S0,6}}{V_{0,6}} = \frac{1,88}{0,28} = \mathbf{6,67 \text{ mm}^{-1}}$$

Assim ao comparar o arame de 1,2 mm com o de 0,9 mm, tem-se o valor do A_s/V de 3,33 para o arame de 1,2 mm e de 4,44 para o arame de 0,9 mm. Ou

seja, o arame mais fino é caracterizado por maior área lateral para a mesma unidade de volume. Isto agiliza a absorção do calor e facilita a fusão do arame. O arame de 0,9 mm deve se fundir mais rápido (com uma dinâmica maior). Juntos, o aumento da densidade de corrente e o aumento do índice A_s/V contribuem no crescimento da taxa de fusão de arames mais finos. Mas resta descobrir qual destes dois fenômenos prevalece no aumento da taxa de fusão, o que é exatamente o objetivo deste trabalho.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais e equipamentos utilizados

Para a realização dos ensaios experimentais, foram utilizados os seguintes equipamentos do LAPROSOLDA (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Soldagem) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU):

- Fonte para soldagem MIG/MAG automática
- Bicos de contato de diâmetro igual a 1 mm
- Arames eletrodo de diâmetros nominais iguais a 1,0 mm e 0,6 mm
- Condicionador de sinal
- Placa de aquisição de sinais
- Gás de proteção com composição de 75% Ar + 25% CO₂
- Computador e softwares para tratamento dos sinais
- Bancada de soldagem
- EPIs (máscara de soldagem, luvas e avental)
- Alicates amperímetro
- Micrometro

4.2 Procedimento experimental

Na primeira etapa do projeto, estudou-se uma forma de utilizar três arames finos de diâmetro igual a 0,6 mm ao mesmo tempo durante a execução do cordão de solda. A alternativa mais viável encontrada foi a de embobinar os três arames em uma única bobina (Figura 4.1). Dessa forma, os mesmos seriam alimentados simultaneamente pelos roletes da máquina de soldagem, conforme ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.3.

Em seguida, realizou-se a soldagem em uma pequena chapa de aço utilizando o arame de diâmetro nominal igual a 1,0 mm. O diâmetro real do arame eletrodo, medido com o auxílio de um micrometro, foi de 0,98 mm, resultando em uma área de seção transversal igual a 0,75 mm².

Após a soldagem com o arame de 1,0 mm de diâmetro, realizou-se a soldagem com a configuração composta pelos três arames. Os diâmetros reais medidos para cada um dos arames foram iguais a 0,6 mm, 0,61 mm e 0,56 mm. A soma das áreas das seções transversais dos três arames é igual a 0,82 mm².

Para ambos os testes foram coletadas as informações de tensão e corrente (velocidade de alimentação) e a distância do bico de contato até a peça (DBCP) foi mantida igual a 12 mm, conforme ilustrado na Figura 4.3 (a). A Figura 4.3 (b) mostra três arames com gota fundida na ponta.



Figura 4.1 – Confeção de bobina com três arames finos enrolados simultaneamente



Figura 4.2 – Configuração com três arames de diâmetro nominal igual a 0,6 mm passando pelos roletes da máquina de soldagem

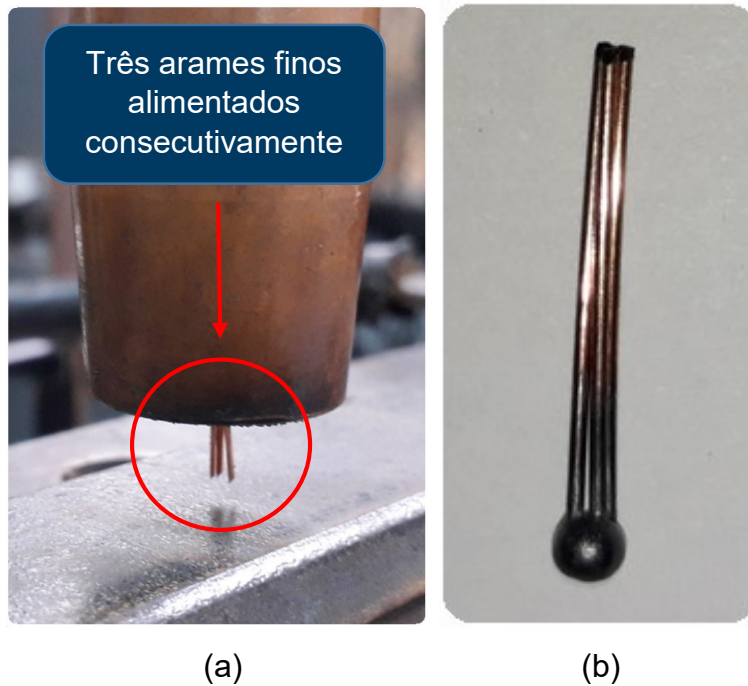


Figura 4.3 – (a) Tocha de soldagem do processo MIG/MAG com alimentação de três arames consecutivamente e (b) três arames com gota fundida na ponta

O objetivo foi comparar os resultados obtidos nas duas situações. Dessa forma, as áreas das seções transversais foram parecidas, ou seja, a densidade de corrente foi quase a mesma, mas a relação A_s/V para cada uma delas foi diferente. A Tabela 4.1 mostra os valores da área da seção transversal, da relação A_s/V e da densidade de corrente para as duas configurações utilizadas nos experimentos (para uma corrente de 150 A e comprimento de 1,0 mm).

Tabela 4.1 – Valores da área da seção transversal, relação A_s/V e densidade de corrente para o arame de $\varnothing = 1,0$ mm e para a três arames de $\varnothing = 0,6$ mm

Arame com $\varnothing = 1,0$ mm	Três arames com $\varnothing = 0,6$ mm
$A_{1,0} = 0,79 \text{ mm}^2$	$A_{0,6} = 0,85 \text{ mm}^2$
$A_{s1,0} = 3,14 \text{ mm}^2$	$A_{s0,6} = 5,65 \text{ mm}^2$
$V_{1,0} = 0,79 \text{ mm}^3$	$V_{0,6} = 0,85 \text{ mm}^3$
$\frac{A_{s1,0}}{V_{1,0}} = 4,00 \text{ mm}^{-1}$	$\frac{A_{s0,6}}{V_{0,6}} = 6,67 \text{ mm}^{-1}$
$J_{1,0} = 190,99 \text{ A/mm}^2$	$J_{0,6} = 176,84 \text{ A/mm}^2$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 5.1 mostram os resultados obtidos nos testes realizados com o arame de diâmetro igual a 1,0 mm. O primeiro teste foi com o arame de 1,0 mm, no qual tentou-se chegar a uma corrente de soldagem de 150 A. A corrente real foi de 164,9 A com a velocidade de alimentação de 6,0 m/min.

Tabela 5.1 – Dados experimentais obtidos para o arame-eletrodo de diâmetro igual a $\varnothing = 1,0$ mm e velocidade de alimentação igual a 6,0 m/min.

Tensão média (V)	Corrente média (A)	Velocidade de alimentação (m/min)
19,9	164,9	6,0

A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos no teste realizado com a configuração composta pelos três arames de diâmetro igual a 0,6 mm, mantendo a mesma velocidade de alimentação de 6,0 m/min.

Tabela 5.2 – Dados experimentais obtidos para os três arames-eletrodo de diâmetro igual $\varnothing = 0,6$ mm e velocidade de alimentação igual a 6,0 m/min

Tensão média (V)	Corrente média (A)	Velocidade de alimentação (m/min)
19,8	178,2	6,0

A Figura 5.1 mostra os cordões de solda realizados para cada um dos experimentos citados acima. As Figuras de 5.2 a 5.5 ilustram os gráficos de tensão e corrente em função do tempo para cada um dos testes realizados.

Há um ponto que deve ser ressaltado é que, durante a alimentação do conjunto de três arames, foi observado que, as vezes (especialmente quando o aperto dos roletes do alimentador não foi firme o bastante) um arame de três parava de ser alimentado (atrasava-se na propulsão). Este fato pode ser explicado, que a força de atrito entre o revestimento cobreado dos arames foi

mais baixa do que entre o arame e o condute, prejudicando a alimentação simultânea de todos três arames durante a soldagem.

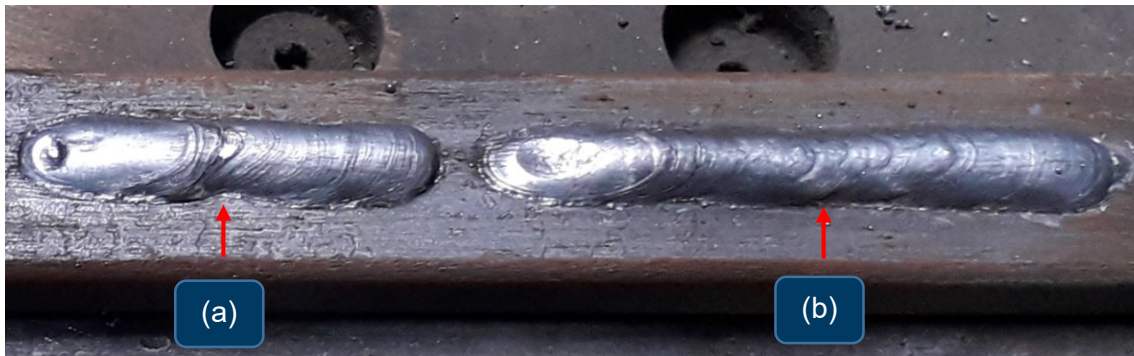


Figura 5.1 – Testes de soldagem realizados onde (a) é o cordão de solda feito com o arame de diâmetro $\varnothing = 1,0$ mm e (b) é o cordão feito com os três arames de diâmetro $\varnothing = 0,6$ mm

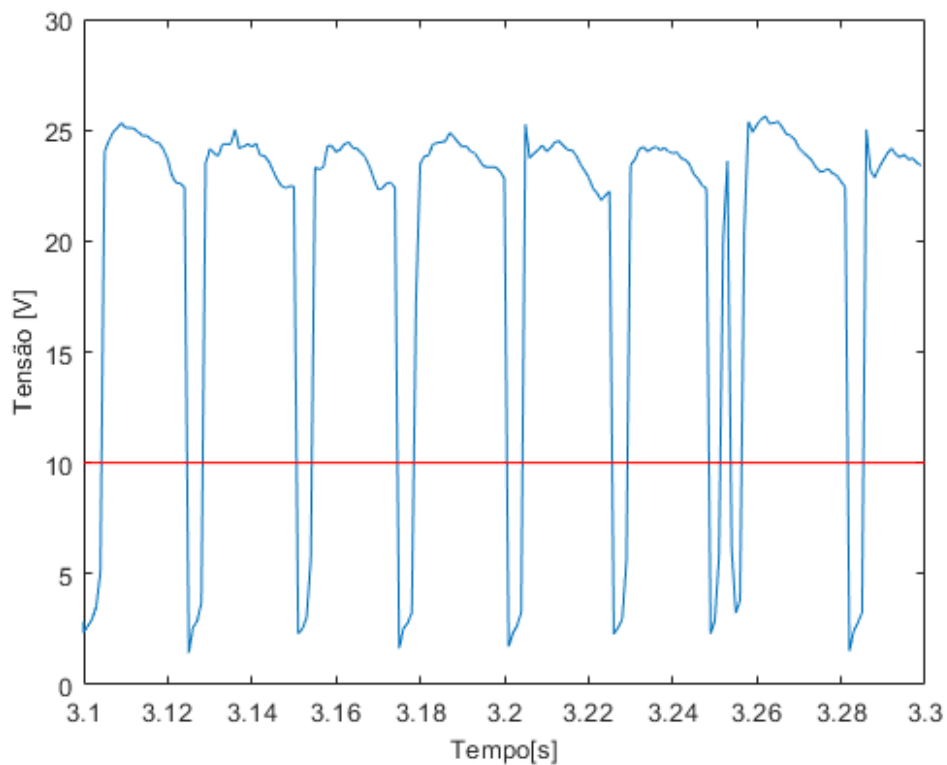


Figura 5.2 – Gráfico de tensão x tempo para o arame eletrodo de $\varnothing = 1,0$ mm

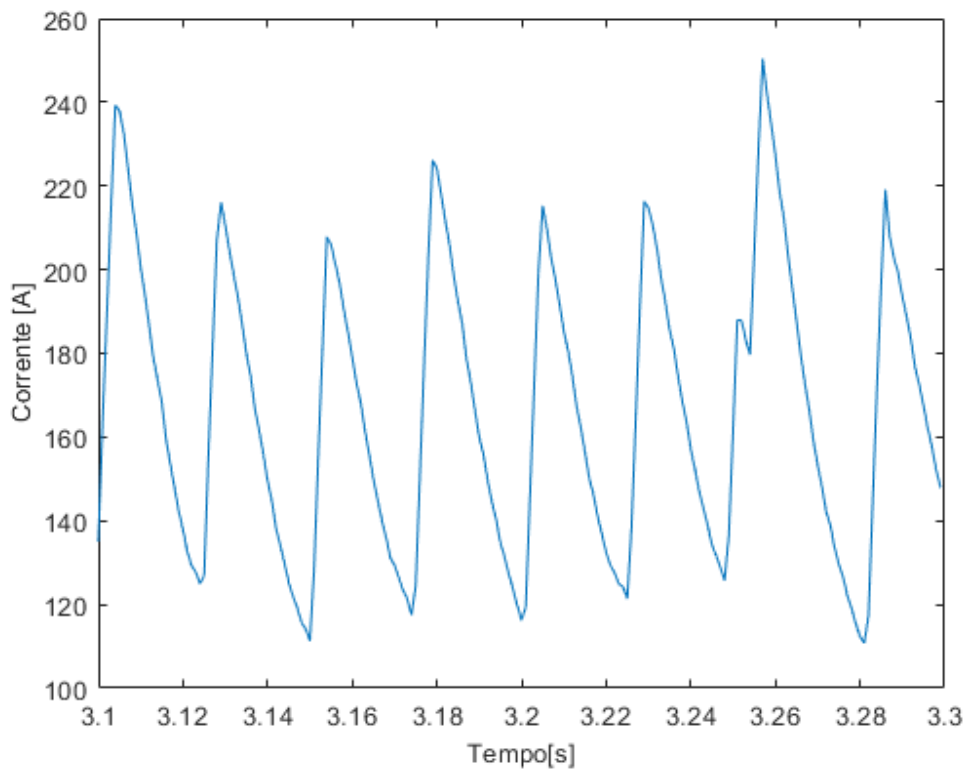


Figura 5.3 – Gráfico de corrente x tempo para o arame eletrodo de $\varnothing = 1,0$ mm

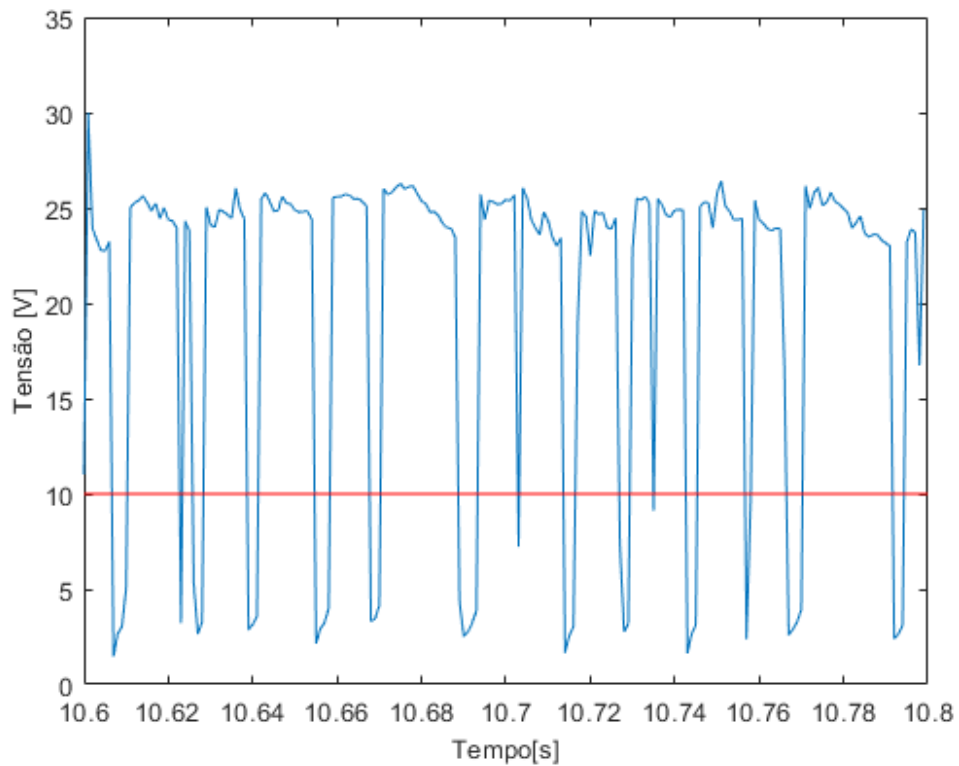


Figura 5.4 – Gráfico de tensão x tempo para os três arames de $\varnothing = 0,6$ mm

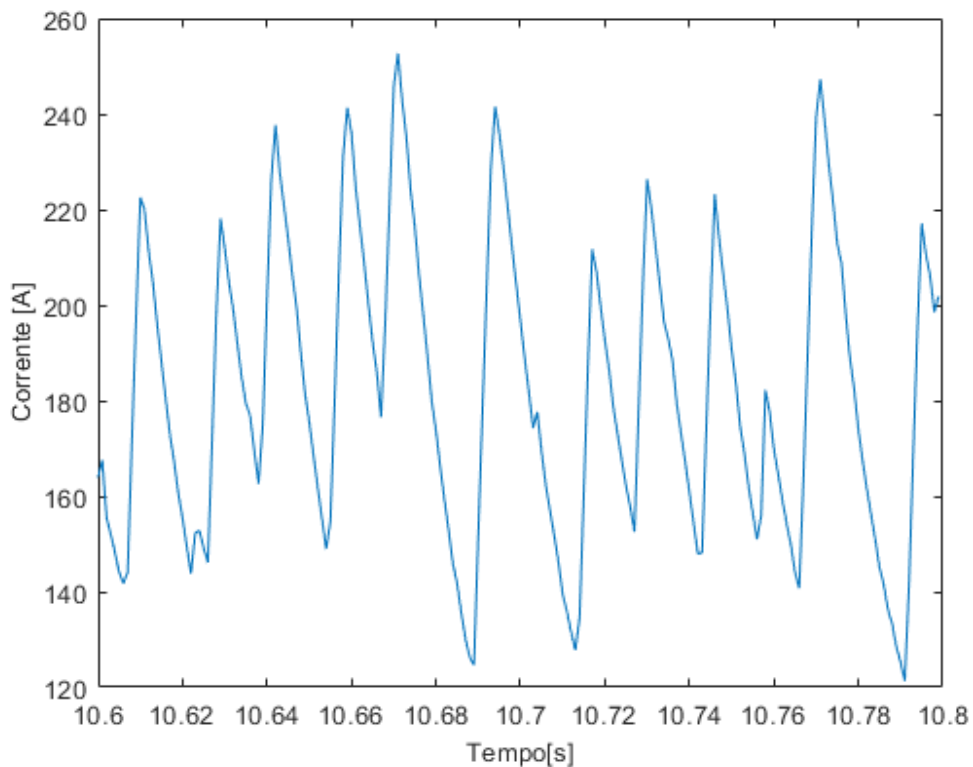


Figura 5.5 – Gráfico de corrente x tempo para os três arames de $\varnothing = 0,6$ mm

É possível observar que os gráficos mostrados são bem similares. Ainda, o comportamento do processo com três arames finos alimentados juntos a soldagem com o modo de transferência do tipo curto circuito foi um pouco menos estável que a soldagem realizada com o arame de 1,0 mm de diâmetro.

Em relação à análise dos resultados obtidos, tem-se que a corrente média de soldagem para o arame $\varnothing = 1,0$ mm foi de 164,9 A, enquanto que para os três arames foi de 178,2 A, conforme as Tabelas 4 e 5. As áreas da seção transversal das duas configurações são $A_{1,0} = 0,75$ mm² e $A_{3 \times 0,6} = 0,82$ mm². O aumento percentual de área entre as configurações é dado pela Equação (5.1).

$$\left(\frac{A_{1,0}}{A_{3 \times 0,6}} - 1 \right) \times 100\% = \left(\frac{0,75}{0,82} - 1 \right) \times 100\% = 8,16\% \quad (5.1)$$

O aumento percentual de corrente entre os dois testes comparados é dado pela Equação (5.2).

$$\left(\frac{I_{1,0}}{I_{3 \times 0,6}} - 1 \right) \times 100\% = \left(\frac{164,9}{178,2} - 1 \right) \times 100\% = 7,46\% \quad (5.2)$$

De acordo com as Equações (5.1) e (5.2), percebe-se que houve um pequeno ganho, pois, a área da seção transversal (volume do metal fundido e depositado) cresceu mais do que a corrente, ou seja, utilizou-se menos energia para fundir uma quantidade maior de material. Em outras palavras, ao aumentar o fator A_s/V de $4,00 \text{ mm}^{-1}$ (do arame de 1,0 mm) para $6,67 \text{ mm}^{-1}$ (do arame de 0,6 mm), como mostrado na Tabela 3.2, o aumento da taxa de fusão foi apenas de 0,7%. Dessa forma, pode-se afirmar que ocorre aproximadamente 0,2% de acréscimo na taxa de fusão para cada 0,1 mm da redução do diâmetro do arame.

O ganho obtido no experimento é muito baixo quando comparado com o ganho obtido pelo acréscimo da densidade de corrente. Foi mostrado que a redução do diâmetro do arame de 1,2 mm para 0,9 mm acarretou um acréscimo da taxa de fusão em 4,5% (ver Seção 3.1), ou seja, pode-se afirmar que ocorre aproximadamente 1,5% de acréscimo na taxa de fusão para cada 0,1 mm da redução do diâmetro do arame. Vale ressaltar que neste último caso foram atuantes os dois fenômenos, tanto o aumento da densidade de corrente, quanto o aumento do fator A_s/V (já sabendo que a contribuição deste último é desprezível).

Considerando os valores citados acima (1,5% de acréscimo na taxa de fusão para a densidade de corrente e 0,2% de acréscimo para a relação A_s/V , ambos para 0,1 mm de redução de arame), apenas para fins comparativos, as Figuras 5.6 a 5.9 mostram a contribuição dada pela densidade de corrente no arame-eletrodo e pelo aumento da relação A_s/V respectivamente (obs.: a Figura 5.6 é idêntica à Figura 3.4). É possível perceber através destas figuras que a inclinação da reta referente a densidade de corrente é maior do que a do fator A_s/V . Logo, esta visualização destaca melhor que o fator do aumento da densidade de corrente no crescimento da taxa de deposição é mais pronunciado do que o fator A_s/V .

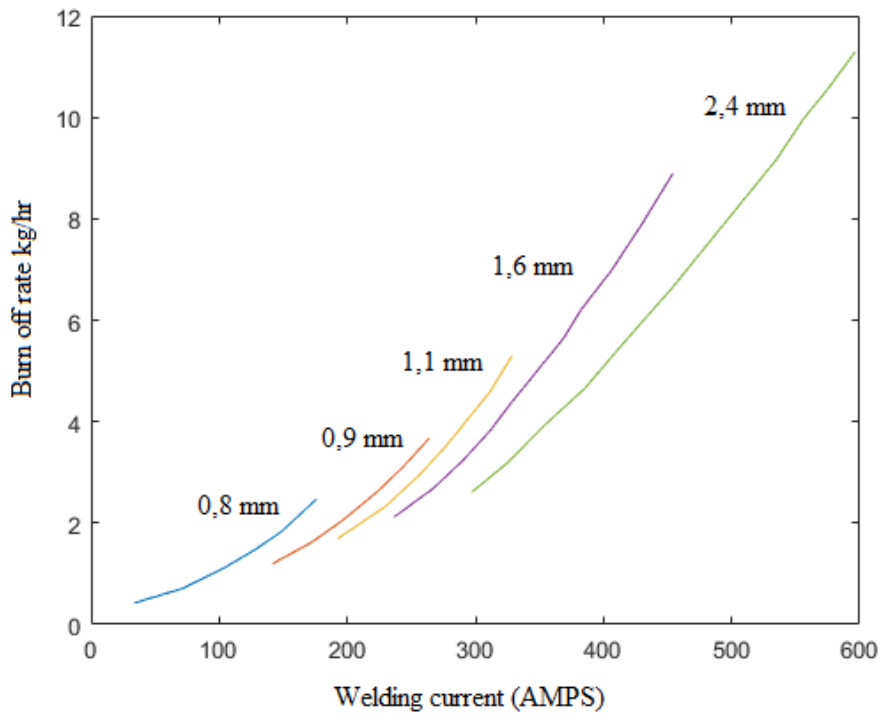


Figura 5.6 – Taxa de fusão (kg/h) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Cary (1979)

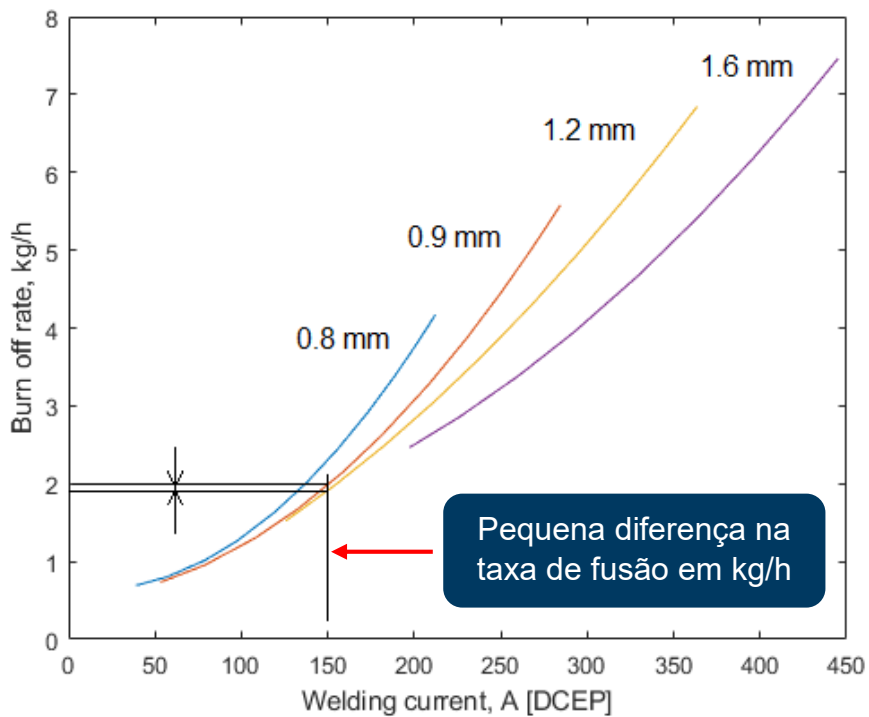


Figura 5.7 – Taxa de fusão (kg/h) em função da corrente e do diâmetro do arame. Fonte: Adaptado de Welding Handbook (1991)

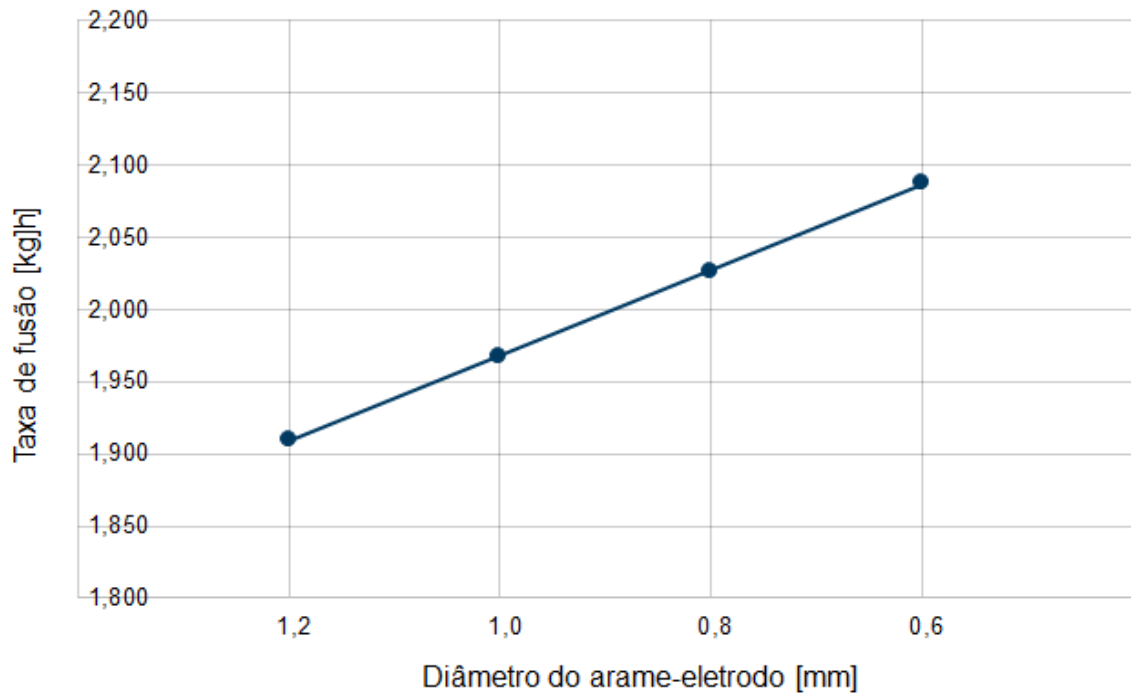


Figura 5.8 – Influência da densidade de corrente na taxa de fusão (kg/h) para diferentes diâmetros de arame-eletrodo

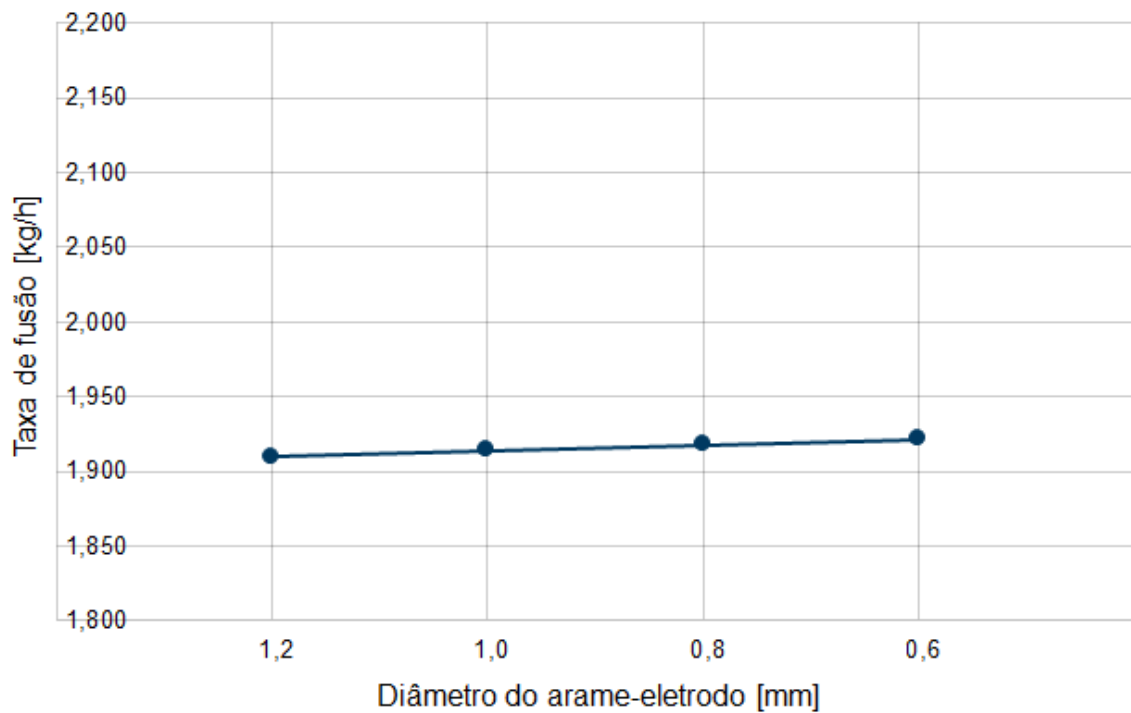


Figura 5.9 – Influência da relação A_s/V na taxa de fusão (kg/h) para diferentes diâmetros de arame-eletrodo

6 CONCLUSÕES

Considerando o objetivo de avaliar a influência do diâmetro de arames-eletrodo na taxa de deposição do processo MIG/MAG, neste trabalho tem-se como principais conclusões:

- A influência da densidade de corrente é mais pronunciada do que a do fator A_s/V no acréscimo da taxa de fusão de arames-eletrodo, como pode ser visto na Seção 5.
- Durante a alimentação do conjunto de três arames, foi observado que, as vezes um destes arames parava de ser alimentado, ou seja, atrasava-se na propulsão. Isso ocorreu porque a força de atrito entre o revestimento cobreado dos arames foi mais baixa do que entre o arame e o condute. Uma solução para o problema é trançar os arames, evitando com que os arames do conjunto tenham liberdade de se movimentarem da forma descrita.
- O comportamento dos três arames finos alimentados durante a soldagem com o modo de transferência do tipo curto circuito foi um pouco menos estável que a soldagem realizada com o arame de 1,0 mm de diâmetro (Figuras 5.2 a 5.5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARY, H.B. Modern Welding Technology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 1979, p. 154.

ESAB. Apostila de soldagem MIG/MAG. Revisada em 25 de janeiro de 2005.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fundamentos de Física Vol. 2 – Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 8ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

MACHADO, I.G. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos. Ed. Pelo autor e distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Porto Alegre, 1996, p. 210.

MARQUES, P. V. MODENESI, P. J. BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e tecnologia. 2ª edição revista e ampliada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

MODENESI, P. J. MARQUES, P. V. SANTOS, D. B. Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte, 2012.

PALMAR R.S., Welding Processes and Technology. Khanna Publishers, Delhi, 1995, p. 256.

SCOTTI, A. PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

WAINER, E. BRANDI, S. D. MELLO, F. D. de. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1992.

WELDING HANDBOOK, vol. 1, Eighth Ed. American Welding Society, Miami, 1991, p. 117.