

LUCAS MARIANI PETRACHI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE O BICO DE
CONTATO E A PEÇA NA TAXA DE FUSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM
MIG/MAG**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2021

LUCAS MARIANI PETRACHI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE O BICO DE
CONTATO E A PEÇA NA TAXA DE FUSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM
MIG/MAG**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

UBERLÂNDIA – MG

2021

LUCAS MARIANI PETRACHI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE O BICO DE
CONTATO E A PEÇA NA TAXA DE FUSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM
MIG/MAG**

Banca examinadora:

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov
Universidade Federal de Uberlândia

Profa. Dra. Anna Tokar
UNIGRAN, Dourados, MS

Prof. Dr. Leandro João da Silva
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

Ao Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov pelo incentivo e orientação na realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus pais, irmãos, namorada e amigos pelo apoio fundamental durante a graduação.

PETRACHI, L. M. **Avaliação da influência da distância entre o bico de contato e a peça na taxa de fusão no processo de soldagem MIG/MAG.** 2021. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

O objetivo principal desse trabalho foi avaliar a influência da distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) na taxa de fusão do arame eletrodo no processo de soldagem MIG/MAG, e para isso, foi comparado o impacto da variação da DBCP na taxa de fusão para três arames-eletrodos de diferentes diâmetros. Com este objetivo, em testes realizados para cada diâmetro de arames, a ideia foi manter constantes os parâmetros de soldagem (a tensão do arco e a corrente de soldagem), variando apenas a DBCP, para que seja possível observar o impacto dela na taxa de fusão de cada arame sem interferência da variação dos demais parâmetros de soldagem. Os resultados mostraram um acréscimo significativo da taxa de fusão para cada milímetro adicionado na DBCP. Além disso, foi observado que esse comportamento, aumento da taxa de fusão com aumento da DBCP, muda de acordo com o diâmetro do arame-eletrodo, devido a influência do efeito Joule no arame variar de acordo com o diâmetro dele. Obteve-se uma taxa máxima de 3,33% de acréscimo na taxa de fusão por milímetro adicionado na DBCP, para o arame-eletrodo de diâmetro nominal de 0,9 mm, o mais fino de todos os arames testados. Com isso, consegue-se uma maior taxa de fusão (maior eficiência) utilizando a mesma quantidade de energia.

Palavras-chave: MIG/MAG. Taxa de fusão. Distância entre bico de contato e peça.

PETRACHI, L. M. **Evaluation of the influence of the contact tip to workpiece distance on the melting rate in the MIG/MAG welding process.** 2021. 39 p. Final Paper, Federal University of Uberlandia.

ABSTRACT

The main objective of this work was to evaluate the influence of the contact tip to workpiece distance (CTWD) on the melting rate of the electrode wire in the MIG/MAG welding process. With this objective, the impact of the CTWD variation on the fusion rate for three electrode wires of different diameters was compared. In order to make such a comparison, the idea was to keep the welding parameters constant (the arc voltage and the welding current) when carrying out the tests for each wire diameter, varying only the CTWD, so that it was possible to observe its impact on the melting rate of each wire without interference from possible variations of other welding parameters. The results showed a quite significant increase in the melting rate for each millimetre added to the CTWD. In addition, it was observed that this behaviour, an increase in the wire fusion rate with an increase in DBCP, changes according to the diameter of the electrode wire, due to the influence of the Joule effect on the wire varies according to its diameter. A maximum rate of 3.33% of increase in the wire melting rate per millimetre added to the CTWD was obtained for the electrode wire with a nominal diameter of 0.9 mm, the thinnest of all tested wires. As a result, a higher melting rate (greater efficiency) is achieved using the same amount of energy.

Key-words: MIG/MAG welding. Melting rate. Contact tip to work distance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes do processo MIG/MAG. Fonte: Material didático a disciplina de Fundição e Soldagem do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov.	12
Figura 2: Componentes de uma tocha para soldagem MIG/MAG. Fonte: Apostila Soldagem MIG/MAG ESAB: 2005.	14
Figura 3: Exemplo da Característica Estática da Fonte de Tensão Constante. Fonte: Material Didático Prof. Valtair Antônio Ferraresi.....	15
Figura 4: Processo de soldagem com eletrodo revestido. Fonte: ESAB.	18
Figura 5: Processo de soldagem TIG. Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012)...	19
Figura 6: Velocidade de fusão para arames de 0,8 e 1,2 mm Fonte: Cary (1994). ...	22
Figura 7: Distância bico de contato peça (DBCP). Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012).	23
Figura 8: Relação entre a produtividade e o custo da soldagem. Fonte: ESAB.	25
Figura 9: Taxa de deposição para diferentes processos de soldagem. Fonte: ESAB.	26
Figura 10: Fonte, mesa e tocha de soldagem utilizados para os testes.	29
Figura 11: Placa de aquisição utilizada para coletar dados de corrente e tensão.	30
Figura 12: Taxa de fusão versus DBCP.	34
Figura 13: Taxa de fusão versus DBCP para todos os arames testados.	35
Figura 14: Energia gasta para fundir 1 kg de arame-eletrodo versus DBCP.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e limitações do processo de soldagem MIG/MAG.....	13
Tabela 2: Vantagens e limitações da soldagem com eletrodo revestido.....	18
Tabela 3: Vantagens e limitações da soldagem TIG.....	20
Tabela 4: Objetivos e dicas para maximizar a produtividade. Fonte: ESAB.....	27
Tabela 5: Diâmetro nominal, diâmetro real e peso específico dos arames.....	28
Tabela 6: Valores da DBCP nos testes realizados.....	29
Tabela 7: Dados experimentais obtidos para o arame de diâmetro nominal igual a 0,9 mm.....	31
Tabela 8: Dados experimentais obtidos para o arame de diâmetro nominal igual a 1,0 mm.....	31
Tabela 9: Dados experimentais obtidos para o arame de diâmetro nominal igual a 1,2 mm.....	32
Tabela 10: Velocidade real de soldagem para cada teste realizado.....	32
Tabela 11: Taxa de fusão calculada para cada experimento.....	33
Tabela 12: Influência percentual do acréscimo da DBCP na taxa de fusão.....	33
Tabela 13: Acréscimo da taxa de fusão por milímetro adicionado na DBCP.....	33
Tabela 14: Energia gasta para fundir 1 kg de arame-eletrodo versus DBCP.....	35

LISTA DE SIMBOLOS

AWS	American Welding Society
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CO ₂	Dióxido de carbono
d	Diâmetro do arame
DBCP	Distância entre o bico de contato e a peça
ER	Soldagem por Eletrodo Revestido
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
i	Corrente elétrica
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MMA	Manual Metal Arc (Welding), (soldagem ER)
N ₂	Gás Nitrogênio
O ₂	Gás Oxigênio
s	Comprimento livre do eletrodo
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (soldagem ER)
TIG	Tungsten Inert Gas
V	Velocidade de fusão do arame eletrodo (consumo), em m/min
V _f	Taxa de fusão, em kg/h
α	Coeficiente de aquecimento do eletrodo pelo arco
β	Coeficiente de aquecimento do eletrodo por efeito Joule
π	Número pi
ρ	Densidade do material de arame

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE SIMBOLOS	8
SUMÁRIO	9
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. Definição de soldagem	11
2.2. Soldagem MIG/MAG	11
2.3. Componentes do equipamento	13
2.4. Variáveis do processo	15
2.4.1. Gás de proteção	16
2.4.2. Distância entre bico de contato e peça (DBCP)	16
2.5. Viabilidade do processo	17
2.5.1. Soldagem com eletrodo revestido	17
2.5.2. TIG (<i>Tungsten Inert Gas</i>)	19
3. ANÁLISE DO PROCESSO	20
3.1. Velocidade de alimentação e taxa de fusão do arame eletrodo	20
3.2. Extensão livre do eletrodo e distância bico de contato - peça (DBCP)	23
3.3. Produtividade e taxa de deposição	24
4. METODOLOGIA	27
4.1. Materiais e equipamentos utilizados	27
4.2. Procedimento experimental	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
6. CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

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

A soldagem é um processo que permite a união permanente de materiais e tem uma grande importância nos mais diversos setores produtivos. Isso deve-se a sua larga gama de aplicações e ao custo ser barato quando se compara com outros processos de união de materiais.

Dentre os processos de soldagem o MIG/MAG tem se destacado como o de maior ascensão no ambiente industrial, devido a sua alta produtividade e qualidade dos cordões de solda. Para este processo o modo de transferência metálica mais utilizada é por curto-circuito pois produz uma poça de fusão pequena de rápido resfriamento, sendo por isso, adequada para chapas finas, soldagem fora de posição e passes de raiz de acordo com Scotti e Ponomarev (2014). Mas este processo de soldagem é muito sensível a quaisquer variações de seus parâmetros (tensão do arco, corrente de soldagem, ângulos de inclinação da tocha, indutância do circuito de soldagem, diâmetro de arame eletrodo, a distância entre bico de contato e peça - DBCP, e outros).

O objetivo principal desse trabalho é avaliar de maneira quantitativa a influência da DBCP na taxa de fusão de arame eletrodo de diferentes diâmetros. Foi determinado que a análise seria em função da DBCP por ser um parâmetro físico e de simples variação, além de não exigir grandes alterações no processo, o que promove uma modificação sem custo adicional. Além disso, não é encontrado na literatura muitos dados quantitativos acerca da influência da DBCP no processo de soldagem MIG/MAG.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição de soldagem

Existem inúmeras definições de soldagem, porém é comum definir esse processo como a união metálica de forma permanente por meio da aplicação de alta energia. A AWS (*American Welding Society*) define soldagem como a 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.

Em Metalurgia da Soldagem, de Modeseni; Marques; Santos (2012), é dito que soldagem não é apenas um processo de união de duas peças metálicas. Alguns processos de soldagem buscam a deposição de material na superfície de determinada peça com o objetivo de reparar algum defeito ou formar um revestimento superficial com características específicas. Existem também processos de soldagem que são utilizados para o corte de peças metálicas.

De forma geral, o processo de soldagem não necessariamente busca unir duas ou mais peças metálicas, porém, se esse for o objetivo, é importante que seja feito de forma a garantir que haja, na região da solda, o menor impacto possível nas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas do material.

2.2. Soldagem MIG/MAG

Soldagem MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*) também conhecida como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), é um processo que utiliza do arco elétrico com proteção gasosa para fazer a deposição do metal de adição em forma de arame. Segundo Machado (1996), esse processo de soldagem se baseia na formação do arco elétrico entre peça e um eletrodo maciço nu consumível, continuamente alimentado. O arco é protegido pelo gás utilizado, que pode ser inerte ou ativo, e este funde o arame em direção a peça. A Figura 1 exemplifica os principais componentes para o processo de soldagem MIG/MAG.

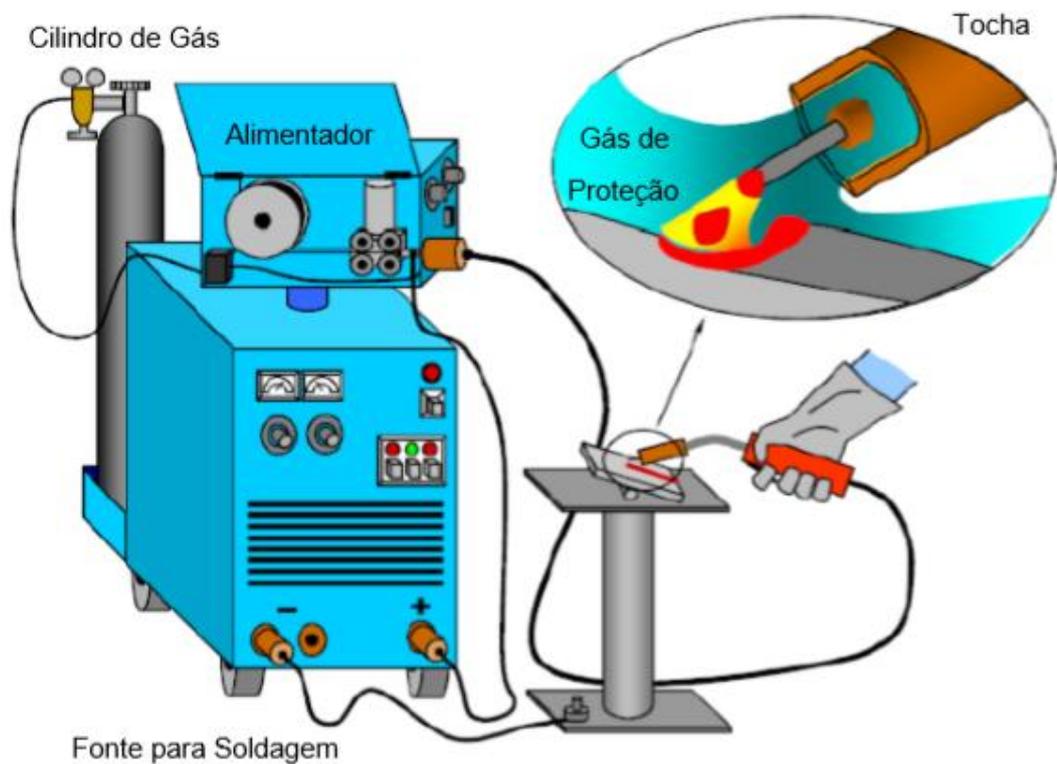


Figura 1: Componentes do processo MIG/MAG. Fonte: Material didático a disciplina de Fundição e Soldagem do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov.

O processo MIG/MAG proporciona, variando de acordo com a escolha de equipamento, arame eletrodo e gás de proteção, uma solda de alta qualidade e a baixo custo. Além disso, por ser um processo capaz para soldar em todas as posições, sua automatização é viável e usual, contando que os parâmetros de soldagem sejam escolhidos de forma correta.

Como todos os processos de soldagem, o MIG/MAG possui suas vantagens e desvantagens. Algumas vantagens e limitações do processo MIG/MAG estão representadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Vantagens e limitações do processo de soldagem MIG/MAG.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Elevada taxa de deposição; • Operado de forma automática ou semiautomática; • A soldagem pode ser realizada em todas as posições; • Possibilidade de soldar com diferentes combinações de parâmetros de soldagem resultando em soldas completamente diferentes; • Pode ser aplicado a uma grande variedade de metais; • Processo de fácil domínio prático, e rápido aprendizado; • Resulta em baixa produção de escórias (limpeza rápida e simples). 	<ul style="list-style-type: none"> • Os equipamentos são mais complexos, caros e menos portáteis de que no processo eletrodo revestido (por exemplo); • A soldagem deve ser realizada em ambientes protegidos contra fluxos de ar, devido ao risco de a proteção gasosa ser removida (o que pode impactar na solda); • Dificuldade de solda em locais de difícil acesso; • Altos níveis de calor e iluminação irradiados; • Ação metalúrgica limitada.

2.3. Componentes do equipamento

O conjunto de componentes do equipamento para soldar com o processo MIG/MAG é composto basicamente por uma fonte de energia, um alimentador de arame e uma tocha de soldagem.

O alimentador de arame é o componente responsável por impulsionar o arame consumível em direção à tocha por meio de roletes propulsores. É muito importante que a alimentação do arame eletrodo seja constante, para garantir melhor qualidade da solda.

A tocha tem a função de direcionar o arame e o gás de proteção em direção à poça de fusão na peça. Como esse componente fica muito próximo tanto do arco

elétrico quanto da poça de fusão, é necessário que haja refrigeração, que pode ser por meio do próprio gás de proteção ou da água.

O bico de contato é fabricado de cobre puro ou ligas de cobre, e é utilizado para conduzir a energia de soldagem até o arame e dirigir o arame até a poça de fusão. O diâmetro interno do bico de contato é um parâmetro muito importante desse componente, pois o arame deve ser alimentado facilmente e ter um bom contato elétrico. Um contato seguro entre o bico e o arame eletrodo é indispensável para uma boa estabilidade no processo MIG/MAG. A tocha e o bico de contato são ligados a fonte por meio do cabo de solda. A Figura 2 mostra os componentes de uma típica tocha para MIG/MAG.

Os arames eletrodos são disponíveis em vários diâmetros e matérias diferentes, 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.

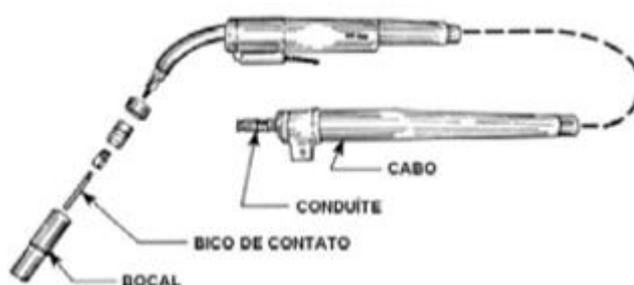


Figura 2: Componentes de uma tocha para soldagem MIG/MAG. Fonte: Apostila Soldagem MIG/MAG ESAB: 2005.

A fonte de energia comumente empregada no processo MIG/MAG é caracterizada pela característica estática do tipo Tensão Constante e gera a corrente contínua. Essa característica estática da fonte garante o fenômeno de autoajuste do comprimento de arco (distância entre as regiões catódicas e anódicas), cujo valor (expresso em volts) é regulada no equipamento, e a corrente, como não é definida diretamente no equipamento, irá variar de acordo com a velocidade de alimentação do arame. A Figura 3 ilustra o comportamento estático da tensão do processo MIG/MAG.

O fenômeno de autoajuste do comprimento de arco busca sempre manter o comprimento de arco constante. Quando há uma variação brusca na velocidade de alimentação do arame ou alguma mudança na tensão do arco, a fonte irá aumentar ou diminuir a corrente (e conseqüentemente, a taxa de fusão do arame), a fim de estabilizar o arco e a manter no comprimento original. Esse fenômeno contribui muito no processo de soldagem, no que se diz respeito à facilidade de soldar. Quando comparado com outros processos de soldagem, como soldagem com eletrodo revestido ou TIG (*Tungsten Inert Gas*), o MIG/MAG é o que exige menos treinamento e habilidade por parte do soldador. É importante ressaltar que existe uma dificuldade maior ao realizar o ajuste correto dos parâmetros de soldagem, quando se compara a soldagem com ER (Eletrodo Revestido).

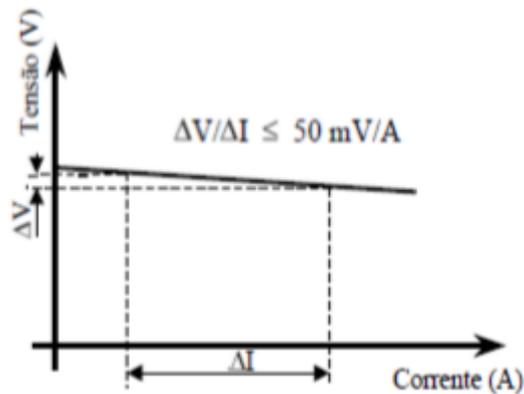


Figura 3: Exemplo da Característica Estática da Fonte de Tensão Constante.
Fonte: Material Didático Prof. Valtair Antônio Ferraresi.

2.4. Variáveis do processo

Os parâmetros mais importantes presentes no processo de soldagem MIG/MAG são a velocidade de alimentação do arame eletrodo (que determina a corrente de soldagem), tensão (que representa o comprimento do arco), velocidade de soldagem, gás de proteção, diâmetro do arame eletrodo e ângulos da tocha.

Algumas outras variáveis também devem ser consideradas, como a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) e a taxa de deposição.

2.4.1. Gás de proteção

O ar atmosférico é expulso da região de soldagem por um gás de proteção com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão. A contaminação pode ser causada principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O) presentes na atmosfera.

Os gases mais utilizados na soldagem são: argônio (Ar), dióxido de carbono (CO_2) e, em alguns casos, hélio (He). Cada um dos gases citados possui propriedades diferentes.

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 CO_2 . A porcentagem de CO_2 presente na mistura irá interferir no processo.

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 puro 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 CO_2 .

2.4.2. Distância entre bico de contato e peça (DBCP)

É essencial ajustar a distância correta entre o bico de contato e a peça, visto que, esse parâmetro interfere diretamente no comportamento do processo de soldagem. Um DBCP excessivo pode resultar em um arco de comprimento muito curto, gotículas maiores, arco instável e respingos. Já uma DBCP muito curta acarretará numa corrente maior, assim, a poça de fusão ficará com maior temperatura e de difícil controle.

A variação da DBCP também está diretamente relacionada com alterações na corrente. Como na soldagem MIG/MAG existe o fenômeno do autoajuste do

comprimento de arco, quando há uma mudança na DBCP a corrente irá alterar a fim de manter o comprimento do arco constante. Segundo Scotti e Ponomarev (2014), o efeito da DBCP em soldagens MIG/MAG com um único arame é razoavelmente conhecido; caso se deseje alta produção e pouca penetração, deve-se procurar DBCP longas.

2.5. Viabilidade do processo

O processo MIG/MAG é apenas um dos diversos métodos de soldagem por fusão a arco. Cada processo possui suas vantagens e desvantagens, e por meio dessa avaliação é possível encontrar qual processo é mais adequado para uma determinada atividade.

Dentre os processos mais conhecidos e utilizados pode-se citar como exemplos: MIG/MAG, eletrodo revestido, TIG, entre outros.

2.5.1. Soldagem com eletrodo revestido

Soldagem com Eletrodos Revestidos (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW) é um processo no qual a união dos metais é obtida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo específico revestido e a peça.

O eletrodo é formado por um núcleo metálico denominado “alma”, recoberto por uma camada de materiais que correspondem ao “revestimento”. A alma do eletrodo conduz a corrente elétrica e é usada também como metal de adição. O revestimento gera escória e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada e estabilizam o arco, garantindo uma solda de melhor qualidade. O revestimento pode ainda conter elementos ligantes que são incorporados ao metal de solda, influenciando sua composição química e características metalúrgicas e mecânicas.

O controle do processo e, conseqüentemente, a produtividade e a qualidade da junta soldada, é determinado pelas seguintes variáveis: comprimento do arco, tipo e valor da corrente, velocidade de soldagem, tipo e bitola do eletrodo, orientação do eletrodo e posição de soldagem.

O equipamento necessário ao processo consiste de porta-eletrodo, cabos e fonte de energia, que pode ser de corrente contínua (CC) ou alternada (CA) dependendo do tipo de eletrodo e material sendo soldado.

A Figura 4 e a Tabela 2 demonstram o processo e suas vantagens e limitações, respectivamente.

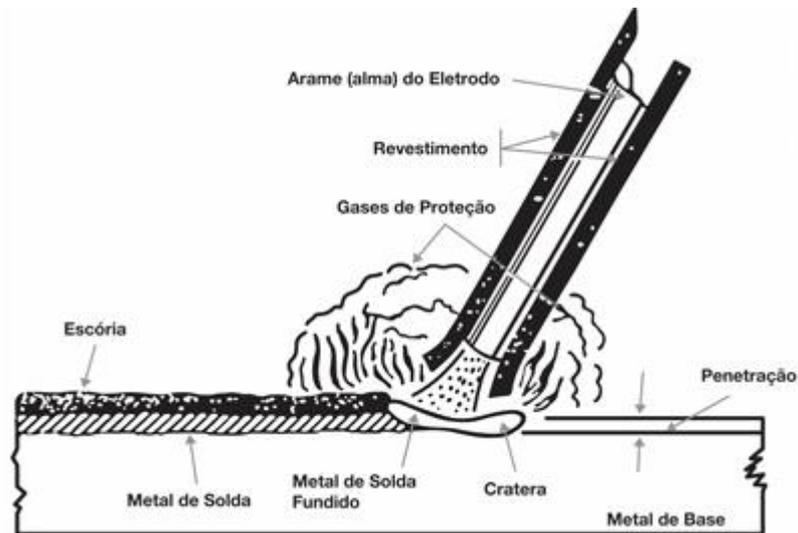


Figura 4: Processo de soldagem com eletrodo revestido. Fonte: ESAB.

Tabela 2: Vantagens e limitações da soldagem com eletrodo revestido.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Existem procedimentos e eletrodos disponibilizados para soldar diversos tipos de materiais; • Os equipamentos utilizados são simples e podem ser portáteis; • Não é necessário o uso de gás de proteção; • Pode-se soldar em áreas de difícil acesso; • Viável para se soldar em locais abertos com possível corrente de ar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor taxa de deposição quando comparado com MIG/MAG e TIG; • Maior perda de material (é comum o descarte da “ponta” do eletrodo); • Alta produção de escória; • Exige maior destreza do operador, pois na maioria das vezes o processo é manual; • Comprimento limitado do consumível (eletrodo).

2.5.2. TIG (*Tungsten Inert Gas*)

O processo TIG, também denominado GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), possui uma particularidade quando comparado com os processos descritos anteriormente, o eletrodo nesse processo não é consumível. A união dos metais pela soldagem TIG ocorre a partir do aquecimento e fusão localizada com o arco elétrico, proveniente entre a extremidade de um eletrodo de tungstênio e a peça.

O equipamento básico utilizado nesse processo consiste em: fonte de energia (Corrente Contínua e/ou Corrente Alternada, dependendo do material a ser soldado), cabos, tocha, eletrodo de tungstênio e cilindro de gás de proteção com regulador de vazão. Equipamentos como ignitor de alta frequência para facilitar a abertura do arco e sua manutenção quando em CA, e um sistema de acionamento que inicia ou interrompe o fornecimento de energia elétrica e de gás de proteção à tocha podem também ser usados nesse tipo de processo.

A soldagem TIG pode ser manual ou mecanizada. Esse processo é considerado o mais controlável dos processos de soldagem a arco. As suas principais variáveis são: corrente de soldagem, composição, diâmetro e forma do eletrodo, composição do gás de proteção e metal de adição.

A Figura 5 e a Tabela 3 demonstram o processo e suas vantagens e limitações, respectivamente.

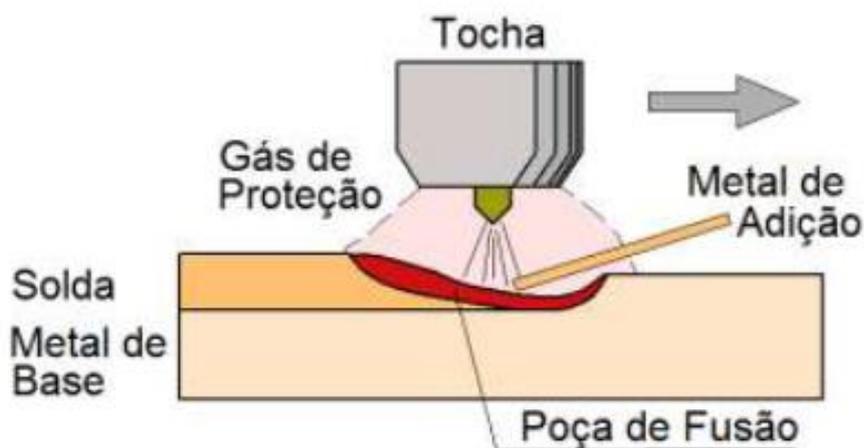


Figura 5: Processo de soldagem TIG. Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012).

Tabela 3: Vantagens e limitações da soldagem TIG.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilita a soldagem sem metal de adição em alguns casos específicos; • Pouca geração de “fumos”, o que resulta em uma melhor visibilidade para o soldador; • Soldas com ótimo acabamento e aparência; • Pouca ou nenhuma geração de escória, o que resulta em uma limpeza simples e rápida após a solda; • Controle muito preciso dos parâmetros de processo; • Processo pode ser manual ou mecanizado. 	<ul style="list-style-type: none"> • A taxa de deposição é menor do que nos processos MIG/MAG e ER, quando comparado a uma mesma corrente; • Exige maior destreza e treinamento do soldador se o processo for manual; • Exige proteção gasosa, o que limita a operação em locais abertos com possível corrente de ar; • Risco de inclusões de tungstênio; • Maior custo dos gases de proteção, quando comparado com o processo MIG/MAG.

3. ANÁLISE DO PROCESSO

3.1. Velocidade de alimentação e taxa de fusão do arame eletrodo

O suprimento de energia no processo MIG/MAG geralmente é uma fonte de corrente contínua com a característica do tipo de tensão constante, ao contrário das fontes de corrente constante utilizadas na soldagem TIG e ER. Uma fonte MIG/MAG busca proporcionar uma tensão do arco constante durante a soldagem, sendo que a tensão determinar o comprimento do arco. Quando ocorre uma variação da velocidade de alimentação do arame, ou uma mudança da tensão do arco (uma mudança da DBCP), a fonte aumenta ou diminui a corrente e, conseqüentemente, a taxa de fusão do arame de maneira a restaurar o comprimento original do arco.

A velocidade de alimentação do arame determina o valor da corrente de soldagem. Segundo Marques; Modenesi; Bracarense (2007) na soldagem a arco com eletrodo consumível, este é fundido a uma velocidade que deve ser, para o processo funcionar de forma adequada, igual a velocidade com que ele é alimentado. No processo MIG/MAG um estado estacionário é atingido no qual o comprimento do eletrodo (*stick-out*) é mantido relativamente constante. A velocidade de fusão de arame controla a quantidade de metal fundido pelo tempo de solda (taxa de fusão), o que influencia diretamente no custo e na produtividade do processo.

Na soldagem a arco, a fusão do arame depende principalmente de seu aquecimento pelo arco e por efeito Joule (pré-aquecimento por resistência elétrica) ao longo do eletrodo (Scotti e Ponomarov, 2014). Considerando estes dois efeitos mostra-se que a velocidade de fusão do arame pode ser representada, para o processo MIG/MAG pela equação (1):

$$V = \alpha i + \beta s i^2 \quad (1)$$

Onde:

- V é a velocidade de fusão (em m/min);
- α e β são, respectivamente, coeficientes ligados ao aquecimento do eletrodo pelo arco e por efeito Joule;
- s é o comprimento livre do eletrodo;
- i é a corrente.

A Figura 6 mostra as curvas típicas de V para o processo MIG/MAG com arames de diferentes materiais e bitolas.

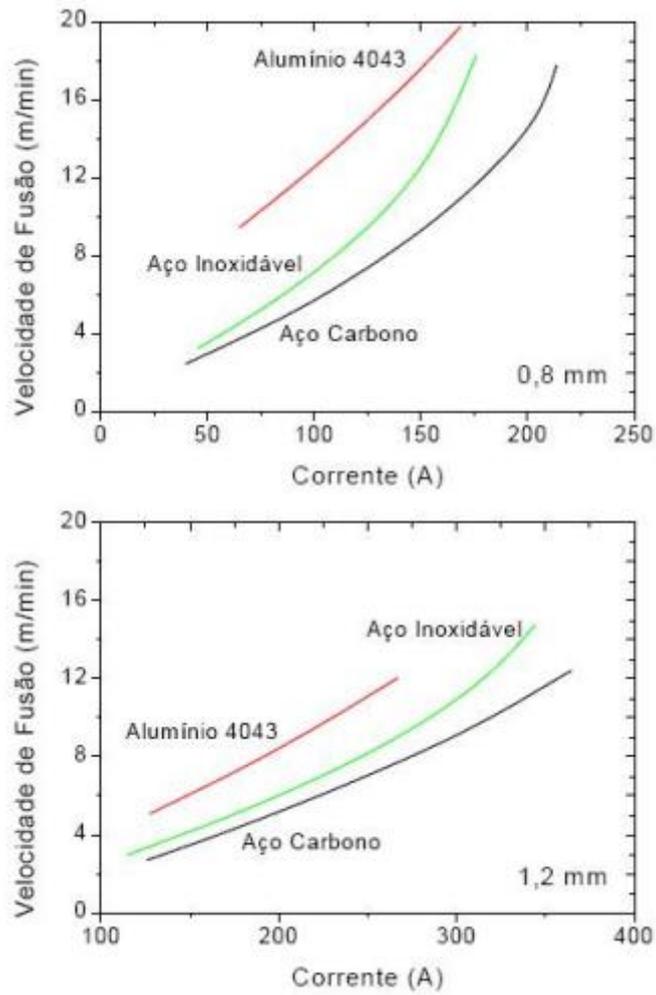


Figura 6: Velocidade de fusão para arames de 0,8 e 1,2 mm Fonte: Cary (1994).

A fusão do eletrodo pode também ser descrita em termos de massa de arame por tempo (usualmente em kg/h), que é a taxa de fusão (V_f), conforme equação (2). A passagem de V para V_f é simples quando se conhece a densidade (ρ) e o diâmetro (d) do arame:

$$V_f = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \rho V \quad (2)$$

3.2. Extensão livre do eletrodo e distância bico de contato - peça (DBCP)

Define-se como extensão livre do eletrodo, ou *stick-out*, a distância entre o último ponto de contato elétrico do arame (normalmente o bico de contato), e a ponta do eletrodo ainda não fundida. Quando esta distância aumenta, aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, que terá assim mais tempo para aquecer-se por efeito Joule. Com esta elevação da temperatura do eletrodo, será necessária uma menor corrente para fundir o eletrodo para a mesma taxa de alimentação, ou vindo de outra forma, para a mesma corrente de soldagem utilizada, se obterá uma maior taxa de fusão e de deposição.

A distância bico de contato - peça (DBCP) é a soma da extensão (do *stick-out*) com o comprimento do arco, representado na Figura 7. As extensões normalmente utilizadas situam-se na faixa entre 6 e 15 mm para a transferência por curto-circuito.

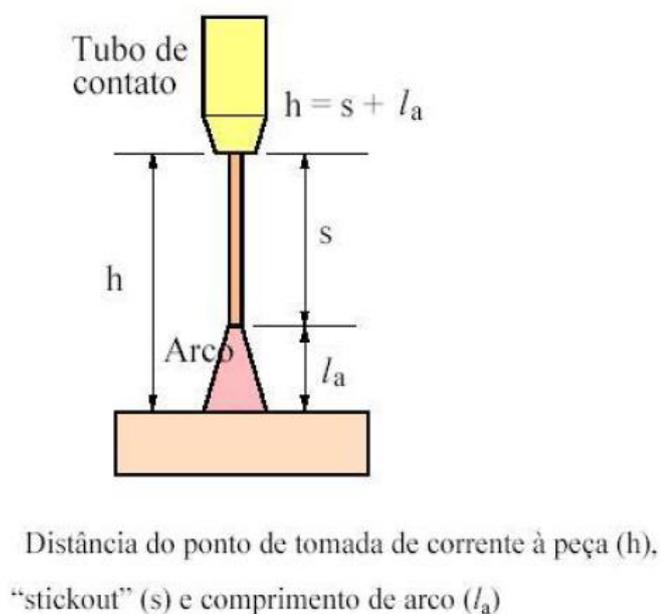


Figura 7: Distância bico de contato peça (DBCP). Fonte: Modenesi; Marques; Santos (2012).

Posteriormente, será visto que neste trabalho foi avaliado efeito que a variação da DBCP tem na taxa de fusão. Sabe-se que para obter comprimentos de arcos

diferentes para mesmas faixas de corrente e velocidades de alimentação em fontes convencionais (característica estática do tipo tensão constante), utiliza-se o artifício de variar a distância do bico de contato à peça (DBCP). Quando, por exemplo, se aumenta a DBCP, mantendo todos os outros parâmetros constantes, há uma diminuição do valor da corrente, pois há um aumento do comprimento energizado do eletrodo, apesar do comprimento do arco ficar praticamente o mesmo. Confirma-se, então, que o aumento do comprimento energizado do eletrodo ocasiona um aumento da resistência elétrica, que, por efeito Joule, aumenta a energia em forma de calor para o arame, diminuindo assim a corrente demandada para manter a mesma taxa de fusão (mesma velocidade de alimentação). Em seguida, aumenta-se a regulagem da tensão até que a corrente retorne para o valor desejado. Já este aumento da tensão, para uma dada corrente e DBCP, significa aumento desejado de comprimento do arco.

3.3. Produtividade e taxa de deposição

Em toda atividade industrial existe a preocupação acerca da viabilidade dos processos utilizados para sua operação. Desenvolvimentos tecnológicos têm acarretado na otimização de alguns desses processos, no sentido de reduzir os custos e aumentar a produtividade.

Com relação a processos relacionados a soldagem, essa lógica se mantém. Há uma busca incessante para se reduzir os custos dessa atividade, seja por meio da busca por novas tecnologias ou pela otimização dos processos já existentes. Nesse trabalho, será avaliado como alguns parâmetros do processo de soldagem MIG/MAG se relacionam com o aumento da produtividade.

Dentro de um mesmo processo de soldagem o aumento da produtividade leva à redução de custos, como pode ser visto na Figura 8.

A produtividade de um processo de soldagem pode ser definida como o comprimento da junta soldada por unidade de tempo, e está diretamente relacionada a taxa de deposição. O que de fato difere a produtividade da taxa de deposição é que no caso da produtividade outros fatores interferem, como o ciclo de trabalho e o formato do cordão.

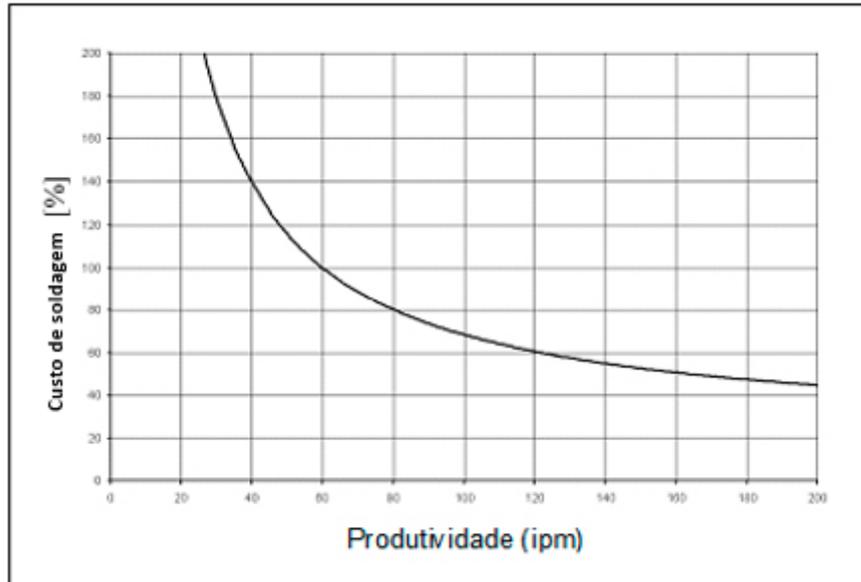


Figura 8: Relação entre a produtividade e o custo da soldagem. Fonte: ESAB.

O ciclo de trabalho é definido como o tempo de arco aberto dividido pelo tempo total de operação, que inclui o tempo gasto em todo o processo (preparação da junta, limpeza, troca de eletrodo/bobinas, remoção de escória, etc). Desta forma quanto maior o ciclo de trabalho, maior será o tempo em que o soldador estará, efetivamente, depositando material, e conseqüentemente, a produtividade do processo.

O tipo de chanfro (formato do cordão) determina a quantidade de metal de solda necessária para realizar a soldagem. A redução da área da secção transversal da junta leva a reduções na quantidade de metal depositado e a ganhos de produtividade.

O que será de fato estudado e analisado nesse trabalho serão os parâmetros que interferem na taxa de deposição e conseqüentemente na produtividade. Sabe-se que diferentes processos possuem diferentes taxas de deposição e que, independente dele, a taxa de deposição aumenta com o aumento da corrente, como mostra a Figura 9.

Como foi descrito, há diversas formas de se aumentar a produtividade, algumas delas requerem altos investimentos, já outras são decorrentes de simples modificações de projeto. A Tabela 4 faz um resumo das maneiras para maximizar a produtividade. Por exemplo, quando se trata do processo MIG/MAG, o *stick-out* (\approx DBCP) exerce grande influência na taxa de deposição. A taxa de fusão do arame

aumenta com o aumento *stick-out* devido à maior extensão do eletrodo e maior dissipação do calor por efeito Joule.

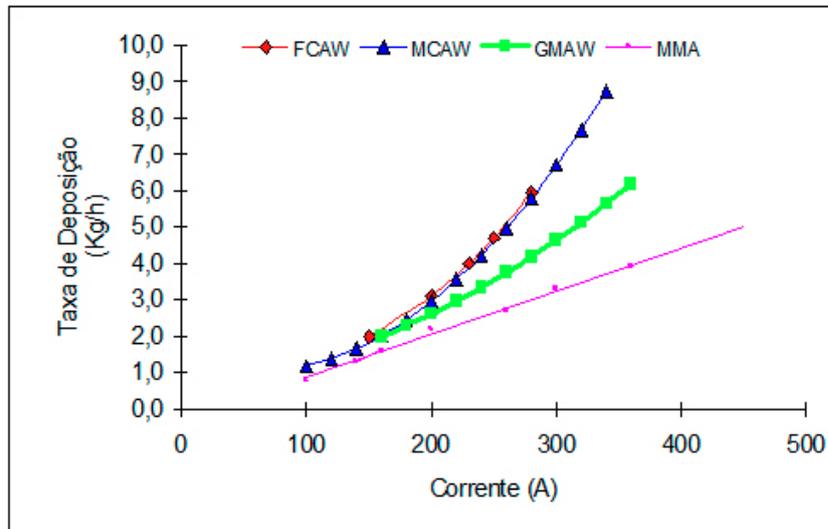


Figura 9: Taxa de deposição para diferentes processos de soldagem. Fonte: ESAB.

Sendo: FCAW – Flux Cored Arc Welding;

MCAW - Metal Cored Arc Welding;

GMAW - Gas Metal Arc Welding;

MMA - Manual Metal Arc (Welding), soldagem ER.

Tabela 4: Objetivos e dicas para maximizar a produtividade. Fonte: ESAB.

Objetivo	Maneiras
Minimizar a quantidade de metal depositado	<ul style="list-style-type: none"> • Escolher o chanfro de menor área possível; • Usar processos de soldagem que promovem grande penetração; • Evitar reforços excessivos; • Sempre que possível usar soldas intermitentes; • Sempre que possível usar chapas de menor espessura.
Minimizar o ciclo de trabalho	<ul style="list-style-type: none"> • Escolher o processo de soldagem adequado; • Prevenir defeitos e retrabalho; • Garantir treinamento adequado para os soldadores; • Garantir parâmetros de soldagem adequados; • Mecanizar e automatizar sempre que possível;
Maximizar taxa de deposição	<ul style="list-style-type: none"> • Escolher o processo de soldagem adequado; • Aumentar a corrente; • Aumentar o “<i>stick-out</i>”; • Sempre que possível, usar a posição de soldagem plana; • Mecanizar e automatizar sempre que possível;

4. METODOLOGIA

O objetivo principal dos testes foi variar a DBCP para cada diâmetro de arame eletrodo, e em seguida analisar como essa variação interfere na taxa de fusão do arame eletrodo.

4.1. Materiais e equipamentos utilizados

Nos ensaios experimentais realizados, foram utilizados os seguintes equipamentos e ferramentas disponibilizados pelo LAPROSOLDA (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Soldagem) da UFU (Universidade Federal de Uberlândia):

- Fonte para soldagem MIG/MAG;
- Bicos de contato;

- Arames eletrodo AWS A5.18/ASME SFA5.18 ER70S-6 de diâmetros iguais a 0,9 mm, 1,0 mm e 1,2 mm;
- Condicionador de sinal;
- Placa de aquisição de sinal;
- Gás de proteção 75% Ar e 25% CO₂;
- Computador e software para tratamentos dos sinais;
- Bancada de soldagem;
- EPI (máscara de soldagem, luvas e avental);
- Alicata amperímetro;
- Micrômetro.

4.2. Procedimento experimental

Na primeira etapa do projeto, foi definido que seriam realizados experimentos com arames de diâmetro nominal igual a 0,9 mm, 1,0 mm e 1,2 mm. Dessa forma, com um micrômetro foi medido o diâmetro real dos arames, e com uma balança foram pesados 1 metro de cada um destes arames, assim foi obtido o peso específico real de cada arame (em gramas por metro), esses valores podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5: Diâmetro nominal, diâmetro real e peso específico dos arames.

Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro real (mm)	Peso específico (g/m)
0,9	0,87	4,690
1,0	0,98	5,643
1,2	1,18	8,557

Em seguida, realizou-se a simples deposição em uma chapa de aço-carbono (dimensões 10,0x2,5x1,0 cm) com o arame de 0,9 mm de diâmetro nominal, conforme Tabela 5 sabe-se que o diâmetro real (medido com o micrômetro) é de 0,87 mm. Na primeira solda utilizou-se uma DBCP de 12 mm, e na segunda uma DBCP de 21 mm, mantendo os demais parâmetros não alterados. Em seguida, o processo foi repetido para os arames eletrodos de 1,0 mm e 1,2 mm de diâmetro nominal.

Com o arame de 1,0 mm de diâmetro a DBCP utilizada para a primeira soldagem foi de 12 mm e para a segunda 22 mm. O arame eletrodo de 1,2 mm foi utilizado para soldagem com 12 mm e 25 mm de DBCP. Esses valores encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Valores da DBCP nos testes realizados.

Teste	Diâmetro nominal (mm)	DBCP (mm)
1	0,9	12
2	0,9	21
3	1,0	12
4	1,0	22
5	1,2	12
6	1,2	25

Em todos os testes realizados foram utilizados os mesmos equipamentos (Figura 10), com soldas realizadas na posição plana em condição de curto-circuito, e coletadas as informações de tensão, corrente, velocidade de alimentação e vazão de gás. Os valores de tensão e corrente foram registrados com o auxílio de uma placa de aquisição (Figura 11).



Figura 10: Fonte, mesa e tocha de soldagem utilizados para os testes.

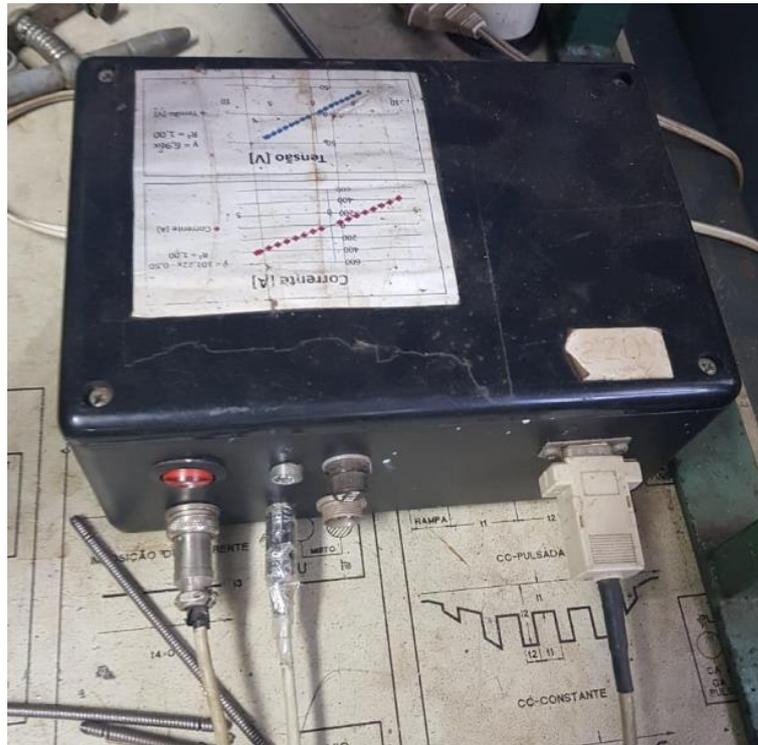


Figura 11: Placa de aquisição utilizada para coletar dados de corrente e tensão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 7 constam os resultados obtidos nos testes com o arame de diâmetro igual a 0,9 mm (nominal) variando o valor da DBCP entre 12 e 21 mm. Nos ambos os testes tentou-se ajustar a velocidade de alimentação de maneira a chegar a uma corrente de soldagem de 150 A. A corrente média real, obtida por meio da placa de aquisição, foi de 158 A para o primeiro teste (DBCP de 12 mm) e 161 A para o segundo teste (DBCP de 21 mm). Assim como a corrente, a tensão real foi obtida também por meio da placa de aquisição. As velocidades de alimentação resultantes foram de 7,4 m/min e 9,6 m/min, respectivamente.

Tabela 7: Dados experimentais obtidos para o arame de diâmetro nominal igual a 0,9 mm.

Diâmetro real (mm)	DBCP (mm)	Velocidade de alimentação (m/min)	Corrente real (A)	Tensão real (V)
0,87	12	7,4	158	20,1
	21	9,6	161	21,6

Obs.: Os valores da velocidade de alimentação, indicados aqui, assim como nas Tabelas 8 e 9, foram tirados do painel de controle do alimentador de arame.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados dos mesmos testes realizados com os arames eletrodo de 1,0 e 1,2 mm de diâmetro.

Tabela 8: Dados experimentais obtidos para o arame de diâmetro nominal igual a 1,0 mm.

Diâmetro real (mm)	DBCP (mm)	Velocidade de alimentação (m/min)	Corrente real (A)	Tensão real (V)
0,98	12	6,0	165	19,9
	22	7,6	169	21,2

Tabela 9: Dados experimentais obtidos para o arame de diâmetro nominal igual a 1,2 mm.

Diâmetro real (mm)	DBCP (mm)	Velocidade de alimentação (m/min)	Corrente real (A)	Tensão real (V)
1,18	12	3,6	159	19,0
	25	4,7	164	19,8

Em todos os testes realizados foi utilizado o mesmo gás de proteção (75% Ar e 25% CO₂).

Como foi mencionado acima, os valores da velocidade de alimentação, indicados nas Tabelas 7, 8 e 9, foram tirados do painel de controle do alimentador de arame. Mas os testes de cronometria mostraram que há certa divergência entre estes valores e os valores da velocidade real de alimentação de arame. Na Tabela 10 constam os valores da velocidade real de alimentação de arame para cada teste realizado. Esse parâmetro, juntamente com os valores de peso de cada arame testado (Tabela 5), serão fundamentais para o cálculo da taxa real de fusão.

Tabela 10: Velocidade real de soldagem para cada teste realizado.

Diâmetro real (mm)	Velocidade real de alimentação de arame (m/min)	DBCP (mm)
0,87	7,302	12
0,87	9,520	21
0,98	5,900	12
0,98	7,795	22
1,18	3,330	12
1,18	4,507	25

Com relação a análise dos resultados obtidos, calcula-se a taxa de fusão para cada experimento por meio da Equação 3:

$$Vf = \left(\frac{P}{1000} \right) * (Vr * 60) \quad (3)$$

Onde:

- Vf é a taxa de fusão do arame eletrodo em kg/h;
- P é o peso específico do arame eletrodo em g/m;
- Vr é a velocidade real de alimentação de arame em m/min.

A Tabela 11 mostra os resultados de taxa de fusão para cada teste realizado.

Tabela 11: Taxa de fusão calculada para cada experimento.

Diâmetro real (mm)	DBCP (mm)	Taxa de fusão (kg/h)
0,87	12	2,055
	21	2,679
0,98	12	1,924
	22	2,640
1,18	12	1,710
	25	2,314

Como o objetivo desse trabalho foi analisar a influência da DBCP na taxa de fusão, é necessário que seja calculada o acréscimo percentual desse parâmetro (Tabela 12).

Tabela 12: Influência percentual do acréscimo da DBCP na taxa de fusão.

Diâmetro real (mm)	DBCP (mm)	Taxa de fusão (kg/h)	Acréscimo da taxa de fusão (%)
0,87	12	2,055	100%
	21	2,679	130%
0,98	12	1,924	100%
	22	2,640	132%
1,18	12	1,710	100%
	25	2,314	135%

Com os resultados da tabela acima, pode-se afirmar que o acréscimo da DBCP impacta diretamente num acréscimo na taxa de fusão. A próxima etapa consiste em encontrar a relação direta entre esses dois parâmetros, o quanto será o acréscimo percentual na taxa de fusão por milímetro adicional da DBCP, para cada um dos arames testados. Para isso, basta dividir a diferença do acréscimo da taxa de fusão (%) pela diferença da DBCP (mm) para cada arame (Tabela 13).

Tabela 13: Acréscimo da taxa de fusão por milímetro adicionado na DBCP.

Diâmetro real (mm)	Acréscimo da taxa de fusão (% / mm)
0,87	3,33
0,98	3,20
1,18	2,69

Com esse novo parâmetro é possível construir o gráfico TAXA DE FUSÃO *versus* DBCP para cada arame-eletrodo testado (Figura 12). Tomando como base o primeiro teste realizado de cada arame, pois todos foram com a mesma DBCP (12 mm), pode-se estipular qual seria a taxa de fusão para cada acréscimo de DBCP, milímetro em milímetro. Essa estipulação considera um cenário ideal onde todos os outros parâmetros são mantidos constantes, com exceção da DBCP.

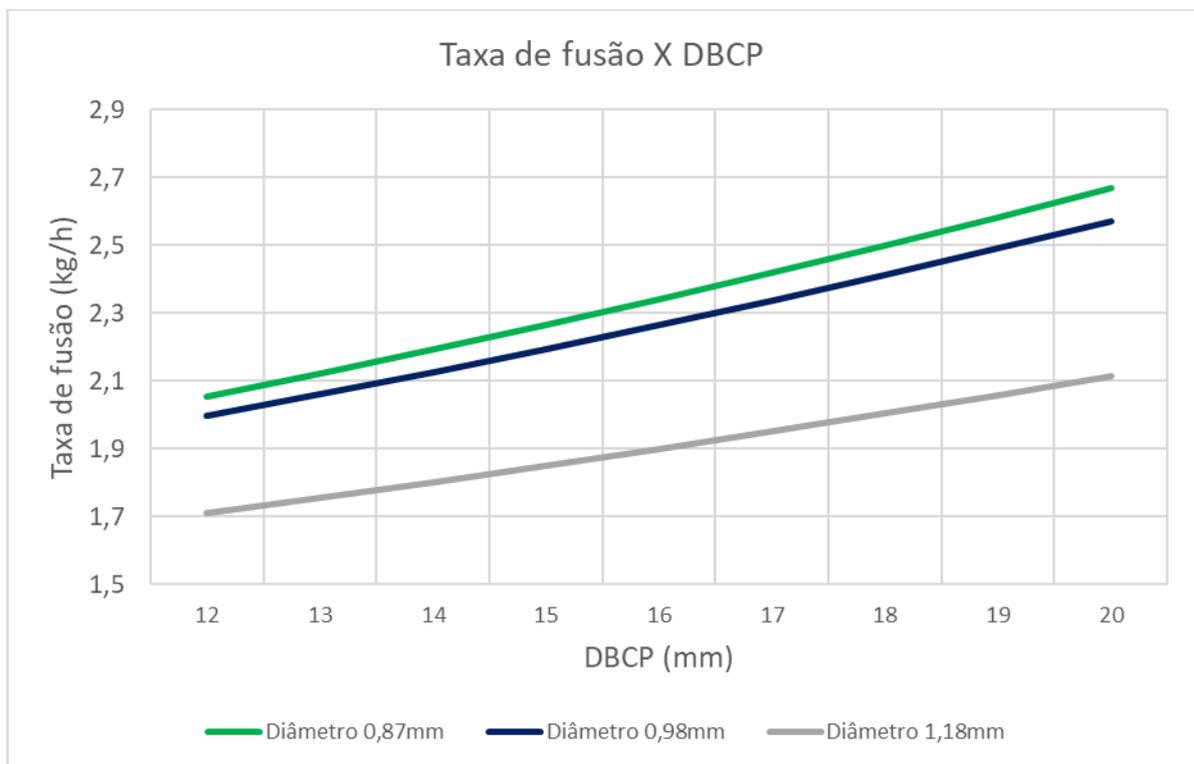


Figura 12: Taxa de fusão versus DBCP.

Pelos gráficos e dados mostrados anteriormente, pode-se concluir que para arames de maior bitola tem-se um aumento menor na taxa de fusão por milímetro adicionado na DBCP (Tabela 13). Isso ocorre devido ao efeito Joule ter mais impacto em arames mais finos, como esse ganho na taxa de fusão devido ao aumento na DBCP está diretamente relacionado ao efeito Joule, quanto mais fino for o arame-eletrodo maior será o impacto do efeito e conseqüentemente maior será o ganho na taxa de fusão. No gráfico abaixo (Figura 13), é possível comparar e visualizar melhor o impacto da variação do diâmetro na taxa de fusão.

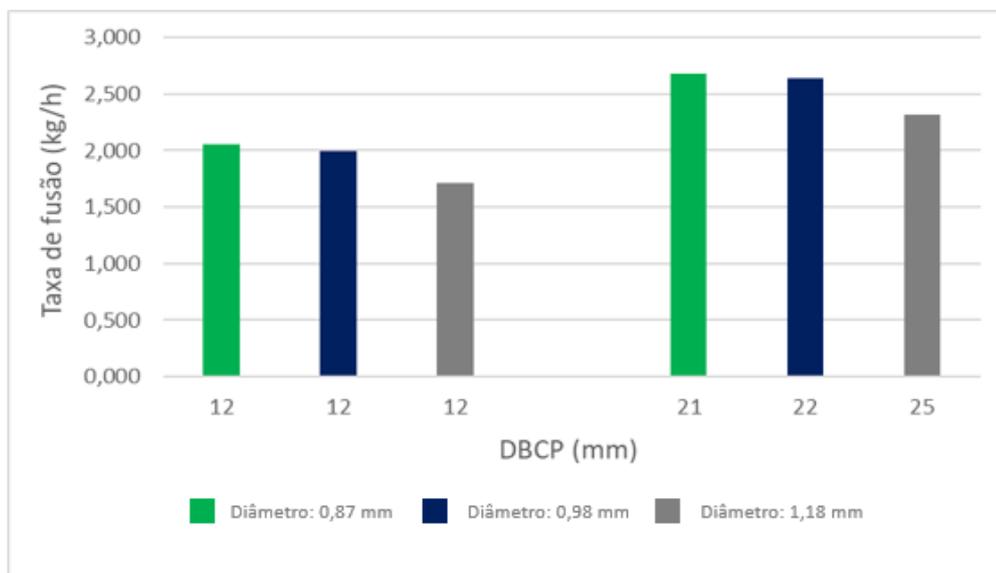


Figura 13: Taxa de fusão versus DBCP para todos os arames testados.

Com os dados obtidos anteriormente pode-se também calcular qual seria o gasto energético para fundir um quilograma de arame-eletrodo para cada teste realizado (Figura 14, Tabela 14). Multiplicando a corrente (A) pela tensão (V), consegue-se o valor de potência (J/s) e dividindo a potência pela taxa de fusão (convertida de kg/h para kg/s) chega-se ao valor de energia necessária para fundir um quilograma de arame-eletrodo (J/kg), como mostrado na Tabela 14.

Tabela 14: Energia gasta para fundir 1 kg de arame-eletrodo versus DBCP.

Diâmetro (mm)	DBCP (mm)	Energia (J/kg)
0,87	12	5564033
0,87	21	4673272
0,98	12	5916986
0,98	22	4886288
1,18	12	6361406
1,18	25	5052055

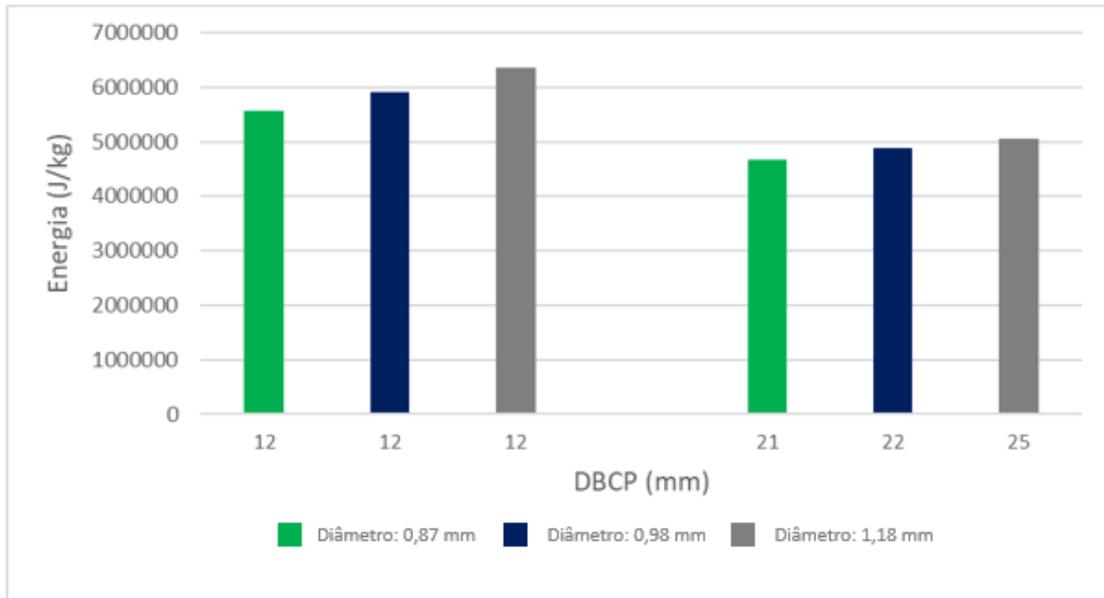


Figura 14: Energia gasta para fundir 1 kg de arame-eletrodo versus DBCP.

Com essa nova informação é possível concluir que o gasto energético para se fundir 1 kg de arame-eletrodo varia conforme é variada a bitola e a DBCP. Comparando os arames de mesmo diâmetro, mas com DBCP diferente, observa-se que quando a solda é realizada com uma DBCP maior o gasto energético diminui, justamente pelo aumento da influência do efeito Joule (o mesmo acontece quando se diminui o diâmetro), o que impacta num aumento da taxa de fusão e conseqüentemente é necessário fornecer menos energia para se fundir a mesma quantidade de material.

Por outro lado, quando se analisa a viabilidade do processo na prática, sabe-se que para arames mais finos é recomendado que a solda seja realizada com uma DBCP menor, para se obter maior controle no processo. Arames de menor diâmetro são mais difíceis de se soldar com uma DBCP maior. Direcionar o arame até a poça de fusão fica mais difícil quanto maior é a extensão livre do eletrodo. Além disso, ao se soldar usando arames finos com uma DBCP maior, o aquecimento excessivo pode ocasionar em perda dos elementos ligantes. Outro fator a ser analisado quando se aumenta a DBCP é a perda da proteção gasosa, que devido a esse afastamento maior entre bico de contato e peça, pode-se dissipar no meio e acabar prejudicando a qualidade da solda.

6. CONCLUSÕES

Considerando o objetivo desse trabalho que foi avaliar a influência da distância entre o bico de contato e a peça na taxa de fusão do arame eletrodo do processo MIG/MAG, tem-se como principais conclusões:

- Por meio dos resultados dos experimentos realizados pode-se concluir que um aumento na DBCP acarretará num aumento adequado na taxa de fusão;
- O acréscimo na taxa de fusão devido a um aumento na DBCP não é tão significativo quanto devido a um possível aumento da corrente. Porém, obter uma maior taxa de fusão a partir do aumento da DBCP é vantajoso pois não necessita de maior gasto energético;
- Um acréscimo na DBCP ou soldar com um arame-eletrodo de menor diâmetro implica em uma redução no gasto energético do processo, devido a influência do efeito Joule;
- Durante os testes o objetivo foi avaliar a influência da DBCP na taxa de fusão, por isso, questões acerca de uma possível deterioração da qualidade da solda, não foram analisadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

SCOTTI, A. E PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho. 2ª Ed., São Paulo: Artliber Editora, 2014.

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

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

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