

RÚBIA ZAIDAN MARTINS

**APLICABILIDADE DE ARAME ULTRAFINO NA
SOLDAGEM MIG/MAG DE CHAPAS FINAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2018**

RÚBIA ZAIDAN MARTINS

**APLICABILIDADE DE ARAME ULTRAFINO NA SOLDAGEM
MIG/MAG DE CHAPAS FINAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

UBERLÂNDIA - MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M386a Martins, Rúbia Zaidan, 1985-
2018 Aplicabilidade de arame ultrafino na soldagem MIG/MAG de
chapas finas [recurso eletrônico] / Rúbia Zaidan Martins. - 2018.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.312>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem. 3. Arco de soldagem a gás de metal. 4. Arame. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975- (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

AGRADECIMENTOS

É difícil acreditar que esta etapa finalmente chegou ao fim, após um grande período de esforço, dedicação, serenidade e reclusão.

A tarefa de conciliar vida profissional e acadêmica, nunca foi tão árdua, ainda mais por estarem separadas a uma distância de 330 km (percurso total de ida e volta). Quilometragem esta, às vezes percorrida em períodos de chuva, madrugada, e por trechos marcados pelos famosos congestionamentos de carretas e buracos pela estrada a fora.

Desistir nunca foi uma opção, apesar de parecer o caminho mais fácil. Porém, a palavra desafio é o que motiva, e traz força para seguir em frente e lutar pelo tão sonhado objetivo.

Mas um caminho como este, nunca é percorrido só. Existem várias pessoas que pegam “carona” ao longo desta grande jornada, e fazem com que os sonhos se pareçam mais próximos e realmente passíveis de serem alcançados. E em relação a isto, agradeço a Deus pelos “caroneiros” colocados em meu caminho.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família pelo apoio incondicional e motivação diária em tudo que faço. É ela a responsável por eu estar, e jamais abandonar, a vida acadêmica.

Agradeço também de forma especial ao Sr. Vladimir Ponomarev, que por muitas vezes abandonou o papel de professor e co-orientador, para se tornar um grande amigo e motivador deste projeto.

Não poderia deixar de citar, o nome do profissional que me acompanhou ao longo de toda etapa de testes: Cláudio. Passamos vários momentos de frustração juntos, que se transformaram em alegria quando finalmente chegamos aos resultados finais. Sua experiência na área de soldagem e otimismo diário, foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Sr. Louriel, deixo registrada toda minha admiração e respeito pelo profissional que é dentro da área de soldagem. Seu conhecimento e foco ao longo do Mestrado, sempre me mantiveram no caminho correto.

A equipe do Laprosolda, em especial aos estudantes Diego Correia, Daniel Dominices, Pedro Henrique Rodrigues, meu muito obrigada pelo apoio na etapa final deste trabalho.

Por fim, agradeço a Deus por toda força e resistência ao longo desta “grande viagem”. Sua presença e proteção, permitiram que eu chegasse até aqui.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. SOLDAGEM MIG/MAG.....	3
2.2. TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	4
2.3. CONSUMÍVEIS DO PROCESSO.....	10
2.4. PARÂMETROS DO PROCESSO.....	12
2.5. DESCONTINUIDADES NA SOLDA.....	18
2.6. PROSPECÇÃO SOBRE POTENCIAL DE APLICAÇÃO.....	21
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL, EQUIPAMENTOS E INSUMOS.....	27
3.1. METODOLOGIA.....	27
3.2. FONTE DE SOLDAGEM.....	28
3.3. ARAME E ROLETES DE ARRASTE.....	30
3.4. BICO DE CONTATO.....	31
3.5. MISTURA GASOSA.....	33
3.6. TOCHA.....	33
3.7. MULTÍMETRO.....	34
3.8. CORPOS DE PROVA.....	35
3.9. MACROGRAFIA SIMPLES.....	36
3.10. CORTADORA METALOGRÁFICA.....	36
3.11. EMBUTIMENTO.....	36
3.12. LIXAMENTO.....	37
3.13. POLIMENTO.....	37
3.14. MICROATAQUE.....	38
3.15. CALORÍMETRO.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5. CONCLUSÕES.....	70
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

SIMBOLOGIA

MIG: Soldagem *Metal Inert Gas*

MAG: Soldagem *Metal Active Gas*

Ø: Diâmetro

GMAW: Gas Metal Arc Welding

DBCP: Distância bico de contato peça

I_b: Corrente de base

t_b: Tempo de base

I_p: Corrente de pico

ZAC: Zona afetada pelo calor

E: Energia de Soldagem

CI: Parcela de calor transferida para o metal de base

CF: Calor efetivo de fusão

η_{fusão}: Rendimento de fusão

η_{térmico}: Rendimento térmico

CC: Curto-Circuito

Cabs: Calor Absorvido

k: Eficiência Térmica do processo de soldagem

Martins, R. Z. **Aplicabilidade de Arame Ultrafino na Soldagem MIG / MAG de Chapas de Finas**, 2018. 87 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia

Resumo

Diante da variedade de diâmetros de arames disponíveis no mercado hoje para utilização no processo MIG/MAG, surge a necessidade de melhor compreensão da influência deste parâmetro no resultado final da soldagem. A busca por processos que proporcionem melhores ganhos em produtividade, taxa de deposição, fusão e redução de respingos, torna a discussão de parâmetros e consumíveis, extremamente importante durante a escolha do processo de soldagem a ser utilizado. Dessa forma, foi proposto avaliar a aplicabilidade do arame fino (\varnothing 0,6 mm) em relação ao arame de \varnothing 1,0 mm, na soldagem MIG/MAG de chapas de aço ao carbono de espessura de 3 mm, em juntas de topo (com e sem abertura), em três posições distintas: plana, vertical descendente e sobre cabeça, através de soldagem manual (processo semiautomático). Para a realização dos ensaios, foi elaborado um procedimento experimental que permitisse que os testes preliminares que objetivaram encontrar os melhores parâmetros a serem utilizados no processo, fossem realizados em uma oficina de chão de fábrica, simulando um cenário real de aplicabilidade. Na segunda etapa de testes, realizada no Laprosolda o objetivo foi traçar um comparativo entre procedimentos (soldagem com arame de 0,6 mm e 0,8 mm), através da utilização de um calorímetro de fluxo contínuo de água e sistema de aquisição de dados, mantendo a mesma metodologia utilizada na etapa preliminar. No total, foram executados aproximadamente cinquenta testes, utilizando o arame fino de \varnothing 0,6 mm e o arame convencional de \varnothing 1,0 mm. De uma forma geral, os resultados obtidos permitiram observar que o arame de \varnothing 1,0 mm aplicado na soldagem por curto-circuito, possui melhor taxa de deposição, fusão e maior aporte térmico, quando comparado ao arame de \varnothing 0,6 mm no modo de transferência spray, tornando-o mais vantajoso em diferentes aspectos.

Palavras chave: MIG/MAG, arame ultrafino, chapas finas.

Martins, R. Z. **Applicability of Ultrafine Wire in MIG/MAG Welding of Thin Plates**, 2018. 87 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia.

Abstract

Given the variety of wire diameters available on the market today for use in the MIG/MAG process, the need for a better understanding of the influence of this parameter on the final welding result arises. The search for processes that provide better gains in productivity, rate of deposition, fusion and reduction of spatter, makes the discussion of parameters and consumables extremely important during the choice of the welding process to be used. In this way, it was proposed to evaluate the applicability of thin wire (Ø 0.6 mm) in relation to the Ø 1.0 mm wire, in MIG / MAG welding of 3 mm thick carbon steel plates in top joints (with and without opening), in three different positions: flat, vertical descending and overhead, through manual welding (semi-automatic process). In order to carry out the tests, an experimental procedure was developed that allowed the preliminary tests to find the best parameters to be used in the process, to be carried out in a workshop on a shop floor, simulating a real scenario of applicability. In the second stage of the tests carried out in Laprosolda, the objective was to draw a comparison between procedures (welding with 0.6 mm and 0.8 mm wire), through the use of a continuous flow water calorimeter and data acquisition system, maintaining the same methodology used in the preliminary stage. In all, approximately fifty tests were performed, using the thin wire of Ø 0.6 mm and the conventional wire of Ø 1.0 mm. In general, the obtained results allowed to observe that the wire of Ø 1,0 mm applied in the welding by short circuit, has better rate of deposition, fusion and greater thermal input, when compared to the wire of Ø 0,6 mm in the mode of spray transfer, making it more advantageous in different aspects.

Keywords: MIG / MAG, ultrafine wire, thin sheets.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A economia mundial encontra-se cada vez mais competitiva e em busca de inovações, que viabilizem redução de custos, aumento de produtividade e sustentabilidade operacional. Diante deste cenário, diferentes tecnologias e estudos voltados a processos de soldagem têm sido discutidos e aperfeiçoados.

A soldagem MIG/MAG possui grande destaque no mercado atual, devido as características relacionadas ao processo, como por exemplo, alta capacidade produtiva originada das elevadas densidades de corrente, que por sua vez proporcionam elevadas taxas de fusão. A alimentação contínua de arame, outro fator de extrema relevância, destaca o processo MIG/MAG em relação a alta produtividade.

A soldagem MIG/MAG é diretamente influenciada pelas formas de transferência metálica: curto-circuito, goticular (spray), arco pulsado e globular. Também influenciam nos resultados, parâmetros de processo como tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem e DBCP (distância bico de contato peça). Vários estudos comprovaram também que os consumíveis de processo, como gás de proteção e diâmetro de arame utilizado, interferem de forma significativa no resultado final.

A seleção correta de parâmetros e variáveis de processo, nem sempre é uma tarefa fácil. Neste sentido, é importante ressaltar a importância de estudos voltados a soldagem, e, a tudo aquilo que direta ou indiretamente influencia nos resultados finais.

Apesar de todas as suas potencialidades, Machado (1996) destaca que o processo MIG/MAG no modo de transferência spray não é indicado para soldagem de chapas finas e em posições diferentes da plana, devido ao elevado tamanho da poça de fusão decorrente das correntes relativamente altas do processo.

Buscando verificar a aplicabilidade da soldagem MIG/MAG em chapas de 3 mm, decidiu-se então, como objeto de estudo deste trabalho, realizar soldagens com dois arames de diferentes diâmetros: Ø 1.0 mm e Ø 0.6 mm. Durante a etapa de pesquisas

preliminares, houve grande dificuldade em encontrar bibliografia referente a utilização de arames de diâmetros inferiores a 0.8 mm (apenas um trabalho foi encontrado). Neste sentido, tornou-se ainda mais interessante a realização de testes com arame fino, principalmente pela contribuição científica na área de soldagem.

Assim, neste trabalho, pretende-se verificar a aplicabilidade da utilização do arame fino (\varnothing 0,6 mm) no modo de transferência spray, em relação ao arame de \varnothing 1,0 mm por curto-circuito, na soldagem MIG/MAG de chapas de aço ao carbono de espessura de 3 mm, em juntas de topo (com e sem abertura), em três posições distintas: plana, vertical descendente e sobre cabeça, através de soldagem manual (processo semiautomático).

As conclusões aqui levantadas, servirão de complemento a bibliografia atual existente, tornando-se embasamento para possíveis trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Soldagem MIG/MAG

O processo MIG/MAG, devido a sua versatilidade, vem se destacando cada vez mais, dentro dos ambientes industriais. Diante deste cenário, se faz necessário entender e avaliar quais parâmetros influenciam diretamente no processo, e, principalmente na qualidade dos cordões de solda.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), o processo MIG/MAG se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (*Metal Inert Gas*), ou por uma mistura de um ou mais gases ativos com gases inertes (*Metal Active Gas*).

Com uma correta parametrização, o processo MIG/MAG permite realizar soldagens em todas as posições, proporcionando estabilidade de arco, altas velocidades de soldagem, pouca escória e soldas de ótima qualidade, em diferentes tipos de metais e ligas.

A forma como é feita a transferência do metal fundido da ponta do eletrodo, até a poça de fusão, é indiscutivelmente um dos pontos mais importantes dentro deste processo de soldagem. De acordo com Marques *et al.* (2011), o tipo de transferência afeta diretamente a estabilidade do arco elétrico, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, nível de respingos gerados e a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem, sendo que para Machado (1996), os principais fatores que determinam o modo com o qual o metal fundido se transfere, desde o eletrodo até a peça são: gás de proteção; polaridade e tipo de corrente (contínua ou pulsada); densidade da corrente; tensão; extensão do eletrodo após o contato elétrico;

composição química e diâmetro do eletrodo; características específicas da fonte de processo e pressão do ambiente.

2.2. Transferência Metálica

Dentro do processo MIG/MAG, podem ser observados diferentes tipos de transferência metálica, que determinam o modo como as gotas se transferem até o metal base. A Figura 1, ilustra justamente essa diferença entre descolamento de gotas, e, a seguir será explicado um pouco sobre cada um dos principais tipos de transferência.

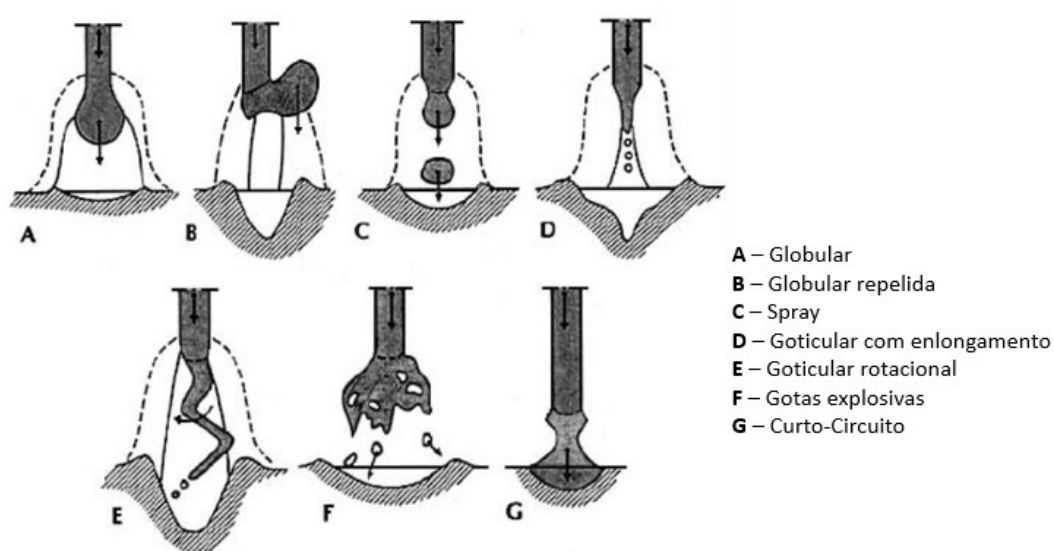


Figura 1: Tipos de mecanismos de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG, nomenclatura adaptada (Stenbacka e Persson, 1989)

a) Transferência por Curto-Circuito

Este tipo de transferência é utilizado quando deseja-se realizar soldagem de peças de pequena espessura ou fora de posição, através de baixa energia de soldagem. Neste processo, ocorre uma transferência de metal a partir de baixos valores de tensão e corrente.

Durante a transferência por curto-circuito surgem picos de intensidade de corrente que podem ser limitados pelo ajuste da fonte de energia. Esse ajuste é feito por meio de regulagem da indutância, que controla a velocidade de aumento da

corrente. A alta indutância resulta em decréscimo do número de curtos-circuitos por segundo e em aumento do tempo de arco aberto, de modo a produzir um cordão de solda liso e mais plano. Sem indutância, o efeito de estricção aparece rapidamente e a gota fundida sai violentamente da ponta do eletrodo, causando respingo.

A Tabela 1 representa os valores típicos de picos de correntes de curto-circuito, para transferência metálica. Essas faixas podem ser ampliadas dependendo do gás de proteção selecionado:

Tabela 1: Pico de corrente de curto-circuito para diferentes diâmetros de arame (Fonte: Hermes e Den Ouden, 1997)

Tipo de arame	Diâmetro do Arame		Corrente de Curto-Circuito (A)
	pol (")	mm	
Aço Carbono	0,030	0,76	300
	0,035	0,89	320
	0,045	1,10	370
	0,052	1,30	395
	0,062	1,60	430
Alumínio	0,030	0,76	175
	0,035	0,89	195
	0,045	1,10	225
	0,062	1,60	290

Um dos grandes problemas deste processo é a geração de respingo, que acarreta uma baixa capacidade produtiva, devido à perda de material depositado e necessidade de retrabalho para a sua retirada. Este problema pode ser minimizado, com um correto ajuste de indutância, propriedade a qual permite que o circuito elétrico resista à variação da corrente. Segundo Souza *et al.* (2011), esta propriedade é de extrema importância para o processo MIG/MAG quando operando em curto-circuito, pois o efeito da indutância, que é o de variar a taxa de crescimento/decrescimento da corrente, afeta diretamente o comportamento de destacamento das gotas. No processo por curto-circuito, a regularidade da transferência e, em boa parte, a formação de respingos estão fortemente relacionados ao efeito indutivo.

São citadas em bibliografia Hermans e Den Ouden (1997), três causas para instabilidade na transferência por curto-circuito:

- Curtos-circuitos instantâneos: a gota toca a poça de soldagem por um curto período de tempo, mas não há transferência de metal;
- Falha de re-ignição do arco;
- Variação na velocidade de alimentação de arame.

Considerações importantes a respeito da Transferência Metálica por Curto-Circuito, foram levantadas no trabalho de Souza *et al.* (2009), demonstram que:

- A correta seleção da tensão do arco, conseqüentemente comprimento de arco, é o que governa a parametrização para se obter soldagens com curto-circuito estável (transferência regular). Para cada velocidade de alimentação regulada haverá uma faixa de tensão adequada, a qual tem forte dependência do gás de proteção e DBCP;
- A faixa operacional com transferência regular por curto-circuito apresenta valores de tensão mais altos para misturas à base de Ar mais ricas em CO₂, mas o teor deste gás pouco influencia a corrente para uma dada velocidade de alimentação;
- O aumento da DBCP, além de fazer o valor médio de corrente cair para uma mesma velocidade de alimentação, exige a diminuição da faixa de valores de tensão para que o processo opere na melhor estabilidade;
- Mudanças na taxa de crescimento e decrescimento da corrente, por meio da regulação do controle indutivo do equipamento, não alteram significativamente os valores médios de corrente, tensão e frequência de curto-circuito (pelo menos para o equipamento usado);
- As taxas de crescimento e decrescimento da corrente afetam a regularidade da transferência, mas o grau desta influência depende do gás de proteção utilizado e da tensão de arco (do comprimento do arco);
- Por conseguinte, ao regular o processo (para um dado gás e DBCP), deve-se iniciar pela procura da faixa de tensão otimizada e, só então, procurar um ajuste fino pela regulação do efeito indutivo.

b) Transferência Globular

Este tipo de transferência ocorre, quando os valores de tensão estão acima dos valores máximos utilizados para soldagem por curto-circuito mantendo a mesma corrente. O tamanho das gotas é inversamente proporcional ao valor da corrente (quanto maior a corrente, menor o tamanho da gota), e diretamente proporcional ao o diâmetro do eletrodo.

A transferência globular não é comumente utilizada, devido a imprevisibilidade e instabilidade durante o deslocamento das gotas, podendo acarretar elevado índice de respingos, e restringindo a utilização apenas na posição plana, visto que as gotas são transferidas por efeito da gravidade.

De acordo com Cruz (2014), a transferência globular pode ser produzida com todos os tipos de gases de proteção, sendo que com a utilização de dióxido de carbono, as gotas se dispersam desordenadamente, enquanto que com os gases a base de argônio, as gotas não são tão grandes e se transferem em uma direção mais axial.

c) Transferência Goticular (Spray)

Valores de corrente de soldagem acima dos utilizados para transferência globular mantendo um arco longo. O diâmetro médio das gotas reduz, e ao alcançar a faixa conhecida como “corrente de transição” (corrente mínima necessária), a transferência ocorre por modo goticular. As gotas de metal transferidas são iguais ou menores que o diâmetro do eletrodo e em grande quantidade. Neste processo, o arco é caracterizado por uma boa estabilidade, acarretando um cordão de solda regular e com baixa quantidade de respingos (Marques *et al.*, 2012)

Segundo Machado (1996), quando comparada aos outros modos, a transferência goticular resulta numa maior penetração da solda e em melhores taxas de deposição, devido ao aumento de corrente.

Neste processo, existem várias forças de origem eletromagnética, que são maiores que a força gravitacional, que teoricamente permitem a soldagem em várias posições. Porém, por trabalhar com correntes relativamente altas, este processo não

é indicado para chapas finas e posições diferentes da plana, devido ao elevado tamanho da poça de fusão.

Para cada diâmetro e composição de arame, existe uma faixa de corrente adequada à sua utilização, isto é, para a qual a estabilidade do processo e as condições de formação do cordão de solda são satisfatórias.

Na Tabela 2, podem-se verificar as correntes mínimas de transição para a soldagem goticular (aerosol), com metal de adição de aço de baixo carbono, com diferentes diâmetros de eletrodo e gases de proteção.

Tabela 2: Faixas de corrente de transição típicas para diferentes diâmetros e gases de proteção (Fonte: Scotti, Ponomarev, 2008)

Material do arame-eletrodo	Atmosfera protetora	Diâmetro do arame (mm)	Corrente de Transição (A)
Aço-Carbono	98% Ar / 2% O ₂	0,6	130-135
		0,8	150-160
		0,9	160-170
		1	180-190
		1,1	210-230
		1,2	220-240
		1,6	260-280
	95% Ar / 5% CO ₂	0,8	135-145
		1	180-190
		1,2	230-250
		1,6	270-285
	92% Ar / 8% CO ₂	0,8	145-155
		1	190-200
		1,2	240-260
		1,6	280-295
	85% Ar / 15% CO ₂	0,8	150-160
		1	195-205
		1,2	250-270
		1,6	285-300

c) Transferência por Corrente Pulsada

Trata-se de um método proveniente de alterações controladas na corrente de soldagem que objetiva realizar a transferência do metal fundido com as características da transferência goticular, através de correntes médias com níveis menores, possibilitando o uso deste processo em chapas finas e em todas as posições.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), a corrente de base tem como meta manter o arco aberto com baixa energia. A corrente de pulso, maior do que a corrente de transição (para que se consiga a transferência do tipo goticular), tem como meta formar a gota na ponta do arame-eletrodo, e em seguida, atuar no seu destacamento, devido principalmente a um surto de força eletromagnética. A Figura 2, representa a variação de corrente em função do tempo no processo GMAW Pulsado.

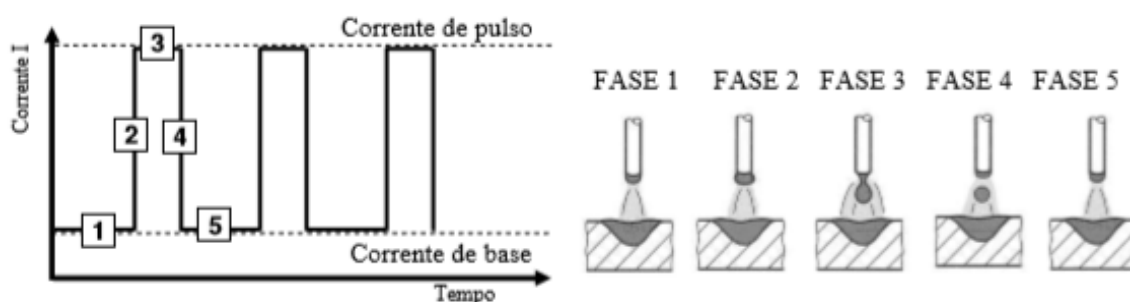


Figura 2: Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal (Fonte: Fischer, 2011)

Para facilitar a escolha dos parâmetros de soldagem neste processo, o ideal é a utilização de fontes eletrônicas de energia com controle apenas por um botão, nas quais é possível otimizar os parâmetros de pulsação da corrente de soldagem, garantindo a transferência de apenas uma gota por pulso, independente da corrente média de operação (I_m) (Marques *et al.*, 2011).

Machado (1996) diz que o desenvolvimento de novas fontes de energia controladas eletronicamente tem sido muito importante para a evolução do processo GMAW pulsado, o qual se destaca sobre o sistema convencional devido aos seguintes aspectos:

- Geração de respingos quase nula;

- Soldagem de qualquer espessura e em todas as posições;
- Fontes de potência com alta velocidade de resposta;

2.3. Consumíveis do processo

Os principais consumíveis do processo MIG/MAG são o gás de proteção e o eletrodo (metal de adição), que serão discutidos a seguir.

a) Gás de Proteção

Responsável pela proteção da poça de fusão da atmosfera, dentro do processo GMAW, exerce também outras funções, tais como efeito na abertura e estabilidade do arco elétrico, modo de transferência do metal, fusão e penetração da solda, velocidade de soldagem, acabamento e geometria do cordão. Os gases mais utilizados como argônio e hélio (inertes) e dióxido de carbono (ativo), entram neste processo com intuito de proporcionar a melhora de alguns parâmetros (por exemplo estabilidade de arco e transferência de metal, devido a presença de óxidos), (ASM Handbook, 1993).

A Figura 3 ilustra a geometria do cordão, baseada na mistura gasosa utilizada.

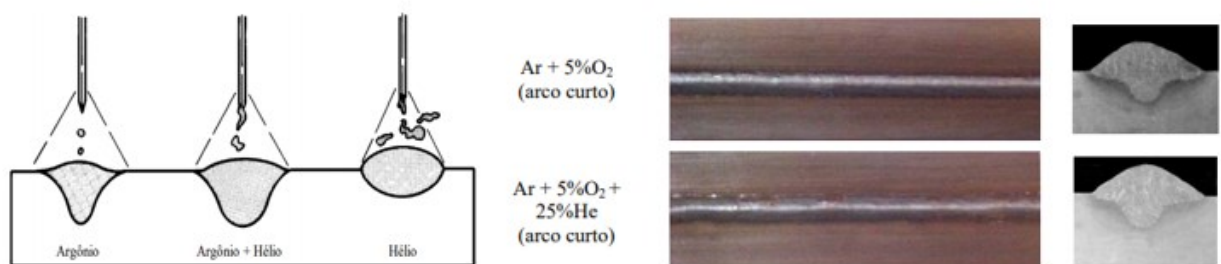


Figura 3: Tipo de penetração por gás de proteção (Morales *et al*, 2007)

Conforme Scotti e Ponomarev (2008), uma propriedade importante do gás de proteção é a sua densidade relativa em relação ao meio ambiente, conforme pode ser visto na Tabela 3. Quando o gás é mais denso do que o ar atmosférico, como o Ar (ou

suas misturas), tem uma maior facilidade em proteger a solda realizada abaixo do bocal da tocha (posição plana). A estabilidade do arco, por sua vez, é vinculada às propriedades físico-químicas dos gases de proteção, como por exemplo, o potencial de ionização, a condutividade térmica e o potencial de oxidação, conforme pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades dos gases de proteção, em comparação com o ar atmosférico

Gás	Símbolo químico	Peso Molecular	D (kg/m)	PI (eV)	CT (mW/m.K)	Cv (kJ / kg °C)
Argônio	Ar	39,9	1,78	15,80	16,40	0,31
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,0	1,98	14,40	14,70	0,66
Hélio	He	4,0	0,18	24,60	142,60	3,11
Hidrogênio	H ₂	2,1	0,07	13,50	168,30	10,17
Nitrogênio	N ₂	28,0	1,16	14,50	24,00	0,74
Oxigênio	O ₂	32,0	1,33	13,20	24,20	0,65

Onde: D = densidade do gás medida a 0° C e 1 atm, PI = potencial de Ionização, CV = capacidade específica de calor em volume constante, medida a 21,1° C e 1 atm, CT = condutividade térmica, medida a 0°C e 1 atm (Fonte: Scotti e Ponomarev, 2008)

Ainda de acordo com os mesmos autores, a capacidade de troca de calor, como o próprio nome sugere, é a capacidade de o gás conduzir calor (seja para o meio ou para a chapa a ser soldada). A alta capacidade de troca de calor dos gases como He, CO₂ e H₂, como visto na tabela anterior, favorece a eficiência de fusão (zona fundida maior).

O gás de proteção pode influenciar também, nos valores de corrente de transição das transferências metálicas, conforme visto anteriormente na Tabela 2.

b) Metal de Adição

A escolha do metal de adição deve levar em consideração propriedades metalúrgicas e mecânicas da junta, além de outros fatores como: gás de proteção utilizado, transferência metálica escolhida, posição de soldagem, meio ambiente,

propriedades da superfície do metal de base, nível de constrangimento da junta, entre outros.

A correta escolha do diâmetro do eletrodo é um item muito importante (objeto de estudo deste trabalho), sendo que esta é feita principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e de outros fatores que podem limitar o tamanho da poça de fusão ou a quantidade de calor que pode ser cedida à peça (energia de soldagem), sendo que para cada diâmetro de eletrodo existe uma faixa de corrente de soldagem adequada, de forma que o arco apresente boas condições de operação (Figueiredo, 2005).

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), quanto menor o diâmetro do eletrodo, mais difícil é sua “alimentabilidade”, mas permite soldagens com correntes mais baixas. Arames de grandes diâmetros (>1,2 mm) exigem para se tornarem viáveis (técnica e economicamente) fontes e tochas de maiores potências nominais.

2.4. Parâmetros do processo

A correta seleção das variáveis de processo permite que as soldas atendam requisitos de acabamento superficial, isenção de descontinuidades, penetração, resistência, entre outros.

As variáveis que têm influências qualitativas e quantitativas sobre as características da transferência de calor e metal, bem como sobre a geometria da solda, são definidas como parâmetros de soldagem, segundo (Cayo, 2013; Scotti, 2008 e Machado, 1996) entre outros autores, e, segundo ASM Handbook (1993), as variáveis mais importantes que influenciam na geometria do cordão de solda são a tensão do arco, a velocidade de alimentação de arame, a velocidade de soldagem, o ângulo de inclinação da tocha, diâmetro e extensão do eletrodo, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4. Influência das alterações nos parâmetros e técnicas de soldagem, no que diz respeito a penetração, taxa de deposição, área de seção reta e largura do cordão (Fonte: ASM Handbook, 1993)

Variáveis de soldagem para modificar	Modificações desejadas							
	Penetração		Taxa de Deposição		Área de seção reta do cordão		Largura do Cordão	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Corrente e Velocidade de alimentação	↑	↓	↑	↓	↑	↓	+	+
Tensão	+	+	*	*	*	*	↑	↓
Velocidade de soldagem	+	+	*	*	↓	↑	↓	↑
Extensão do eletrodo	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Diâmetro do arame	↓	↑	↓	↑	*	*	+	+
%CO ₂ no Gás	↑	↓	*	*	*	*	*	*

a) Tensão do Arco

Este parâmetro é responsável pela determinação do comprimento do arco elétrico, geometria do cordão de solda e tipo de transferência de metal. Com o aumento da tensão, a largura do cordão também aumenta, e vice-versa. Porém, quando se trabalha com elevados valores de tensão, podem ocorrer descontinuidades como porosidade e mordeduras, aumento na quantidade de respingos gerados, e, com baixos valores de tensão podem surgir sobreposições e porosidades. (Souza *et al.*, 2011)

De acordo com Scotti e Ponomarev (2008), cada tipo de processo de soldagem MIG/MAG apresenta curvas típicas de tensão de arco e corrente. A análise destas curvas pode fornecer informações sobre as características e as propriedades das fontes de energia, do cabeçote de alimentação, dos consumíveis de soldagem e até da qualidade da solda esperada. Isso explica o porquê da tensão e da corrente de soldagem serem tão atrativas para análise estatística.

b) Velocidade de alimentação do arame

Para Fortes (2005), a velocidade de alimentação de arame está diretamente relacionada à corrente de soldagem, sendo que quando esta é alterada, a corrente varia no mesmo sentido, ou seja, quanto maior for a velocidade de alimentação de arame, maior será a corrente necessária para fundir o eletrodo. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), em condição de regime, a velocidade de alimentação (V_{alim}), torna-

se igual ao consumo do arame-eletrodo (C). Caso contrário, ou o arame se enterra na poça ($C < V_{alim}$) ou o arco se estende até se apagar ou atingir o bico de contato ($C > V_{alim}$).

De acordo com Machado (1996), a corrente é o parâmetro com maior influência sobre a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e reforço do cordão. A Figura 4 ilustra a taxa de fusão em função de corrente e diâmetros de arame, proporcionando maior embasamento bibliográfico para o trabalho.

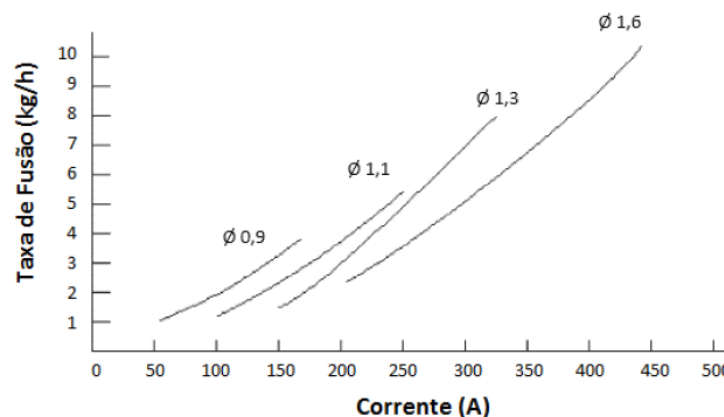


Figura 4. Taxa de fusão em função de corrente e diâmetros de arame (Fonte: Machado, 1996)

c) Extensão do eletrodo

Também denominada “stickout”, a extensão do eletrodo é a distância do bico de contato até a extremidade do arame (este em contato com o arco). Por se tratar de um parâmetro de difícil medição quando a soldagem está em execução, pode ser calculada como a distância do bico de contato e a peça.

d) Velocidade de soldagem

Este parâmetro influencia diretamente em propriedades como: geometria da poça e defeitos. Trabalhando com uma alta velocidade de soldagem (mantendo os outros parâmetros fixos), é possível verificar uma menor distorção da junta, grãos do metal mais refinados, cordões de menores dimensões e pequena zona afetada pelo calor (ZAC). Porém, velocidades muito altas podem acarretar defeitos como trincas

de solidificação e mordeduras, devido ao tempo insuficiente do arco elétrico na região soldada (baixa fusão e penetração).

A Figura 5, retirada do livro Soldagem MIG/MAG Melhor entendimento, Melhor Desempenho, dos autores Scotti e Ponomarev (2014), ilustra o comportamento de soldagem, que segundo os autores, a penetração em função da velocidade se caracteriza por uma curva com ponto máximo, ponto esse que vai depender de todos os outros fatores correlatos com penetração. De acordo com a figura, é possível entender o porquê da possível decepção de muitos engenheiros de soldagem ao procurar aumentar a penetração pela redução de velocidade de soldagem.

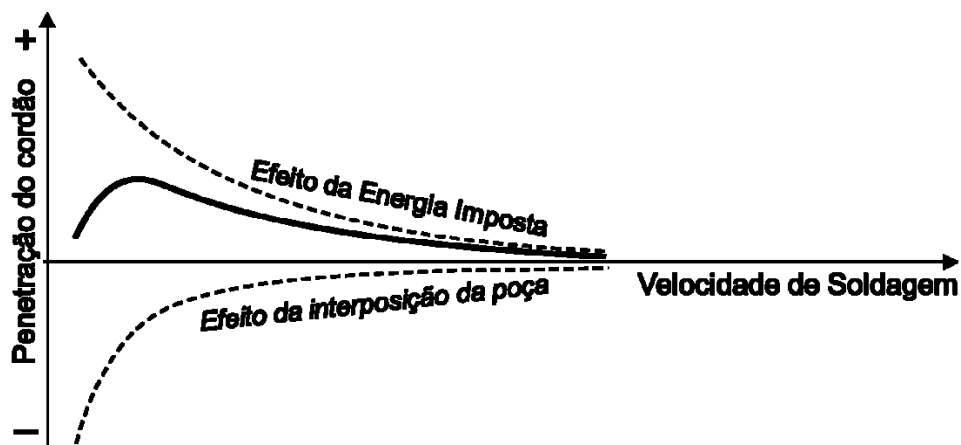


Figura 5. Balanceamento dos efeitos de energia imposta e da sobreposição da peça sobre a penetração para a velocidade de soldagem crescente. (Fonte: Scotti e Ponomarev, 2014)

A Figura 6, retirada da mesma bibliografia, mostra de forma esquematizada como se procede a produção (taxa de deposição) e as respectivas inter-relações entre os parâmetros governantes do fenômeno.

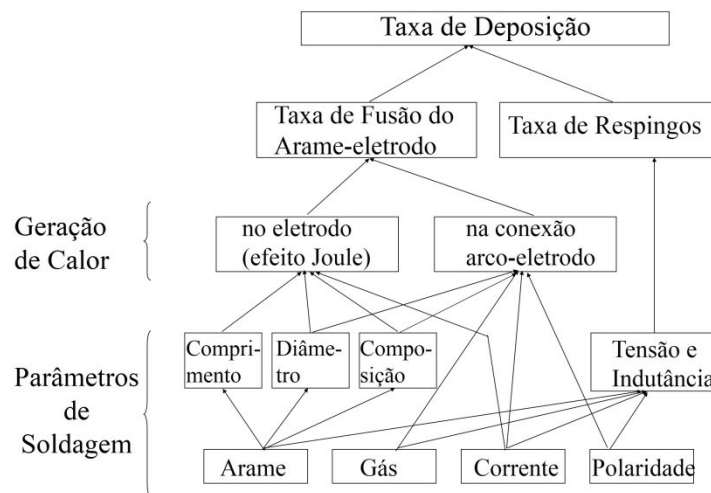


Figura 6. Representação hierarquizada do fenômeno de consumo (taxa de fusão) do arame eletrodo e consequente produção (taxa de deposição) no processo MIG/MAG (Fonte: Scotti e Ponomarev, 2008)

e) Posicionamento e deslocamento da tocha

A posição da tocha é determinada por duas direções: o ângulo relativo ao comprimento do cordão de solda, e o ângulo relativo às chapas. Desta forma, é possível classificar duas técnicas de soldagem: “puxando e empurrando”. Nas duas técnicas, existem ângulos que devem ser observados, o ângulo de ataque, formado entre a tocha de soldagem e o sentido longitudinal da junta a ser soldada, e o ângulo de posicionamento, formado entre a tocha e o sentido transversal da junta.

De acordo com o fornecedor de equipamentos e consumíveis Esab, a técnica de soldagem empurrando proporciona um cordão de solda mais largo, e um reforço menor, com menor penetração de garganta. Enquanto a técnica de soldagem puxando, proporciona um cordão de solda mais estreito, e reforço do cordão de solda e penetração de gargantas maiores. O que determina a técnica de soldagem puxando ou empurrando, são os resultados a serem alcançados, e o tipo de junta a ser soldada, conforme mostrado na Figura 7.

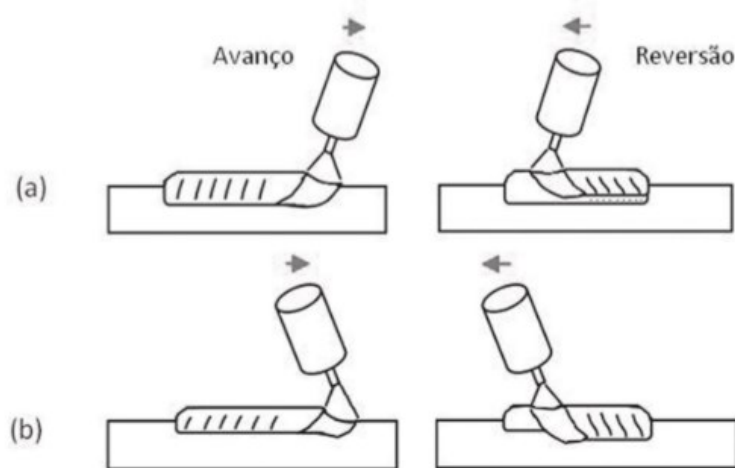


Figura 7. Ilustração das técnicas de deslocamento da tocha, onde a figura “a” representa os deslocamentos: puxando – empurrando, e a figura “b”: empurrando – puxando (Fonte: Almeida *et al.*, 2011)

f) Aporte térmico

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), normalmente o cordão de solda é caracterizado pela penetração linear e área penetrada do metal fundido no metal de base e pela largura e reforço do cordão. Ainda de acordo com esses autores, de uma forma geral, pode-se dizer que a formação do cordão se deve a dois efeitos, a saber, efeito térmico e efeito mecânico. O primeiro se deve principalmente ao acoplamento do arco elétrico com o material da peça a soldar, que se dá através de manchas catódicas. Nestas manchas, que se movimentam seguindo o arco (a tocha), devido à alta concentração localizada de corrente, há uma grande queda de tensão e uma elevada geração de calor. Este calor é transferido por condução para o metal de base, sendo parte dele usado para a fusão e o restante sendo difundido para o material ao redor da zona fundida, sem, contudo, ter energia suficiente para elevar a temperatura da região a ponto de torná-la líquida. Outra fonte de calor responsável pelo efeito térmico, é a entalpia dos gases de proteção. Quanto maior o potencial de ionização, maior a entalpia.

Por meio das Equações 1 a 3, os autores também explicam que se chama e energia de soldagem (E) a relação entre potência elétrica gasta para manter um arco, dividido pela velocidade de soldagem. Já o calor imposto (CI) representa a parcela de calor que efetivamente se transferiu para o metal base, descontando a parcela que se

perde para o meio ambiente (caracterizado pelo rendimento térmico $\eta_{\text{térmico}}$). Finalmente, o calor efetivo de fusão (CF) representa a parcela do calor imposto que realmente aquece o material a ponto de fundi-lo, deduzindo, pois, a parcela de calor que se difunde para o metal base (caracterizado pelo rendimento de fusão, $\eta_{\text{fusão}}$). A otimização operacional do processo está mais relacionada ao rendimento de fusão (formação de cordão), enquanto o rendimento térmico se vincula mais as propriedades metalúrgicas e às suscetibilidades a defeitos de solda (devido a microestruturas geradas), conforme pode ser visto nas Equações 1, 2 e 3.

$$E = \sum \frac{ui}{v_s} \quad (1)$$

$$CI = \left(\sum \frac{ui}{v_s} \right) \eta_{\text{térmico}} \quad (2)$$

$$CF = \left(\sum \frac{ui}{v_s} \right) \eta_{\text{térmico}} \eta_{\text{fusão}} \quad (3)$$

Para concluir, os autores Scotti e Ponomarev (2014), explicam que o aporte térmico está mais vinculado a geometria do arco e a propriedade dos gases de proteção, sobretudo a capacidade de troca de calor. Arcos longos, por exemplo, por um lado fazem aumentar a tensão, conseqüentemente a energia de soldagem. Mas, por outro lado, reduzem o rendimento térmico por aumentar a área lateral de troca de calor, podendo assim fazer com que o calor imposto seja menor, ou seja, menor aquecimento da chapa. O rendimento de fusão também é afetado pelo comprimento do arco, que, quanto maior, maior a área de acoplamento com o metal de base (menor densidade de corrente) e menor rendimento (ou o calor efetivo de fusão).

2.5.Descontinuidades no cordão de solda

O ajuste incorreto das variáveis e práticas inadequadas de soldagem, podem acarretar o surgimento de diferentes descontinuidades (defeitos), nos cordões de solda. A seguir serão brevemente explicadas as mais comuns:

a) Trincas

Os possíveis fatores que podem vir a gerar este tipo de defeito são: composição química incorreta do arame de solda, má qualidade do metal de base, presença de hidrogênio entre outros. A Figura 8 representa exemplos de trincas em um cordão de solda.



Figura 8. Exemplos de trincas na soldagem (Fonte: Material elaborado para o Curso de Graduação - FEMEC UFU, 2018)

b) Porosidade

Provocada por utilização de tensões muito baixas ou muito altas, transferência metálica inadequada e oscilações na velocidade de alimentação do arame. Também pode ser originada da presença de óleos, oxidação, carepa e tinta na superfície do metal de base. A Figura 9 ilustra este tipo de descontinuidade.

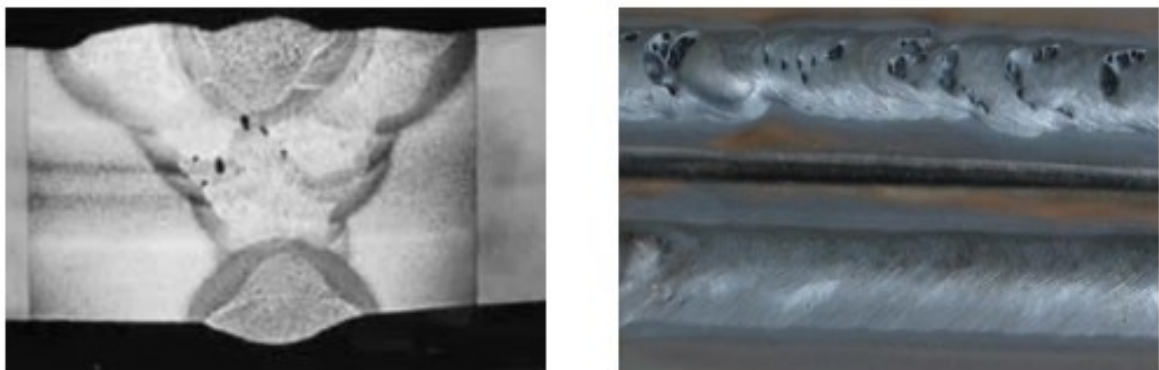


Figura 9. Exemplos de porosidades (Fonte: Material elaborado para o Curso de Graduação - FEMEC UFU, 2018)

c) Fusão incompleta

Ocorre quando em algum ponto do cordão, não houve fusão entre o metal de solda e a superfície do metal de base. É causada pelo aquecimento inadequado durante o processo de soldagem. A fusão incompleta em uma junta soldada pode facilitar o aparecimento e a propagação de trincas, pois é um grande concentrador de tensões (Marques *et al.*, 2011). Na Figura 10 é possível identificar exemplos de falta de fusão.

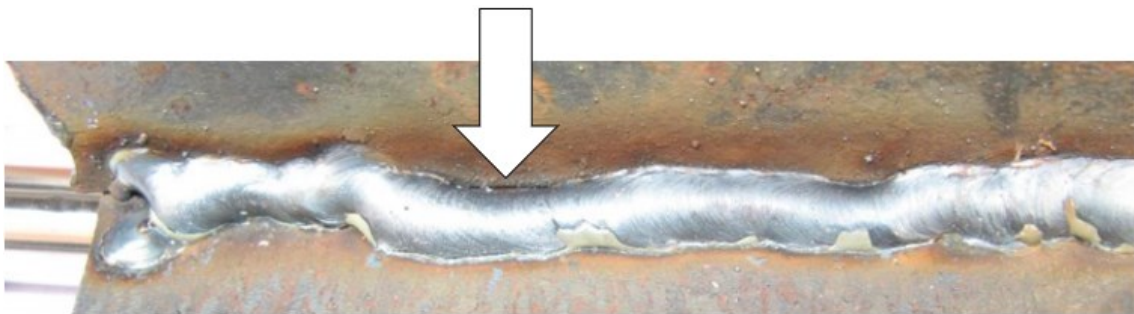


Figura 10. Exemplo de falta de fusão (Fonte: Material elaborado para o Curso de Graduação - FEMEC UFU, 2018)

c) Falta de penetração

É caracterizada pelo não preenchimento completo da raiz de uma junta soldada, ou quando não ocorre penetração suficiente na espessura do metal base. Este tipo de defeito, age como um concentrador de tensões podendo levar ao surgimento de trincas. Sua origem é proveniente de uma aplicação de corrente muito baixa ou angulação incorreta da tocha, e pode ser exemplificada pela Figura 11.

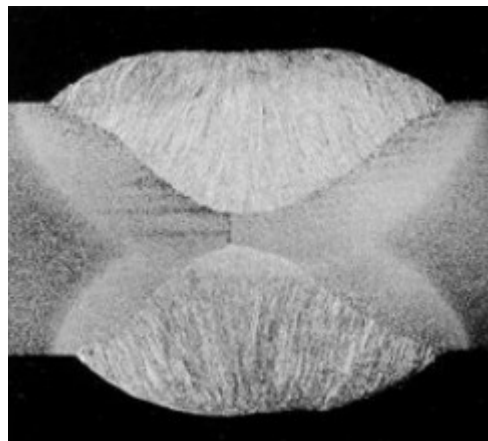


Figura 11. Exemplo de falta de penetração (Fonte: Material elaborado para o Curso de Graduação - FEMEC UFU, 2018)

d) Mordedura

Trata-se de um baixo relevo observado nas bordas do cordão de solda (Figura 12). Este defeito pode ser causado por diferentes fatores, entre eles: alta velocidade de soldagem (as forças e tensão superficial arrastam o metal fundido para o centro do cordão), tensão do arco em níveis excessivos e correntes de soldagem em valores elevados.



Figura 12. Exemplo de mordedura no cordão de solda (Fonte: Material elaborado para o Curso de Graduação - FEMEC UFU, 2018)

2.6. Prospecção sobre potencial de aplicação

Muito pouco se sabe, a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a utilização de arames ultrafinos (diâmetros entre 0.6 mm e 0.8 mm). Os materiais encontrados na bibliografia existente, abordam sempre arames de diâmetros maiores (a partir de 1.0 mm), e chapas mais espessas.

Diante deste cenário, torna-se importante aprofundar um pouco mais no processo MIG/MAG, utilizando variáveis e consumíveis até então não estudados.

No trabalho de Soderstrom e Mendez (2008), foi abordado justamente o tema da influência das variáveis de soldagem, dentre elas do gás de proteção, no processo MIG/MAG utilizando diferentes diâmetros de arames ultrafinos (ex. 0,41 mm). No trabalho destes autores, utilizou-se uma fonte de energia Miller Electric Maxtron 450

CC/CV. A programação de pulsação foi implementada na experiência dos autores e a velocidade de alimentação com opção de velocidades até 1443 in/min (36 m/min).

Ainda segundo Soderstrom e Mendez (2008), durante sua revisão bibliográfica, é citado que o que se sabe atualmente, é que a qualidade, volume de material depositado, e, geração de respingos normalmente diminuem com o aumento da utilização de CO_2 no processo. Abordou-se então a transição dos modos de transferência globular e spray, envoltos na atmosfera de Ar e CO_2 , com arames ultrafinos. A motivação deste estudo (Soderstrom e Mendez, 2008), partiu da deficiência bibliográfica nesta área, e possibilidade de poder criar um processo que evite transferência globular e respingos durante a soldagem.

Será abordado até o final deste capítulo, a metodologia adotada pelos autores (Soderstrom e Mendez, 2008), e os principais resultados obtidos.

Para utilização dos arames selecionados, tornou-se necessária a criação de um dispositivo, que permitisse a melhoria do contato durante o processo de alimentação, levando a utilização de velocidades de até 1443 in./min (36 m/min). Ao usar os arames ultrafinos ($< 0,9$ mm.), com misturas de gases de proteção contendo menos de 30% de CO_2 , a média dos diâmetros das gotículas, não se tornou menor do que os diâmetros dos arames. Á partir de composições gasosas com mais de 30% de CO_2 , a transferência se tornou predominantemente repelida, independente do diâmetro do arame.

A composição do gás de proteção, alterou o modo de transferência do metal, mesmo com todos os outros parâmetros constantes. Na Figura 13, é possível observar a influência do aumento de CO_2 , durante a transferência metálica. Quando as concentrações se aproximam de um nível crítico, o modo de transferência muda de spray para goticular repelida.

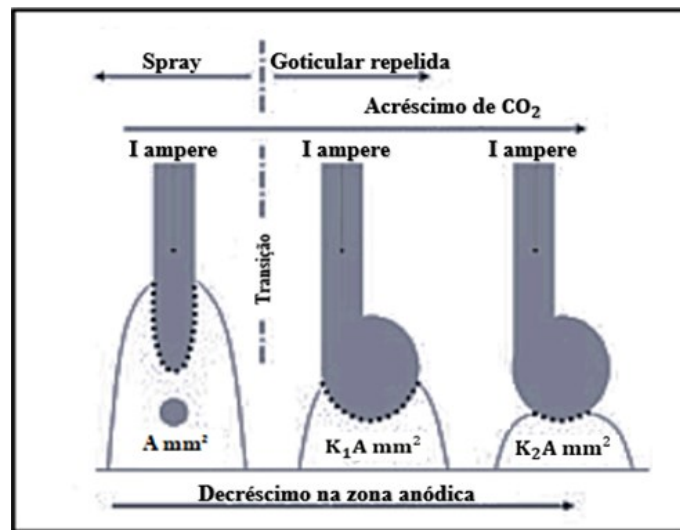


Figura 13. Efeitos do CO_2 na densidade de corrente e mudança de transferência (Fonte: Modificada de Soderstrom e Mendez, 2008)

Para os diâmetros de arame comumente utilizados na soldagem, é notada a influência do tamanho do arame em relação ao modo de transferência metálica. A Figura 14 ilustra este cenário para arames ultrafinos, destacando a forma de transferência (globular para spray).

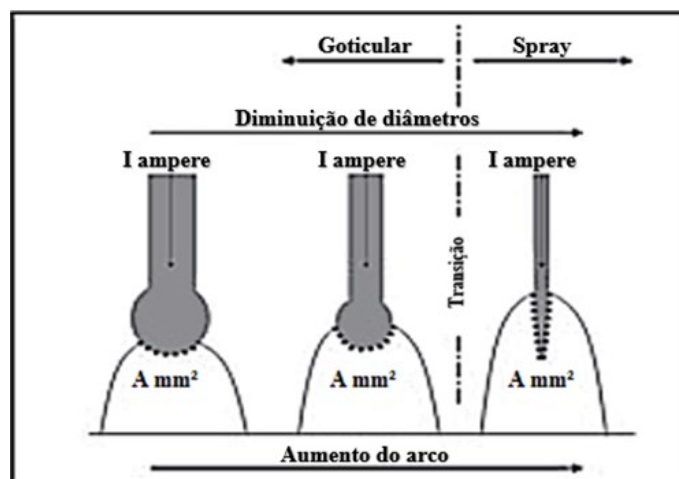


Figura 14. Efeitos da diminuição do diâmetro do arame (Fonte: Modificada de Soderstrom e Mendez, 2008)

Durante os testes, pode-se observar que a transferência goticular começa a dominar quando as concentrações de CO_2 são iguais ou mais baixas de que 30%,

para eletrodos de diâmetros 0,023 pol. (0,58 mm) e ou maiores. Para diâmetros de 0,016 pol. (0,41mm), a transferência goticular torna-se dominante a partir de 20% de CO_2 (Soderstrom e Mendez, 2008). A Figura 15 ilustra a relação entre o diâmetro médio da gota e a corrente de soldagem, para quatro diferentes arames. A princípio, a composição do gás parece não ter muita influência nas gotículas acima da corrente de transição. Composições acima de 30%, mostraram comportamento repellido durante a transferência.

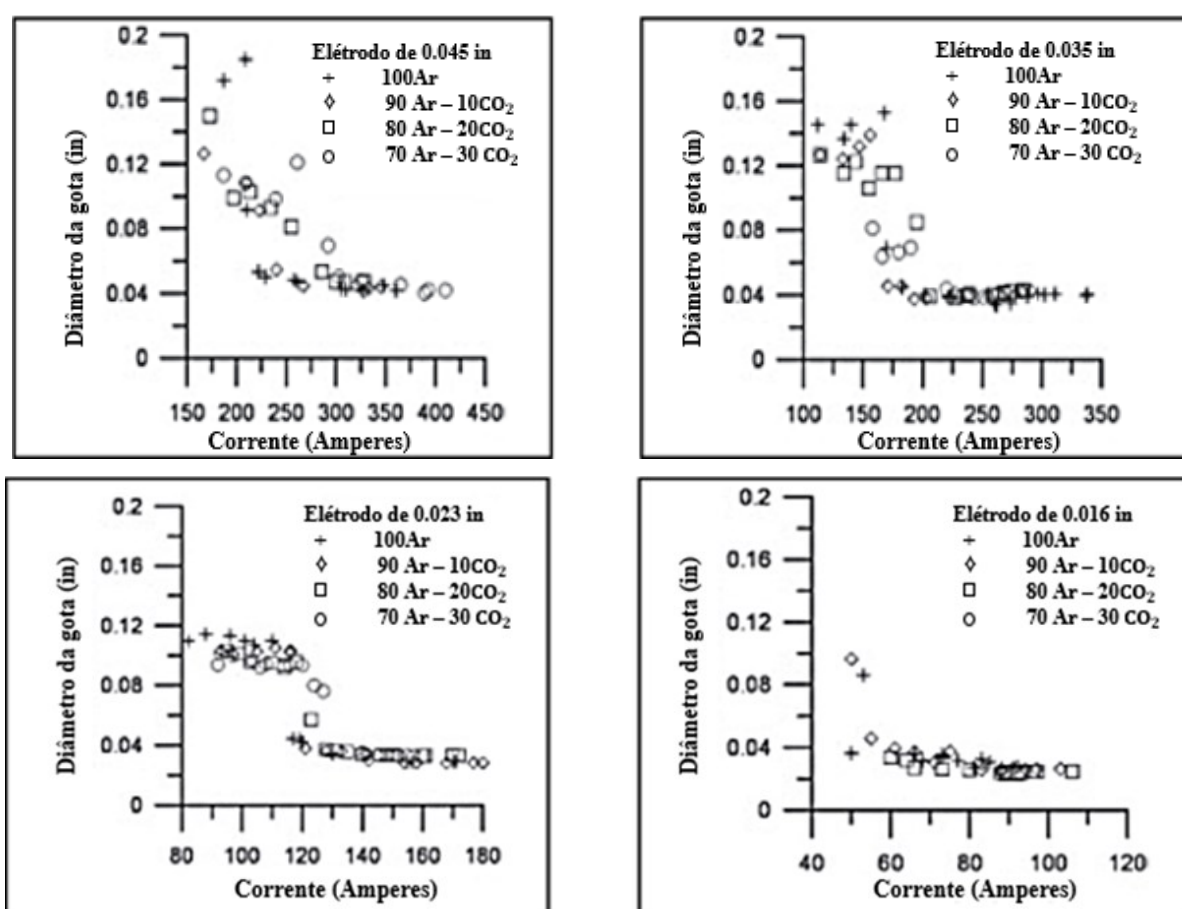


Figura 15. Relação entre o diâmetro médio da gota e a corrente de soldagem, para quatro diferentes arames. (Fonte: Modificada de Soderstrom e Mendez, 2008)

A Figura 16 mostra a relação entre diâmetro médio da gota e corrente, para diferentes diâmetros de arame. Todos os arames exibem uma transição de grandes diâmetros de gotas (baixa frequência de desprendimento), para pequenos diâmetros de gotas (alta frequência de desprendimento), com aumento da corrente (Soderstrom e Mendez, 2008).

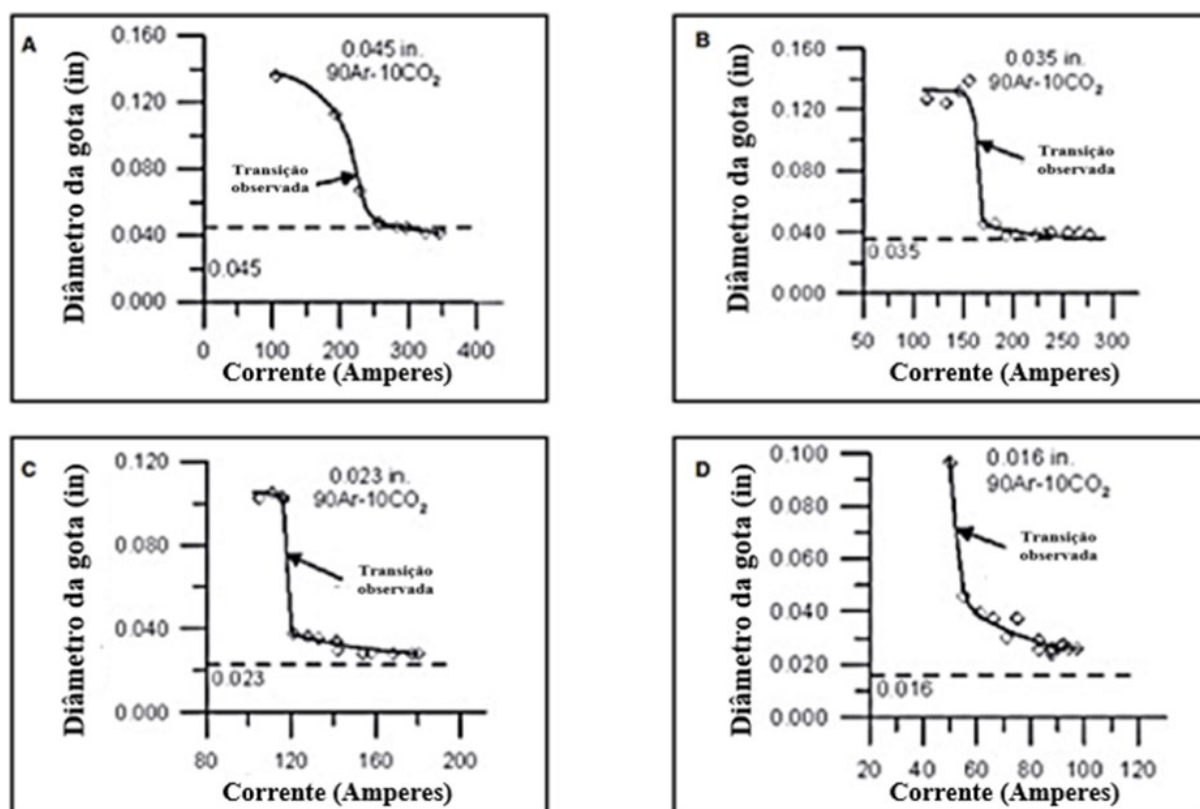


Figura 16. Relação entre diâmetro médio da gota e corrente, para diferentes diâmetros de arame (Fonte: Modificada de Soderstrom e Mendez, 2008)

A partir da revisão bibliográfica apresentada (Soderstrom e Mendez, 2008), foram traçadas algumas conclusões:

- Com 30% de CO₂, o processo apresentou transferência globular para arames de diâmetro de 0,045-0,035 e 0,023 pol (1,14-0,89 e 0,6 mm). Para arames de 0.016 pol. (0,40 mm), durante a transferência globular, o tamanho médio das gotas cresceu mais do que o diâmetro do eletrodo, e sugere-se que a constrição do arco pode causar uma força ascendente que ocasiona a “flutuação” da gota;
- A corrente média usada para definir a transição dos processos de transferência, não é significativamente afetada pela quantidade de CO₂, para arames de diâmetro 0.023 e 0.035 pol. (0,6 e 0,9 mm), apresentando significância a partir de 0.045 pol (1,14 mm);
- A classificação de transferência curto-circuito e globular, variou em função dos diâmetros dos arames utilizados no processo. No entanto, estas definições não

podem ser utilizadas para diâmetros inferiores a 0.035 pol. (0,89 mm), pois todos os eletrodos exibiram um aumento na frequência de desprendimento das gotas, bem como transição de tamanho das mesmas. O tamanho médio das gotas ainda é maior que o diâmetro do arame (aproximadamente duas vezes), independente da corrente.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL, EQUIPAMENTOS E INSUMOS

Serão apresentados a seguir, a metodologia utilizada durante os ensaios, seleção de parâmetros, equipamentos, acessórios, consumíveis, bem como todas as dificuldades encontradas durante a execução deste trabalho.

3.1. Metodologia

O objetivo desta dissertação, é a avaliação da aplicabilidade do arame fino (\varnothing 0,6 mm) no modo de transferência spray, em relação ao arame de \varnothing 1,0 mm por curto-circuito, na soldagem MIG/MAG de chapas de aço ao carbono de espessura de 3 mm, através de soldagem manual (processo semiautomático).

Todas as soldas foram realizadas em juntas de topo (com e sem abertura), em três posições distintas: plana, vertical descendente e sobre cabeça.

Buscando um cenário real de aplicabilidade, que pudesse demonstrar todas as potencialidades e limitações deste processo, a primeira etapa de testes foi realizada em oficina mecânica convencional, fora do Laprosolda/UFU.

Durante a realização dos ensaios, além das variações de posições de soldagem, foram alterados também, os valores de velocidade de alimentação e tensão. Para registro dos resultados, uma tabela contendo as seguintes informações: tensão do arco (V), corrente (A), velocidade de alimentação (m/min), velocidade de soldagem (cm/s), abertura (com / sem), foi elaborada.

Foram calculados a energia de soldagem (J/cm), energia líquida de soldagem (J/cm), potência (W), metal fundido (mm³).

Um fator de extrema relevância, que deve ser também verificado neste tipo de comparação de processo, é o aporte térmico gerado pela variação do diâmetro de arame. Para esta aquisição de dados, devido a necessidade de equipamentos específicos, foi utilizado o Laprosolda/UFU, na realização dos testes finais.

A seguir, será apresentada a bancada experimental e os acessórios que foram utilizados ao longo dos ensaios. A grande particularidade desta metodologia experimental foi a necessidade de adequação de vários acessórios para viabilizar a utilização do arame fino.

3.2. Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem MIG/MAG utilizada na primeira fase deste trabalho (oficina mecânica), foi da marca Lincoln Electric, modelo CV 400-I, com leitor digital e ajuste manual de valores de tensão e corrente. A Figura 17 representa a fonte utilizada, e a Figura 18 as especificações técnicas da mesma.

O alimentador de arame, também da marca Lincoln Electric, foi do modelo LN-742.

Na segunda fase deste trabalho, realizada nos laboratórios do Laprosolda, foi utilizada uma fonte IMC Universal 450, com o alimentador de arame IMC STA-20 (4 roletes de arraste), conforme Figura 19.



Figura 17. Equipamento de soldagem utilizado no trabalho (1 Fonte de Soldagem, 2 Alimentador de arame, 3 Bobina de Arame, 4 Mistura Gasosa)

TENSÃO DE ENTRADA

40 a 42V ±10%, 50/60 Hz, 4.0 Amps

VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME

SISTEMA	FAIXA DE VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO
LN-742	50 in. a 770 in. por minuto (1.25 a 19.5 m/min)
LN-742H	80 in. a 1200 in. por minuto (2.00 a 30.5 m/min)

DIÂMETROS DE ARAME

SISTEMA	ARAME	DIÂMETROS
LN-742	SÓLIDO	0.025 in. 1/16 in. (0.6 a 1.6 mm)
LN-742H	SÓLIDO	0.025 in. a 0.045 in. (0.6 a 1.2 mm)
LN-742	TUBULAR	0.045 in. a 3/32 in. (1.2 a 2.4 mm)
LN-742H	TUBULAR	0.045 in. (1.2 mm)

Figura 18. Especificações técnicas do alimentador de arame



Figura 19. Bancada experimental do Laprosolda (1 - Sistema de Aquisição de dados, 2 - Fonte de Soldagem, 3 - Alimentador de Arame, 4 - Tocha de cabo curto)

É possível notar na Figura 19, que o comprimento da tocha utilizada neste trabalho (tocha de cabo curto), não trouxe mobilidade e conforto para o soldador envolvido no processo de soldagem.

3.3. Arame e Roletes de Arraste

Os arames utilizados durante os testes foram \varnothing 0.6 mm (AWS A5.18 ER70S-6, que possui em sua composição química em percentual: C: 0,06 a 0,15 Si: 0,8 a 1,15

Mn: 1,4 a 1,85 P: 0,025 máx. S: 0,035 máx. Cu: 0,5 máx), e Ø 1.0 mm (classe AWS A5.18 ER70S-6).

Em virtude da escassez bibliográfica referente à utilização de arames ultrafinos no processo de soldagem MIG/MAG, houve uma grande dificuldade no início dos testes, em relação ao ajuste de equipamento e parâmetros. A Figura 20, ilustra a diferença entre os diâmetros dos arames utilizados neste trabalho.

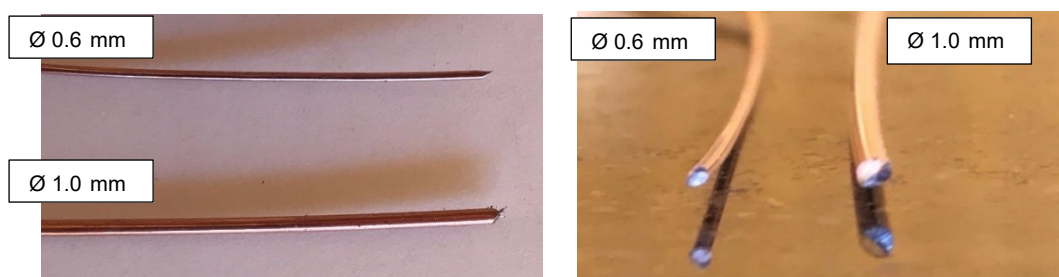


Figura 20. Ilustração comparativa dos arames de Ø 0.6 mm e Ø 1.0 mm

A utilização de altos valores de tensão (28 V – 30 V), tornou necessária a utilização de alta velocidade de alimentação do arame (15 m/min – 19 m/min). Esta elevação de velocidade em conjunto com uma fonte de soldagem inadequada (antiga e com componentes inadequados), fez com que nos testes preliminares (realizados na oficina mecânica), o arame embolasse dentro do alimentador de arame, antes de chegar à tocha. A Figura 21, ilustra este problema relatado.



Figura 21. Arame embolado retirado do equipamento

Para a resolução deste problema, foram adequados os roletes de arraste, visto que os disponíveis na oficina eram para utilização de diâmetros superiores. Este problema detectado, pode ser explicado pela bibliografia de Scotti e Ponomarev (2008), que afirma que como via de regra, o arame deve sempre passar no rasgo do fundo, cujo diâmetro nominal é marcado na face lateral oposta (que fica de frente). Para cada tipo e diâmetro de arame-eletrodo, deve-se usar roletes específicos e não danificados e a pressão apropriada. Os problemas de alimentação passam muitas vezes, na prática, despercebidos e consequentemente o problema de instabilidade é enfrentado, sem sucesso, ajustando parâmetros de soldagem. A Figura 22, ilustra os erros típicos na escolha de roletes.

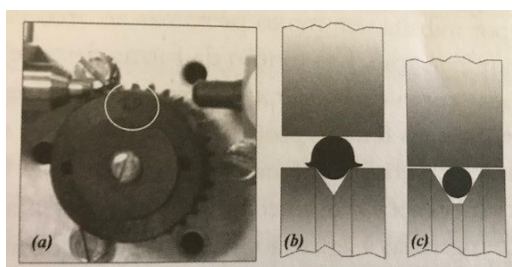


Figura 22. (a) Exemplo de indicação do diâmetro nominal de arame na face do rolete e consequentes erros típicos na escolha destes, onde, (b) a pista do rolete-tracionador é estreita demais para o diâmetro do arame, enquanto em (c) a pista do rolete tracionador é larga demais. (Fonte: Scotti e Ponomarev, 2014)

Em relação aos testes finais realizados no Laprosolda, não foi detectado nenhum problema durante a execução, visto que desde o início trabalhou-se com a correta configuração do equipamento (utilização dos roletes para arame 0.6 mm, tocha de cabo curto, bico de contato adaptado para arame 0.6 mm e bocal longo).

3.4. Bico de Contato

Vários fornecedores foram consultados, e devido à grande dificuldade em se obter bicos de contato específicos para arame de Ø 0.6 mm, optou-se por utilizar bicos de contato para Ø 0.8 mm. Para melhorar o contato entre bico e arame, evitando qualquer problema durante a soldagem, foi realizado um pequeno corte no bico com posterior amassamento, promovendo um estreitamento na abertura do mesmo. Apesar do amassamento não deixar o furo no formato circular correto (ocorreu uma ovalização),

foi observada grande melhora na passagem do arame e qualidade durante a soldagem.

Uma grande dificuldade da soldagem com arame fino foi o controle do processo, devido aos elevados valores de tensão (extensões curtas de eletrodo) e corrente utilizados. Em alguns momentos, na fase preliminar de testes (oficina mecânica em Araxá), essa elevação das variáveis e erros de soldagem, ocasionaram o derretimento dos bicos de contato. Na maioria dos casos, os bicos precisaram ser descartados devido ao dano irreversível sofrido. A Figura 23 apresenta alguns dos bicos que precisaram ser substituídos.



Figura 23. Bicos danificados devido aos elevados valores de tensão

Com o intuito de promover uma melhor estabilidade do processo, foi testada uma mistura gasosa especial: $\text{Ar} + 5\%\text{O}_2$. Durante esta utilização, o derretimento dos bicos de contato foi mais incidente, provavelmente por erros durante a soldagem proveniente da falta de habilidade do soldador em relação a utilização de arame fino e mistura gasosa diferente da convencional. Desta forma, proporcionando um cenário mais comum de soldagem, optou-se por trabalhar apenas com a mistura $\text{Ar} + 25\%\text{CO}_2$.

Em relação a DBCP, tanto na fase preliminar quanto na etapa final de teste, foram mantidos valores entre 10 mm a 13 mm. Por se tratar de uma soldagem manual (processo semiautomático), estes valores com certeza sofreram oscilações durante as soldas realizadas, o que pode ter afetado de alguma forma, os resultados finais obtidos.

3.5. Mistura Gasosa

Buscando promover um cenário real de aplicabilidade da soldagem com arame ultrafino, a mistura gasosa utilizada na fase preliminar deste trabalho foi Ar + 25%CO₂ da empresa White Martins. Trata-se de uma mistura convencional em oficinas de soldagem, com custo de aquisição relativamente baixo quando comparado aos gases especiais.

A vazão utilizada durante a soldagem manteve-se entre 10 l/min a 13 l/min. Esta variação de vazão surgiu da curiosidade em verificar se o aumento ou diminuição da mesma causava impacto significativo durante o processo. Nenhuma alteração foi perceptível.

Em relação aos testes finais realizados no Laprosolda, o gás utilizado foi o 92%Ar + 8%CO₂ devido a disponibilidade no momento.

3.6. Tocha

Durante o desenvolvimento de estudo feito por um aluno de graduação no laboratório Laprosolda, constatou-se que não era possível utilizar o comprimento de cabo de tocha convencional nas soldagens feitas com arames ultrafinos, devido aos elevados valores de velocidade de alimentação do arame (superiores a 15 m/min). Neste trabalho, por exemplo, em alguns momentos foram utilizadas velocidades de alimentação do arame de 20, 7 m/min.

Ao utilizar os comprimentos convencionais, variando de 2,5 m a 5 m, foi possível observar o arame embolando várias vezes dentro do alimentador, antes de entrar na tocha.

Com o intuito de sanar este problema, optou-se pela utilização de uma tocha experimental com comprimento de cabo de 0,5 m, conforme Figura 24. Esta nova medida, proporcionou a viabilidade da soldagem em grandes velocidades e com arame fino.

A tocha de cabo curto foi utilizada tanto na fase preliminar de testes (oficina mecânica), quanto na fase final realizada no Laprosolda.



Figura 24. Tocha experimental desenvolvida para os trabalhos com altas velocidades de soldagem

3.7. Multímetro

A fonte de soldagem utilizada na fase preliminar deste trabalho (oficina mecânica) possuía ajuste manual de tensão e corrente, com visor digital para acompanhamento em tempo real dos valores que estavam chegando ao processo, conforme pode ser visto na Figura 25.



Figura 25. Fonte de soldagem com leitor digital

Com o intuito de confirmar a veracidade destes valores, nos testes preliminares utilizou-se multímetro para a conferência. Foram verificados um ponto próximo à saída do alimentador de arame, e o outro ponto, na chegada da tocha. A Figura 26 representa o multímetro utilizado na etapa preliminar.

Após a confirmação de confiabilidade do equipamento (valores iguais entre multímetro e leitor digital da fonte), optou-se por acompanhar apenas pela própria fonte de soldagem. Em relação a velocidade de soldagem, na etapa preliminar de testes, a mesma foi controlada através da utilização de um cronômetro digital.



Figura 26. Multímetro utilizado nos testes preliminares

Na segunda etapa de testes, realizada no Laprosolda, foi utilizado um sistema de aquisição de dados, permitindo a geração de oscilogramas e acompanhamento dos valores de tensão, corrente e velocidade de soldagem.

3.8. Corpos de Prova

Os corpos de prova foram fabricados a partir de aço ao carbono 1020, com espessura de chapa de 3 mm, 15 cm de comprimento e 7,5 cm de largura.

Para união dos mesmos, realizou-se o ponteamento das extremidades, deixando abertura quando necessária ao teste (aberturas de 1, 2 e 3 mm), e sem abertura, conforme o andamento da metodologia experimental. Antes da soldagem, todos os corpos de prova eram limpos, para a remoção de oxidações superficiais

Ao total, foram utilizados em torno de 50 corpos de prova, exemplificados na Figura 27.



Figura 27. Corpos de prova utilizados no trabalho

3.9. Macrografia

Para este trabalho optou-se por realizar uma macrografia dos corpos de prova, com o intuito de verificação da homogeneidade da solda, distribuição e natureza de falhas, penetração e fusão. Com estas informações, o embasamento para a discussão sobre aplicabilidade de arames ultrafinos, se torna ainda mais concreto.

3.10. Cortadora Metalográfica

Como o intuito da macrografia é observar os resultados da região soldada, tornou-se necessário realizar o corte do corpo de prova, para que uma região central do cordão pudesse ser selecionada e preparada para análise microscópica. O tamanho da amostra foi baseado na capacidade geométrica da embutidora. A Figura 28 ilustra o equipamento utilizado para o corte das amostras (Marca CM60, fornecedor Teclago Indústria e Comércio Eireli).



Figura 28. Cortadora metalográfica utilizada no estudo - Marca CM60, fornecedor Teclago Indústria e Comércio Eireli

3.11. Embutimento

Realizado para facilitar o manuseio da peça, evitar a danificação da lixa e abaulamento da superfície. Optou-se por realizar o embutimento a quente, através da utilização de uma Embutidora Fortel 35, e, da resina sintética baquelite (quimicamente estável e resistente ao calor). A Figura 29 representa a embutidora e resina utilizadas neste trabalho.

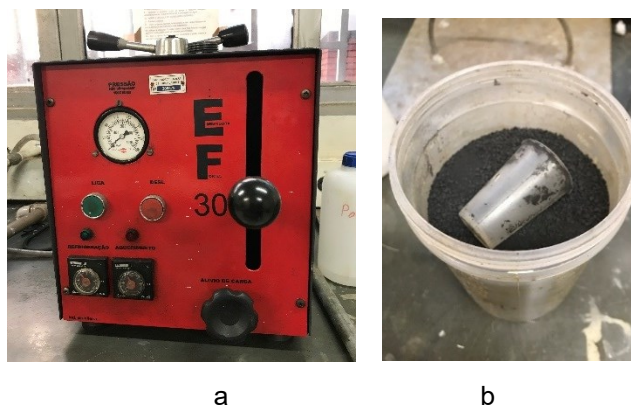


Figura 29. Embutidora Fortel utilizada no trabalho (a) e Resina baquelite utilizada no embutimento de amostras (b)

3.12. Lixamento

O lixamento dos corpos de prova foi realizado com o objetivo de eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, promovendo um melhor acabamento superficial, facilitando a etapa seguinte de polimento. Foram utilizadas lixas de granulometria: 40, 80, 150, 220, 320, 400, 600 e 1200. A variação granulométrica buscou promover a melhora da rugosidade superficial das amostras.

3.13. Polimento

Realizado após o lixamento, com o objetivo de deixar o acabamento superficial polido isento de qualquer tipo de marca, conforme Figura 30.

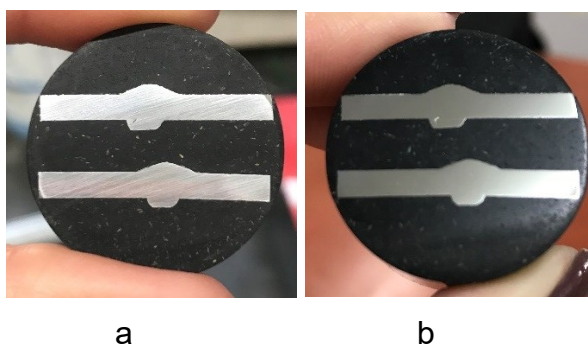


Figura 30. Amostra após o lixamento (a), enquanto que a segunda representa o resultado final após o polimento (b)

Antes de iniciar a etapa de polimento, a amostra foi limpa com álcool etílico, para remoção de qualquer traço abrasivo, poeira ou outro tipo de contaminante que pudesse vir a comprometer a integridade superficial.

O polimento das amostras foi realizado através da utilização de uma Lixadeira e Politriz modelo PLF, com adição do abrasivo de Alumina Azul nº 1, conforme pode ser visto na Figura 31.

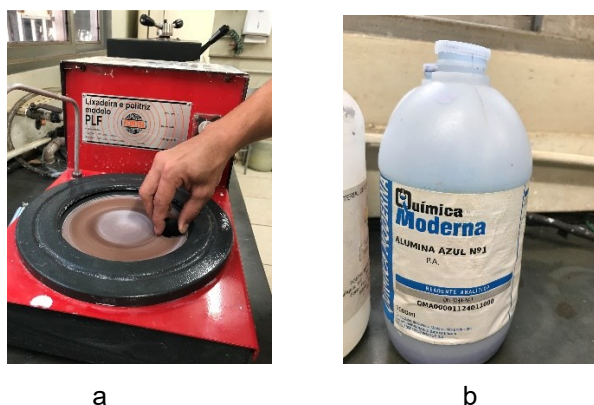


Figura 31. Lixadeira e Politriz utilizada no trabalho (a), e, o abrasivo adicionado (b)

3.14. Microataque

Executado com o objetivo de evidenciar a macroestrutura, permitindo observar a olho nu ou através da utilização de microscópio, as características da região soldada.

Neste trabalho, o ataque foi realizado com Nital (aplicação durante 10 segundos), e posterior remoção com Álcool Etílico Absoluto, conforme exemplificado na Figura 32.

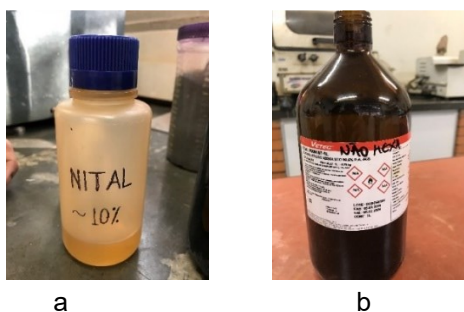


Figura 32. Produtos utilizados para ataque químico das amostras, Nital (a) e Álcool Absoluto (b)

Após o ataque químico, imediatamente já é possível observar a definição da região soldada, zona afetada pelo calor e descontinuidades; conforme Figura 33.

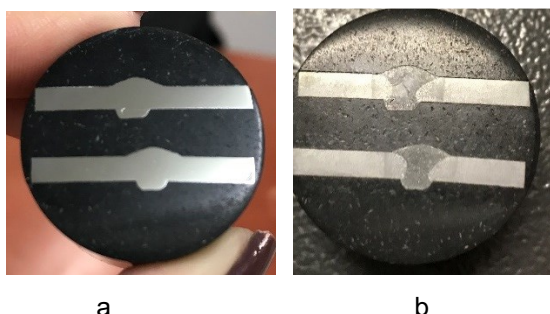


Figura 33. Antes (a) e depois do ataque químico (b)

Para captura de imagens mais precisas, foi utilizado o programa Macrografia Olympus Stream, que capta as imagens a partir do microscópio, e as projeta na tela do computador, permitindo ajustes de imagem (resolução, brilho, etc) e o salvamento de arquivos. Os equipamentos utilizados podem ser vistos na Figura 34.

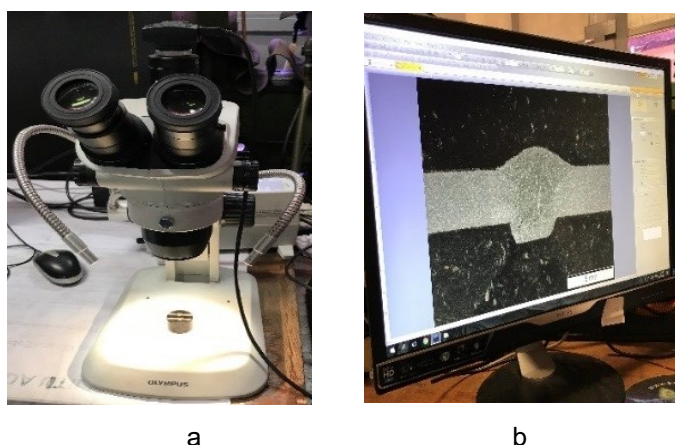


Figura 34. Microscópio óptico (a) e tela do computador utilizados para captura de imagens (b)

3.15. Calorímetro

Utilizado para o estudo empírico (experimental) da eficiência térmica durante o processo de soldagem, consiste em um sistema que promove a medição de transferência de calor. Segundo Sgarbi (2013), os resultados que são obtidos empregando os métodos calorimétricos experimentais, mostram grande nível de satisfação, pelo fato de nelas estarem contidas as principais variáveis do processo de soldagem e os métodos numéricos e analíticos são muito limitados ao modelo utilizado

e às aproximações realizadas. Entre os calorímetros mais utilizados para esse tipo de estudo, dois se destacam: o calorímetro de água que é baseado no monitoramento da temperatura da água, e, o calorímetro de nitrogênio líquido que quantifica o aporte térmico através da massa evaporada nitrogênio.

O calorímetro utilizado na medição da eficiência térmica e aporte térmico deste trabalho, foi o de fluxo contínuo de água. Nesse calorímetro, um fluxo constante de água (4,3 l/min) passa por um tubo que contém uma resistência elétrica localizada ao longo do eixo longitudinal. A potência é regulada pela tensão e corrente da resistência elétrica. O fluxo tem um aumento de temperatura quando passa pela resistência elétrica, e as temperaturas são medidas por dois termopares na entrada (T1) e na saída (T2). A Figura 35 mostra o funcionamento desse tipo de calorímetro.

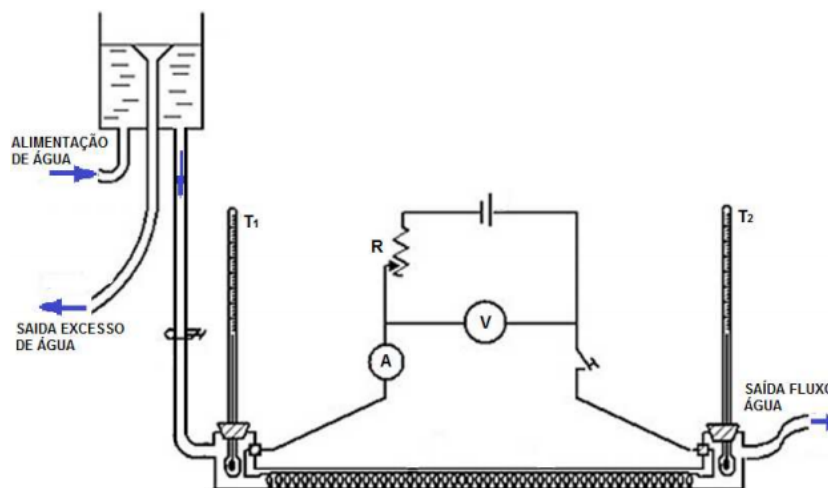


Figura 35: Sistema de funcionamento do calorímetro de água (Fonte: Sgarbi, 2013)

A eficiência térmica do processo de soldagem é definida como a porção quantitativa de energia do arco transferida para o material de base e de acordo com Dupont e Marder (1995), pode ser calculada pela equação:

$$k = \int_0^{\infty} W * C_{pw} * (T_{2w} - T_{1w})dt / U_a * I_s * t \quad (4)$$

Onde,

W : Fluxo mássico de alimentação de água, [kg/s];

C_{pw} : Calor específico da água [Kj/Kg · °C]

T_{2w} : Temperatura da água no ponto de saída, [°C];

T_{1w} : Temperatura da água no ponto de entrada, [°C];
 t : Tempo de soldagem, [s];
 U_a : Tensão de soldagem, [V];
 I_s : Corrente de soldagem, [A].

No sistema utilizado neste trabalho, o fluxo de água foi contínuo e mantido constante. A evolução da temperatura do fluxo de água foi registrada utilizando termopares que mostram a diferença de temperatura do fluxo na saída e na entrada do calorímetro, durante o período que engloba o tempo de soldagem e o tempo do seu posterior resfriamento até retornar à temperatura ambiente.

O calorímetro foi totalmente vedado para que não ocorresse nenhuma fuga de água, e também revestido por uma manta térmica com objetivo de evitar fugas de calor. A fixação da chapa é dada através de 6 parafusos, conforme Figura 36:

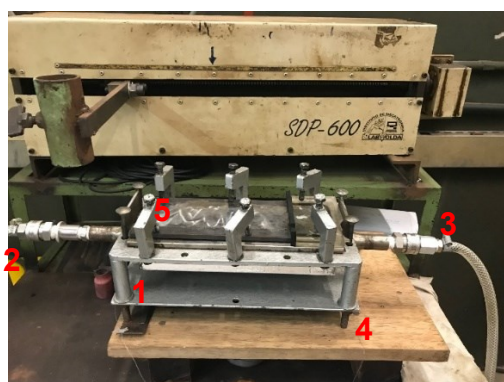


Figura 36. Mesa de coordenada utilizada para realização dos experimentos: 1-Calorímetro, 2- entrada de água vinda do reservatório, 3- Saída de água, 4- Suporte, 5- Placa teste

A chapa metálica deve ser colocada de tal maneira que a região onde ocorre a solda esteja continuamente em contado com água para que ocorra a troca de calor entre o fluxo de água e a chapa. Um pedaço de acrílico (Figura 37) na extremidade da saída do calorímetro, permite verificar a formação de bolhas de ar. A presença da bolha indica a presença de ar entre a chapa e a água, sendo assim, quanto menor a bolha, melhor para o processo.



Figura 37. Calorímetro apresentando presença de bolha de ar

Os resultados obtidos geram oscilogramas que permitem a análise de valores de tensão, corrente e variação de temperatura.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Primeira etapa de testes

A etapa de testes preliminares foi realizada em uma oficina mecânica na cidade de Araxá, buscando retratar a realidade do “chão de fábrica” e aplicabilidade real do processo, através de soldagem manual (processo semiautomático) por meio de uma fonte convencional, mistura gasosa de fácil aquisição, tocha de cabo curto (fornecida pelo Laprosolda), e, auxílio de um soldador qualificado. Nesta etapa, o objetivo foi encontrar os parâmetros ideais para a soldagem MIG/MAG com arame fino (valores de tensão e velocidade de alimentação) no processo de transferência goticular (spray).

Partindo de parâmetros utilizados em soldagem por curto-circuito, os valores de tensão e corrente foram aumentados gradativamente, até que se atingisse a transferência spray (atingisse valores de tensão e corrente determinados em bibliografia para este tipo de transferência). Vale ressaltar a dificuldade no manuseio da tocha, em virtude do seu curto comprimento, que em vários momentos limitou a movimentação do soldador e dificultou o controle correto da DBCP (definido para todos os testes valores entre 10 mm e 13 mm). Em relação a velocidade de soldagem, como nessa fase não havia um sistema de aquisição de dados, a mesma foi calculada a partir de valores obtidos em um cronômetro digital.

Após a definição dos melhores parâmetros foram realizadas novas soldagens, ainda dentro desta etapa, com a finalidade de fabricação de amostras para análise visual e macrográfica (realizada no Laprosolda). Todos os resultados encontrados durante esta fase, serão apresentados a seguir.

4.1.1 Testes com arame de 0.6 mm e transferência spray (Oficina Mecânica)

Nos primeiros testes foi utilizada a mistura gasosa Ar + 5% O₂, com o intuito de verificação da influência deste gás na corrente de transição spray. Foi constatada grande instabilidade do arco e derretimento dos bicos de contato, ocasionados pelos elevados valores de tensão e corrente do processo, além da falta de habilidade do soldador em se trabalhar com este tipo de arame e mistura gasosa. Em alguns momentos, os corpos de prova foram perfurados em virtude do calor imposto.

Não foi possível capturar valores reais de velocidade de soldagem, visto que o processo foi interrompido várias vezes, devido a dificuldade de controle durante a soldagem. Os parâmetros utilizados podem ser verificados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros dos testes de soldagem com arame fino (Ø 0,6 mm), mistura gasosa Ar + 5%O₂ abertura de 1mm, soldagem manual e posição plana

Teste	Tensão Média do Arco (V)	Corrente Média (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Posição	Vazão do Gás
1	26	190	15,29	Plana	13 l/min
2	28	215	17,3	Plana	13 l/min
3	30	280	18,4	Vertical	13 l/min
4	22	115	14,4	Vertical	10 l/min
5	24	136	14,4	Vertical	10 l/min
6	24	215	10,4	Vertical	10 l/min

A mistura gasosa Ar + 5% O₂ foi então substituída por Ar + 25% CO₂, buscando promover um cenário real de aplicabilidade do processo no chão de fábrica (gás comumente utilizado nas oficinas mecânicas). Como os primeiros testes serviram para que o soldador se acostumassem com os parâmetros de soldagem, nos testes que serão apresentados a seguir, houve uma melhora no controle do arco e demais fatores.

Os primeiros testes realizados com a nova mistura gasosa (Ar + 25% CO₂), foram realizados na posição plana, e o intuito foi alcançar o modo de transferência spray para arame fino (Ø 0,6 mm), a partir do aumento gradativo dos valores de tensão e velocidade de alimentação (partindo da transferência por curto-circuito). Como toda

esta etapa preliminar de testes foi realizada fora do Laprosolda e não contou com um sistema de aquisição de dados, o que foi feito para garantir a transferência spray, foi aproximar dos valores de tensão e corrente citados em bibliografia, para este tipo de transferência. A Tabela 6 ilustra alguns dos parâmetros de testes realizados.

Tabela 6. Parâmetros dos testes realizados com arame fino (\varnothing 0,6 mm), na posição plana, com elevação dos valores de tensão e velocidade de alimentação, soldagem manual, mistura gasosa Ar + 25%CO₂ e abertura de 1 mm

Teste	Tensão Média do Arco (V)	Corrente Média (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Vazão do Gás
7	18	70	8	10 l/min
8	21	80	10	10 l/min
9	23	100	14	10 l/min
10	26	160	14	17 l/min
11	28	120	19,5	17 l/min

Para a posição plana, o melhor resultado encontrado para transferência spray na soldagem do arame fino (\varnothing 0,6 mm), foi durante a utilização de tensão média de 28 V, corrente média de 120 A e velocidade de alimentação do arame em 19,5 m/min. Com esta parametrização, foi alcançado o modo de transferência desejado, e observada boa estabilidade do processo e simetria do cordão.

Em relação a posição vertical descendente, os melhores testes em spray para o arame fino (\varnothing 0,6 mm), foram alcançados quando utilizada a tensão média de 30 V, velocidade de alimentação do arame de 18,4 m/min e corrente média de 130 A. Todos os parâmetros testados na posição vertical, podem ser verificados na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros dos testes realizados na posição vertical descendente com arame fino de 0.6 mm, sem abertura, soldagem manual, utilizando mistura gasosa Ar + 25% CO₂ com vazão do gás em 10 l/min

Teste	Tensão Média do Arco (V)	Corrente Média (A)	Veloc. Alimentação (m/min)
12	28	125	17,3
13	26	127	17,3
14	30	140	17,3
15	30	148	18,4
16	30	136	18,4
17	30	144	18,4
18	26	117	16,4
19	28	132	16,4
20	30	140	16,4
21	30	129	19,4
22	32	134	19,5
23	30	119	18,4
24	30	129	18,4
25	30	118	18,4
26	30	134	18,4
27	30	130	18,4

Utilizando os parâmetros que apresentaram melhores resultados nas soldagens anteriores, repetiu-se novamente os testes com arame de 0.6 mm, agora com a finalidade de se comparar com os resultados obtidos pela utilização do arame de Ø 1,0 mm na transferência por curto-circuito. Nestes novos testes, foram escolhidos os melhores resultados para a realização de análise visual e macrográfica.

Os primeiros testes nesta sequência foram realizados com arame de 0.6 mm, na posição plana (técnica empurrando) e transferência spray. Optou-se por trabalhar com a tocha nesta técnica, para garantir maior taxa de deposição. Como citado no início deste capítulo, por se tratar de soldagem manual (processo semiautomático), houveram variações / oscilações de parâmetros, devido a dificuldade do soldador em conseguir manter sempre o mesmo desempenho. A parametrização adotada durante esta soldagem pode ser verificada na Tabela 8, e as Figuras 38 e 39, representam o

resultado, onde é possível observar um cordão simétrico, porém, com falta de penetração.

Tabela 8. Parâmetros utilizados na soldagem do arame fino de Ø 0,6 mm na posição plana (empurrando), transferência spray, soldagem manual, sem abertura e vazão do gás em 13 l/min (Ar + 25% CO₂)

Teste	Tensão do Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Energia de Soldagem (J/cm)	Potência (W)	Vol. Metal Fundido gr / min
1	28	120	17,3	0,58	5824,00	3360,00	38,28
2	28	115	17,3	0,71	4508,00	3220,00	38,28
3	28	115	18	0,68	4722,67	3220,00	39,83
4	30	125	17,3	0,71	5250,00	3750,00	38,28
5	30	120	17,3	0,63	5760,00	3600,00	38,28
6	30	127	18	0,52	7366,00	3810,00	39,83
7	30	125	19	0,60	6250,00	3750,00	42,04



a



b

Figura 38. Soldagem realizada com arame de Ø 0,6 mm na posição plana, sem abertura, soldagem manual, utilizando tensão de 28 V e corrente de 115 A (a: frente do cordão e b: verso do cordão)

Durante o corte para ensaio macrográfico houve uma falha, e acabou sendo selecionada uma área que estava com abertura devido ao empenamento da chapa durante o pontamento.



Figura 39. Macrografia da soldagem com arame de Ø 0,6 mm na posição plana, sem abertura, soldagem manual, utilizando tensão de 28 V e corrente de 115 A

Na sequência foram realizados testes nas mesmas condições: arame de Ø 0.6 mm, na posição plana (técnica empurrando), vazão do gás em 13 l/min (Ar + 25% CO₂), porém, agora com variação da abertura. Vale ressaltar que para o cálculo da velocidade de soldagem, utilizou-se um cronômetro digital. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9, e Figuras 40 e 41.

Tabela 9. Parâmetros utilizados na soldagem do arame fino de Ø 0,6 mm na posição plana, com abertura, mistura gasosa Ar + 25% CO₂

Teste	Tensão do Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Abertura	Energia de Soldagem (J/cm)	Potência (W)	Vol. Metal Fundido gr/min
1	28	119	17,3	1,00	3 mm	3332,00	3332,00	38,28
2	28	111	17,3	0,63	1 mm	4972,80	3108,00	38,28
3	28	109	18	0,79	2 mm	3865,87	3052,00	39,83
4	28	117	17,3	1,67	3 mm	1965,60	3276,00	38,28
5	30	117	17,3	0,94	2 mm	3744,00	3510,00	38,28
6	30	120	19	0,65	1 mm	5520,00	3600,00	42,04

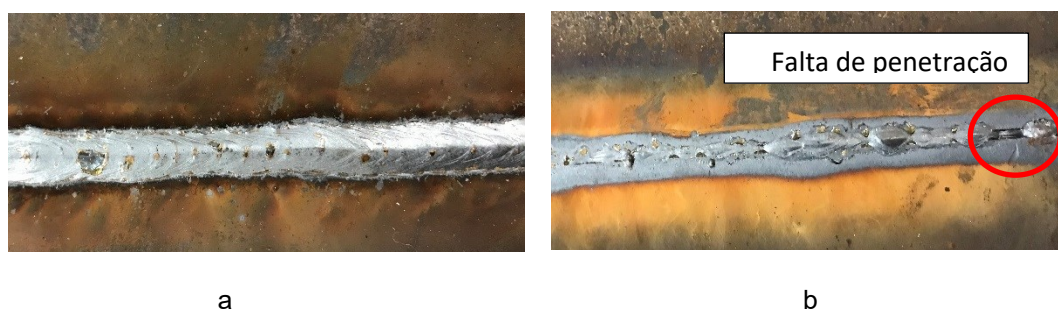


Figura 40. Soldagem realizada com arame de $\varnothing 0,6$ mm na posição plana, com abertura de 2 mm, soldagem manual, utilizando tensão de 28 V e corrente de 109 A – Teste 3 (a: frente do cordão e b: verso do cordão)

No ensaio macrográfico, foi verificada boa penetração da solda, porém, com indícios de direcionamento do arco para uma das bordas do chanfro (lado direito, conforme Figura 41), representando a dificuldade de controle do arco ao longo do processo. Este problema pode ser causado por diferentes fatores: habilidade do soldador, comprimento do arco, ou até mesmo por não se formar uma poça de fusão adequada e o arco tender a encontrar o caminho mais curto para se direcionar (chanfros).



Figura 41. Macrografia da soldagem com arame de $\varnothing 0,6$ mm na posição plana, com abertura de 2 mm, soldagem manual, utilizando tensão de 28 V e corrente de 109 A

Os parâmetros dos testes utilizando o arame de $\varnothing 0,6$ mm, na posição vertical descendente (técnica puxando), vazão do gás em 13 l/min, com e sem abertura, podem ser verificados na Tabela 10, e os resultados das soldagens estão representados nas Figuras 42 e 43, onde é possível observar a falta de penetração, e novamente a dificuldade de controle do arco (notada pela irregularidade do cordão).

Tabela 10. Parâmetros utilizados na soldagem do arame fino de Ø 0,6 mm na posição vertical descendente, transferência spray, soldagem manual, com e sem abertura, mistura gasosa Ar + 25% CO₂

Teste	Tensão Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Aliment. (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Abertura (com ou sem)	Energia de Soldagem (J/cm)	Potência (W)	Vol. Metal Fundido gr/min
1	30	123	18,4	0,94	1 mm	3936,00	3690,00	40,71
2	30	121	19,5	0,88	1 mm	4114,00	3630,00	43,15
3	30	132	19,5	1,00	2 mm	3960,00	3960,00	43,15
4	28	130	19,5	1,25	2 mm	2912,00	3640,00	43,15
5	30	127	18,4	0,88	Sem	4318,00	3810,00	40,71
6	28	119	18,4	0,88	Sem	3776,27	3332,00	40,71
7	30	132	19,5	0,83	Sem	4752,00	3960,00	43,15
8	28	121	19,5	0,79	Sem	4291,47	3388,00	43,15

Foi constatado que as laterais do cordão se solidificaram primeiro, puxando o material de adição para as extremidades, o que acarretou uma linha central no cordão de solda (Figura 42). Provavelmente houve uma dificuldade do soldador na realização deste ensaio, até mesmo pelo curto comprimento da tocha utilizada, e possível posicionamento errado da mesma. A maioria dos testes realizados desta tabela, tiveram este mesmo resultado.



a



b

Figura 42. Soldagem realizada com arame de Ø 0,6 mm na posição vertical descendente, com abertura de 2 mm, utilizando tensão de 28 V e corrente de 130 A Teste 4 (a: frente do cordão e b: verso do cordão)



Figura 43. Macrografia da soldagem realizada com arame de Ø 0,6 mm na posição vertical descendente, com abertura de 2 mm, utilizando tensão de 28 V e corrente de 130 A

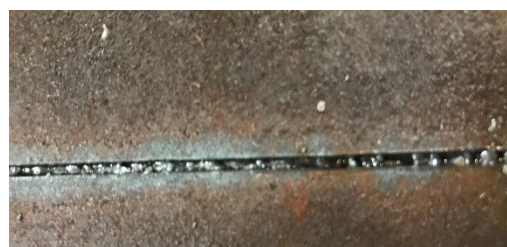
Os parâmetros dos testes com arame de Ø 0,6, na posição sobre cabeça (empurrando), vazão do gás em 13 l/min, com e sem abertura, soldagem manual, podem ser vistos conforme Tabela 11, e a falta de penetração e irregularidade do cordão de solda (falha no controle do arco), estão representados nas Figuras 44 e 45. A grande diferença de valores adotados para tensão, corrente e velocidade de alimentação (quando comparado as outras posições: plana e vertical), se deu devido a posição de soldagem: necessário garantir que não ocorresse o descolamento da poça de fusão e metal de adição.

Tabela 11. Parâmetros utilizados na soldagem do arame ultrafino de Ø 0,6 mm na posição sobre cabeça, com e sem abertura, soldagem manual, modo de transferência spray, mistura gasosa Ar + 25% CO₂

Teste	Tensão do Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Abertura (com ou sem)	Energia de Soldagem (J/cm)	Potência (W)	Vol. Metal Fundido gr / min
1	20	87	13,31	0,38	1 mm	4588,96	1740,00	29,45
2	20	99	13,31	0,37	2 mm	5412,00	1980,00	29,45
3	20	120	13,31	0,78	Sem	3068,8	2400	29,45



a



b

Figura 44. Soldagem realizada com arame de Ø 0,6 mm na posição sobre cabeça, com abertura de 2 mm, soldagem manual, utilizando tensão de 20 V e corrente de 99 A (a: frente do cordão e b: verso do cordão)

A partir do ensaio macrográfico (Figura 45), foi constatado que não houve fusão, apenas deposição de material na junta a ser soldada.



Figura 45. Macrografia da soldagem realizada com arame de Ø 0,6 mm na posição sobre cabeça, com abertura de 2 mm, soldagem manual utilizando tensão de 20 V e corrente de 99 A

Os últimos testes desta etapa com arame de Ø 0,6 mm, foram realizados com a mistura gasosa Ar + 5% O₂, conforme Tabela 12. Este gás havia sido sugerido no início do trabalho, porém durante as primeiras soldagens, houve grande dificuldade de estabilização do arco, e, grandes variações de corrente. Conforme informado anteriormente, esta dificuldade possivelmente surgiu da dificuldade do soldador em trabalhar com arame fino, e elevados valores de tensão e velocidade de alimentação exigidos pelo processo.

Tabela 12. Parâmetros utilizados na soldagem do arame ultrafino de Ø 0,6 mm, soldagem manual, utilizando o gás Ar + 5% O₂

Teste	Tensão do Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Abertura (com ou sem)	Posição
1	28	180	17,3	0,97	2 mm	Plana
2	25	160	13,3	1,59	1 mm	Plana
3	30	190	18,4	0,96	2 mm	Vertical
4	28	170	18,4	1,69	1 mm	Vertical
5	30	180	18,4	0,83	2 mm	Vertical

A partir da análise de um teste da posição vertical, novamente foi observada uma solidificação mais rápida na lateral do chanfro, puxando grande parte do material

depositado para as extremidades (Figura 46), o que foi explicado anteriormente como possível erro na posição da tocha. É observado também que houve apenas deposição de material na junta a ser soldada, conforme Figura 47.

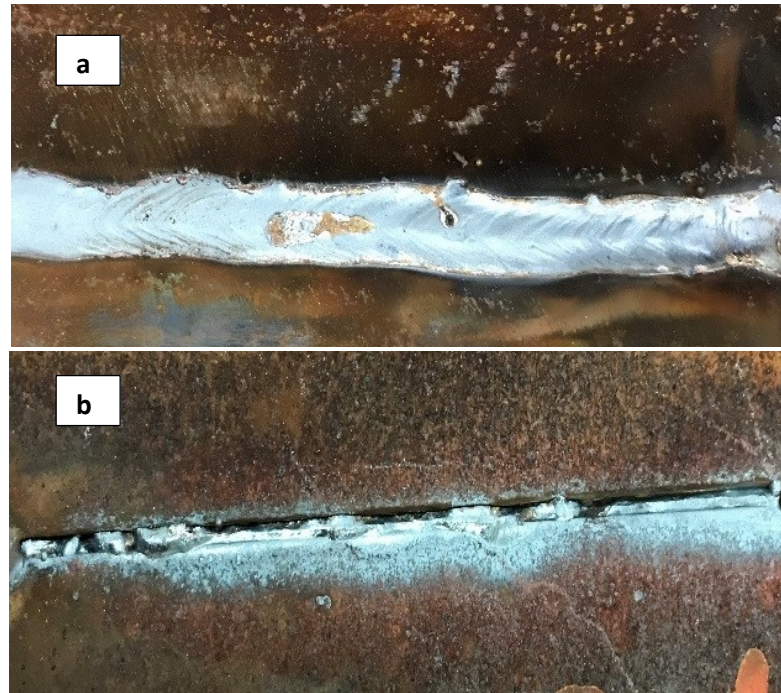


Figura 46. Soldagem realizada com arame de $\varnothing 0,6$ mm na posição vertical, com abertura de 2 mm, utilizando tensão de 30 V e corrente de 180 A (a: frente do cordão e b: verso do cordão)



Figura 47. Macrografia da soldagem realizada com arame de $\varnothing 0,6$ mm na posição vertical, com abertura de 2 mm, utilizando tensão de 30 V e corrente de 180 A

Os resultados das soldagens com o arame de $\varnothing 0,6$ mm, permitem supor que os parâmetros da transferência goticular (spray) não favorecem ao aquecimento do metal de base, ou seja, não asseguram um calor adequado (calor imposto). Desta forma, conclui-se que o processo com a transferência goticular (spray) é caracterizado

por uma eficiência térmica mais baixa quando comparada ao processo por curto-circuito (discussão que será feita a seguir). Além disso, o arco goticular (longo) reduz a densidade de calor entregue ao metal de base. Logo, buscando respostas para estas questões, foram feitos testes usando o arame de 1,0 mm com a transferência por curto-circuito.

4.1.2 Testes com arame de 1.0 mm e transferência por curto-circuito (Oficina Mecânica)

Os parâmetros das soldagens com arame de \varnothing 1,0 mm na posição plana, utilizando o gás Ar + 25% CO₂, soldagem manual, abertura de 1 mm e transferência curto-circuito, podem ser verificados na Tabela 13.

Tabela 13. Parâmetros utilizados na soldagem do arame de \varnothing 1,0 mm na posição plana, utilizando o gás Ar + 25% CO₂, abertura de 1 mm e transferência curto-circuito

Teste	Tensão do Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Energia de Soldagem (J/cm)	Potência (W)	Vol. Metal Fundido gr / min
1	19	136	6,34	0,60	4327,34	2584,00	14,03
2	21	171	9,34	0,63	5673,78	3591,00	20,67

O acabamento e as micrografias dos cordões destes testes são apresentados a seguir (Figuras 48 – 51). Nota-se uma boa simetria do cordão (originada da boa estabilidade do arco), com uma transição suave para o metal de base e o preenchimento total da junta (penetração total).



Figura 48. Soldagem realizada com arame de \varnothing 1,0 mm na posição plana, com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 19 V e corrente de 136 A (a: frente do cordão e b: verso do cordão)

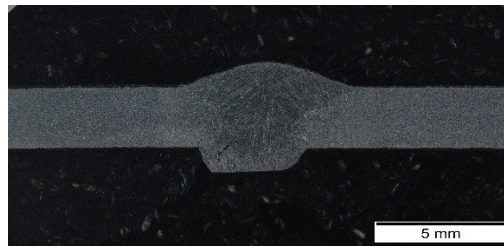


Figura 49. Macrografia da soldagem realizada com arame de Ø 1,0 mm na posição plana, com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 19 V e corrente de 136 A



Figura 50. Soldagem realizada com arame de Ø 1,0 mm na posição plana, com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 21 V e corrente de 171 A (a: frente do cordão e b: verso do cordão)



Figura 51. Macrografia da soldagem realizada com arame de Ø 1,0 mm na posição plana, com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 21 V e corrente de 171 A

O parâmetro do teste na posição vertical (descendente) com arame de Ø 1,0 mm, vazão do gás em 13 l/min, soldagem manual e abertura de 1 mm, pode ser verificado na Tabela 14.

Tabela 14. Parâmetros utilizados na soldagem do arame de Ø 1,0 mm na posição vertical (descendente), utilizando o gás Ar + 25% CO₂, abertura de 1 mm e transferência curto-circuito

Teste	Tensão do Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Energia de Soldagem (J/cm)	Potência (W)	Vol. Metal Fundido gr / min
4	19	149	6,34	0,68	4171,01	2831,00	14,03

O acabamento e a micrografia do cordão deste teste são apresentados a seguir (Figuras 52 – 53). Visualmente é possível perceber o um bom preenchimento da junta, e um cordão distribuído de forma simétrica, comprovando uma melhor contrabilidade do arco. A macrografia realizada reforça estas conclusões.



Figura 52. Soldagem realizada com arame de Ø 1,0 mm na vertical descendente, com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 19 V e corrente de 149 A (a: frente do cordão e b: verso do cordão)



Figura 53. Macrografia da soldagem realizada com arame de Ø 1,0 mm na vertical descendente, com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 19 V e corrente de 149 A

Para finalização desta primeira etapa de testes realizada na oficina mecânica de Araxá, foram realizados testes na posição sobre cabeça (empurrando), com vazão de gás em 13 l /min, soldagem manual e parâmetros conforme Tabela 15.

Tabela 15. Parâmetros utilizados na soldagem do arame de Ø 1.0 mm na posição sobre cabeça, utilizando o gás Ar + 25% CO₂, abertura de 1 mm e transferência curto-circuito

Teste	Tensão do Arco (V)	Corrente (A)	Veloc. Alimentação (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/s)	Energia de Soldagem (J/cm)	Potência (W)	Vol. Metal Fundido gr / min
5	19	150	6,34	0,93	3059,00	2850,00	14,03
6	16	110	3,54	0,52	3373,33	1760,00	7,83
7	16	104	3,54	0,48	3472,21	1664,00	7,83
8	16	108	3,54	0,46	3720,96	1728	7,83

O acabamento e as micrografias dos cordões destes testes são apresentados a seguir (Figuras 54 – 55). A partir da avaliação visual e da macrografia, constata-se que houve penetração razoável da junta. A falta de penetração presente, pode ter sido devido a problemas de posicionamento da tocha (cabo curto limitando movimentos).



Figura 54. Soldagem realizada com arame de Ø 1.0 mm na posição sobre cabeça (empurrando), com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 16 V e corrente de 108 A (a: frente do cordão e b: verso do cordão)



Figura 55. Macrografia da soldagem realizada com arame de Ø 1.0 mm na posição sobre cabeça (empurrando), com abertura de 1 mm, utilizando tensão de 16 V e corrente de 108 A

Os testes com o arame de 1,0 mm mostraram que neste caso, o metal de base está fundido com uma boa eficiência, ou seja, a eficiência térmica do arco curto (quando comparado ao arco do arame de 0.6), e a densidade da energia no acoplamento arco – peça são altas.

4.2. Segunda etapa de testes (Laprosolda)

Os resultados obtidos na primeira fase de testes, indicam que o problema principal da soldagem com o arame de 0,6 mm é a baixa eficiência térmica. Utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água (veja metodologia) nesta nova fase de testes, foi avaliado o calor absorvido pelo metal de base durante a soldagem com os dois arames (0.6 mm e 1.0 mm). Esta etapa de testes foi realizada nos laboratórios do Laprosolda, mantendo a mesma metodologia: soldagem manual (processo semiautomático) realizada através de uma fonte convencional, mistura gasosa de fácil aquisição, tocha de cabo curto, e, auxílio de um soldador qualificado.

Devido a metodologia de funcionamento do calorímetro (elementos de fixação), nesta etapa o corpo de prova de espessura de 3 mm foi substituído por um corpo de prova de 6,35 mm. A troca da placa de teste por outra de maior espessura, ocorreu devido a limitação da fixação dos parafusos do equipamento sobre a placa de menor espessura, buscando evitar vazamentos durante a soldagem e com isso a fuga de calor para a atmosfera circundante. Todavia, a substituição não altera os resultados obtidos, uma vez que a espessura do corpo de prova não é variável determinante para o cálculo de calor absorvido (Cabs) no calorímetro de fluxo contínuo de água, conforme pode ser visto na Equação 4 deste trabalho (vide pág 39.)

Para as novas soldagens desta etapa, foram mantidos os parâmetros da fase inicial de testes, com exceção da mistura gasosa (substituída devido a disponibilidade no Laprosolda), conforme a baixo:

- Arame 0.6 mm: soldagem manual, transferência spray, velocidade de alimentação do arame em 19,5 m/min, mistura gasosa 92%Ar + 8%CO₂, vazão do gás 10 l/min, DBCP entre 10 a 13 mm.

- Arame 1.0 mm: soldagem manual, transferência por curto-circuito, velocidade de alimentação do arame em 6,30 m/min, mistura gasosa 92%Ar + 8%CO₂, vazão do gás 10 l/min.

Vale ressaltar também que nesta fase de testes não houveram soldagens em juntas, mas sim, deposições metálicas simples. Através de um sistema de aquisição de dados conectado ao calorímetro, foram obtidos oscilogramas de tensão, corrente e temperatura.

Os resultados das soldagens realizadas nesta etapa, podem ser vistos na Tabela 16, e os oscilogramas obtidos estão representados nas Figuras 56-63:

Tabela 16. Resultados obtidos durante as soldagens dos arames de 0,6 mm e 1,0 mm

Modo de transferência e parâmetros	Arame (mm)	Potência (w)	Es (J)	Cabs (J)	k	Penetração (mm)	Largura (mm)	Área Fundida (mm²)
Teste 1: Por C-C: 109 A x 18 V	1,0	1957	37.37	29.26	0,78	1,32	6,96	4,17
Teste 2: Por C-C: 107 A x 18 V	1,0	1909	36.33	30.46	0,84	1,16	5,60	3,11
Teste 3: Globular: 147 A x 30 V	0,6	4487	87.46	58.27	0,67	1,17	9,06	3,20
Teste 4: Globular: 143 A x 31 V	0,6	4363	87.78	59.96	0,68	1,36	9,56	4,56

Es = energia de soldagem, Cabs = Calor absorvido, k = eficiência térmica

A transferência por curto-circuito ocorre geralmente em correntes e tensões de soldagem baixas (baixa força eletromagnética, permitindo um grande diâmetro da gota, e arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar). A tensão cai bruscamente quando a gota toca a poça (início do curto circuito) e permanece baixa até o fim do curto-circuito, enquanto a corrente aumenta rapidamente, decaindo após o destacamento da gota, (Scotti e Ponomarev, 2008). Este comportamento pode ser visto nas Figuras: 56, 57 que representam os oscilogramas dos Testes 1 e 2 da Tabela 16.

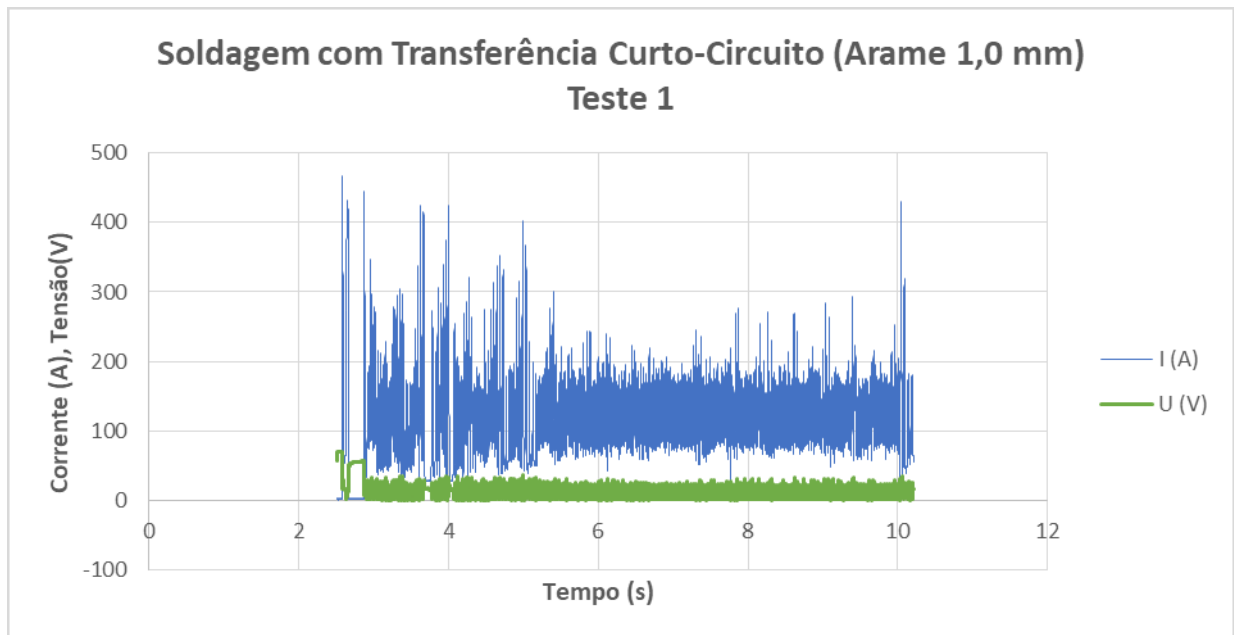


Figura 56: Oscilograma de tensão e corrente nas soldagens realizadas por Curto-Circuito e arame de 1 mm

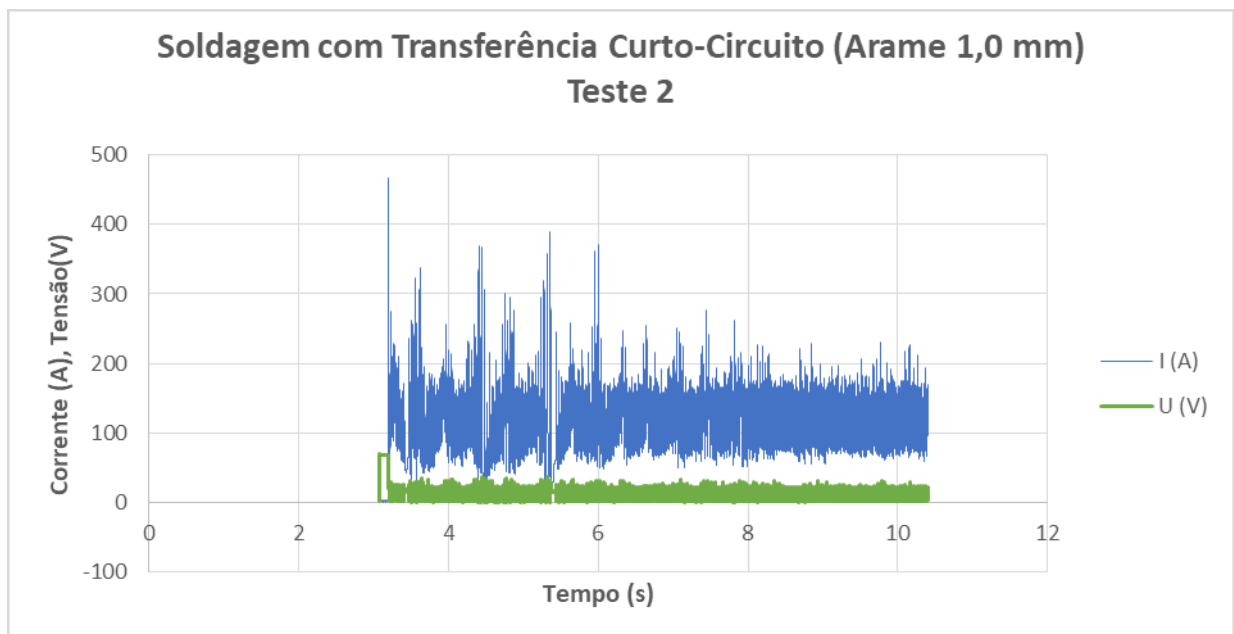


Figura 57: Oscilograma de tensão e corrente nas soldagens realizadas por Curto-Circuito e arame de 1 mm

Ainda segundo Scotti e Ponomarev (2008), a soldagem MIG/MAG com transferência spray é caracterizada pela transferência de pequenas gotas uniformes (com o diâmetro próximo ao do eletrodo) de forma sequencial (e não pulverizadas),

em alta frequência. Por isto, os oscilogramas de corrente e tensão deste tipo de transferência não mostram variações significativas dos sinais. Este comportamento pode ser visto nas Figuras:58, 59 que representam os oscilogramas dos Testes 3 e 4 da Tabela 16.

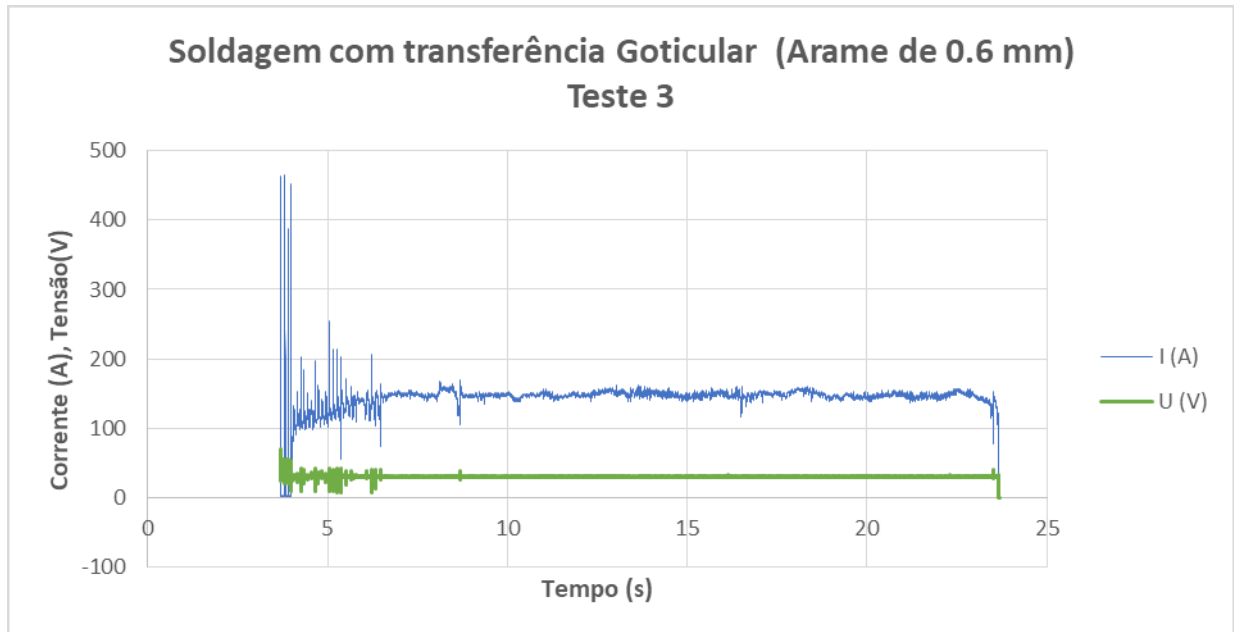


Figura 58: Oscilograma de tensão e corrente nas soldagens realizadas por transferência goticular e arame de 0.6 mm.

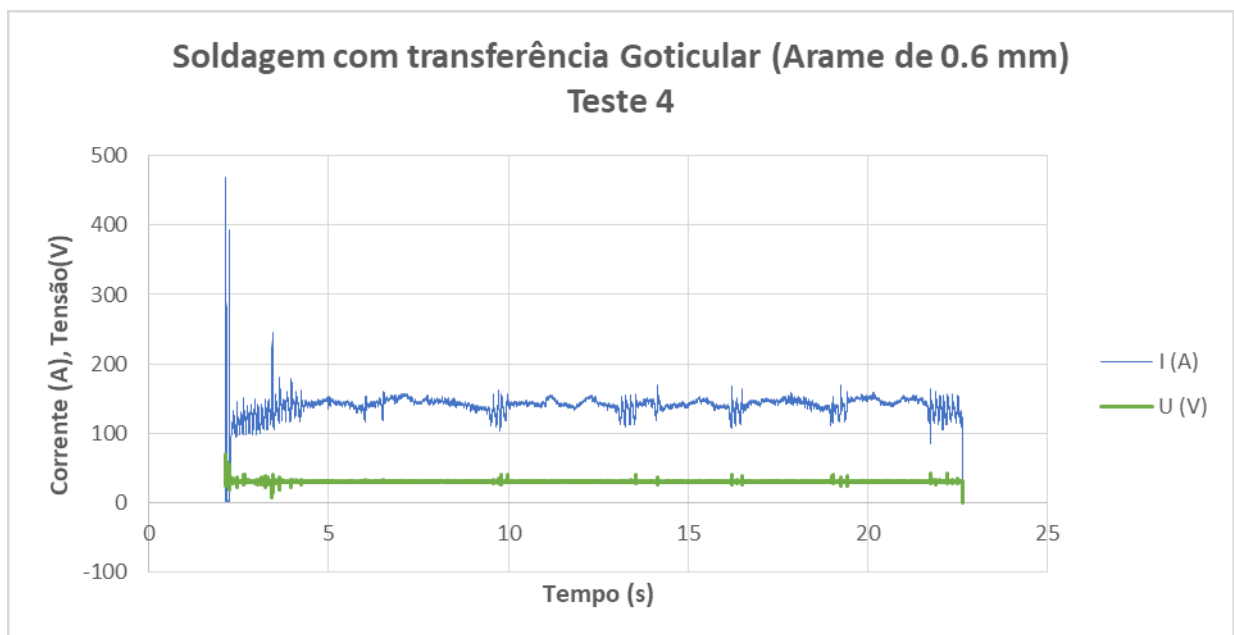


Figura 59: Oscilograma de tensão e corrente nas soldagens realizadas por transferência goticular e arame de 0.6 mm.

Conforme dito anteriormente na metodologia (página 39), a eficiência térmica do processo de soldagem é definida como a porção quantitativa de energia do arco transferida para o material de base e de acordo com Dupont e Marder (1995), pode ser calculada pela equação:

$$k = \int_0^{\infty} W * C_{pw} * (T_{2w} - T_{1w})dt / U_a * I_s * t \quad (4)$$

Onde,

W : Fluxo mássico de alimentação de água, [kg/s];
 C_{pw} : Calor específico da água [Kj/Kg · °C]
 T_{2w} : Temperatura da água no ponto de saída, [°C];
 T_{1w} : Temperatura da água no ponto de entrada, [°C];
 t : Tempo de soldagem, [s];
 U_a : Tensão de soldagem, [V];
 I_s : Corrente de soldagem, [A].

Os oscilogramas gerados para a realização dos cálculos de eficiência térmica podem ser vistos nas Figuras 60 - 63:

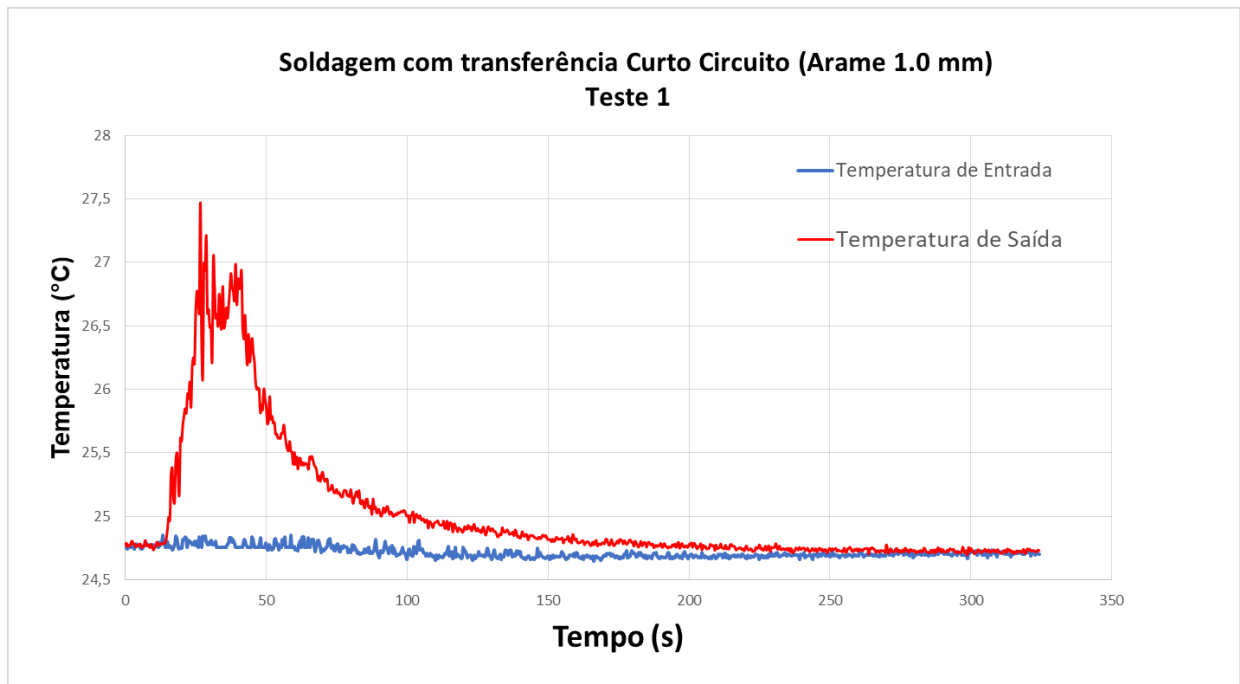


Figura 60: Variação de temperatura x tempo nas soldagens com transferência Curto-Circuito e arame de 1.0mm

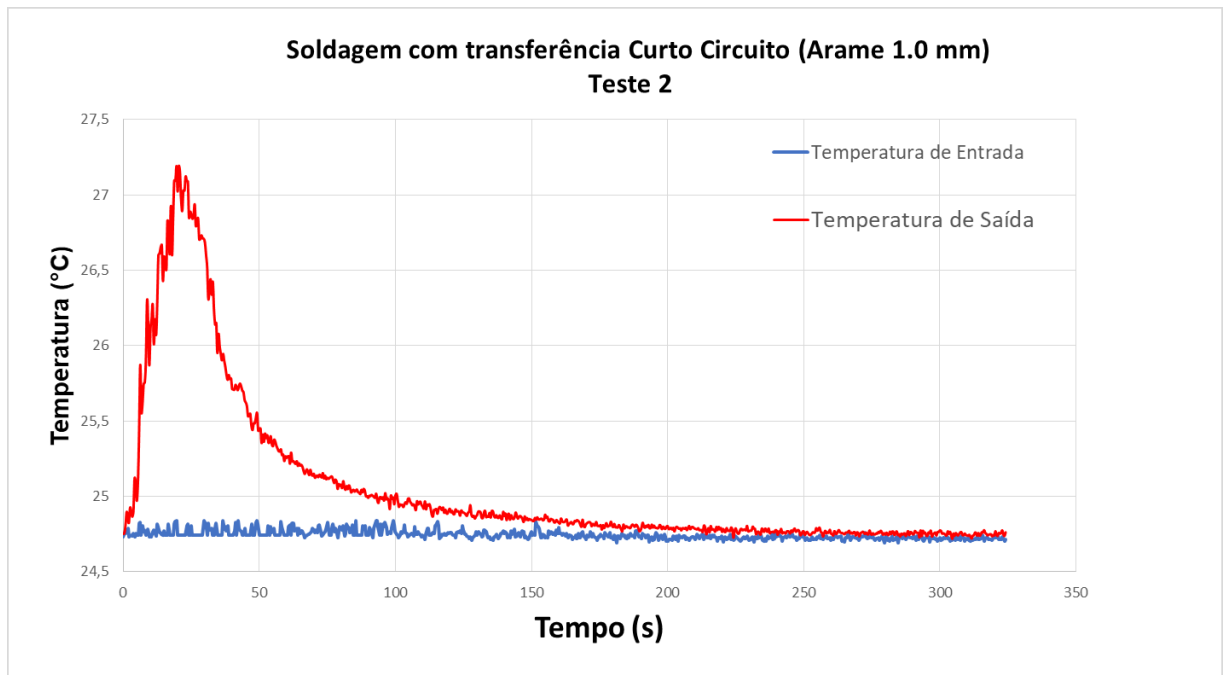


Figura 61: Variação de temperatura x tempo nas soldagens com transferência Curto-Circuito e arame de 1.0mm

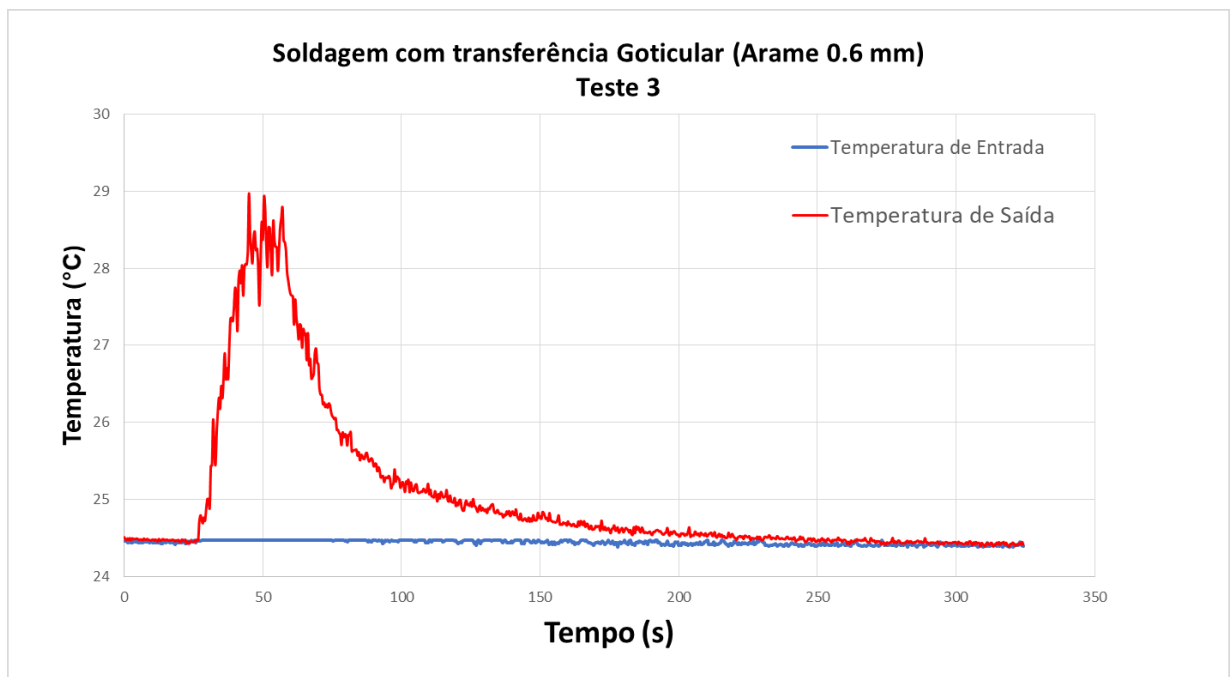


Figura 62: Variação de temperatura x tempo nas soldagens com transferência goticular e arame de 0.6 mm

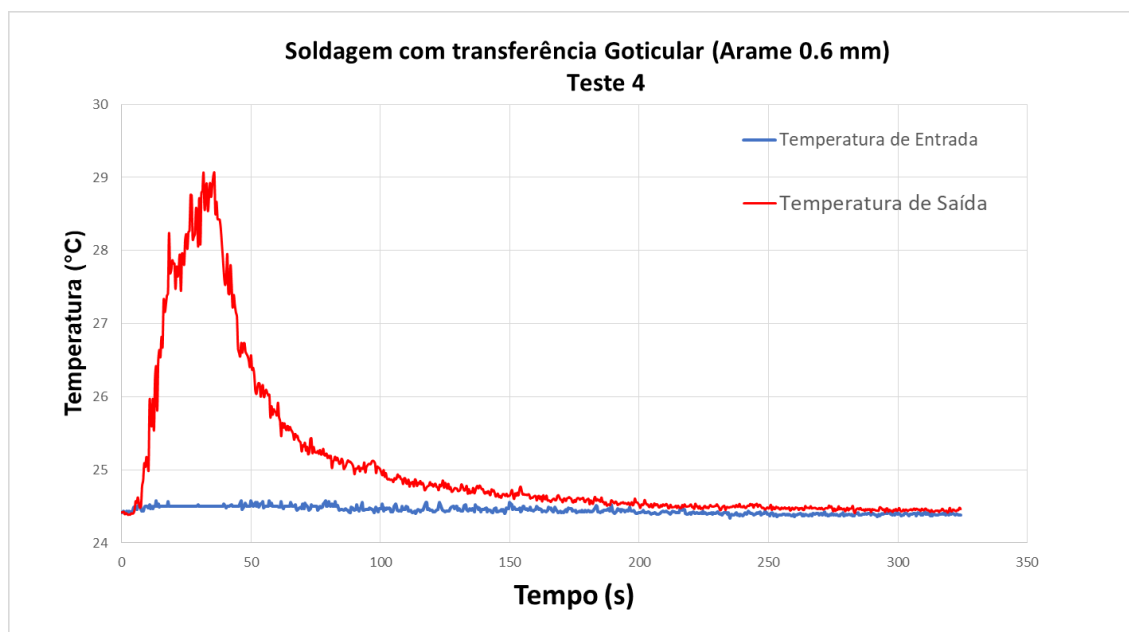


Figura 63: Variação de temperatura x tempo nas soldagens com transferência gótica e arame de 0.6 mm.

Os oscilogramas mostram os valores de variação da temperatura de água no calorímetro. A temperatura de entrada tende a se manter constante durante toda a aquisição de sinal, já a temperatura de saída, cresce durante o processo de soldagem, e com o tempo a temperatura vai se estabilizando (resfriando) até chegar no mesmo valor da temperatura de entrada.

Pode-se observar que as temperaturas da água na saída do calorímetro, captada pelo termopar nos testes 3 e 4 (transferência gótica) foram quase 2 [°C] maiores em comparação aos testes 1 e 2 (transferência Curto-Circuito). Isso pode ser explicado devido a maior energia de soldagem do processo com transferência gótica.

Diante dos valores apresentados na Tabela 16, foi concluído que o modo de transferência spray na soldagem do arame de Ø 0,6 mm, gasta aproximadamente o dobro de energia de soldagem quando comparado ao arame de Ø 1,0 mm no modo de transferência por curto-circuito (conforme representado na Figura 64: representação gráfica dos valores da Tabela 16), mas, a eficiência térmica do processo com a transferência spray é aparentemente mais baixa (Figura 65: representação gráfica dos valores da Tabela 16). Vale ressaltar que, para traçar este

tipo de comparação referente a eficiência térmica e chegar a conclusões decisivas, seria necessário ter estabelecido premissas durante as soldagens: mesma corrente, mesmo volume depositado, etc., e isto não foi realizado neste trabalho. Desta forma, os resultados obtidos apenas indicam uma tendência de valores e resultados.

A Tabela 16 permite observar também que maiores perdas de calor junto com a densidade de energia mais baixa (o calor está distribuído na área maior), provocam falta de fusão e penetração no caso da soldagem com o arame de \varnothing 0,6 mm e transferência spray.

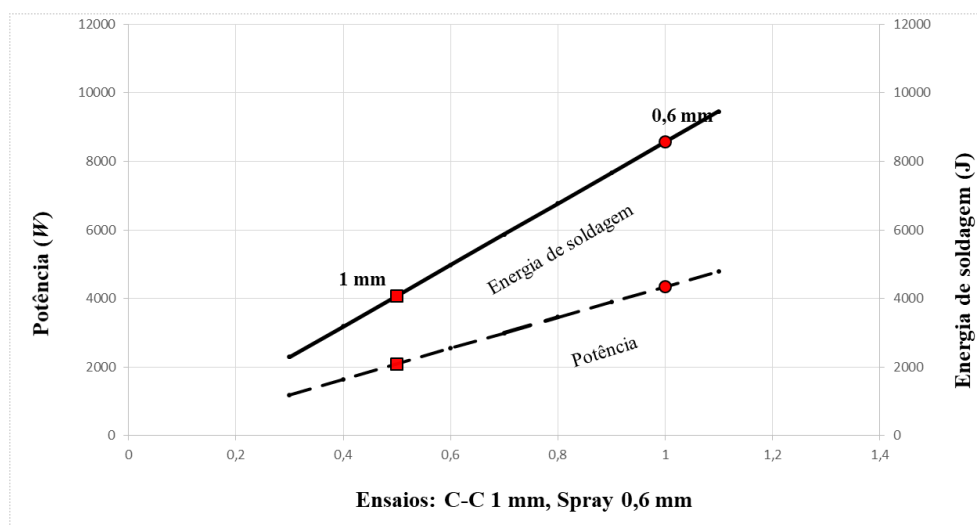


Figura 64. Projeção da Potência de Soldagem e Energia de Soldagem em função dos arames utilizados (0,6 mm e 1,0 mm)

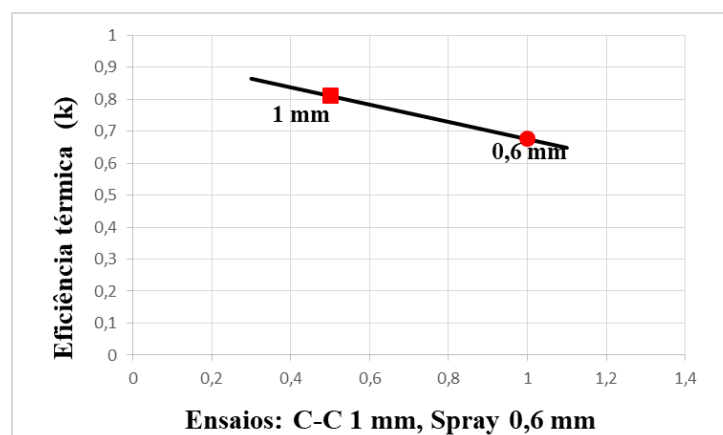


Figura 65. Projeção da Eficiência Térmica em função dos arames utilizados (0,6 mm e 1,0 mm)

Constata-se também que, características como penetração, largura e área do cordão, sofrem grande variação quando alterados o modo de transferência e diâmetro dos arames, conforme pode ser visto na Figura 66.

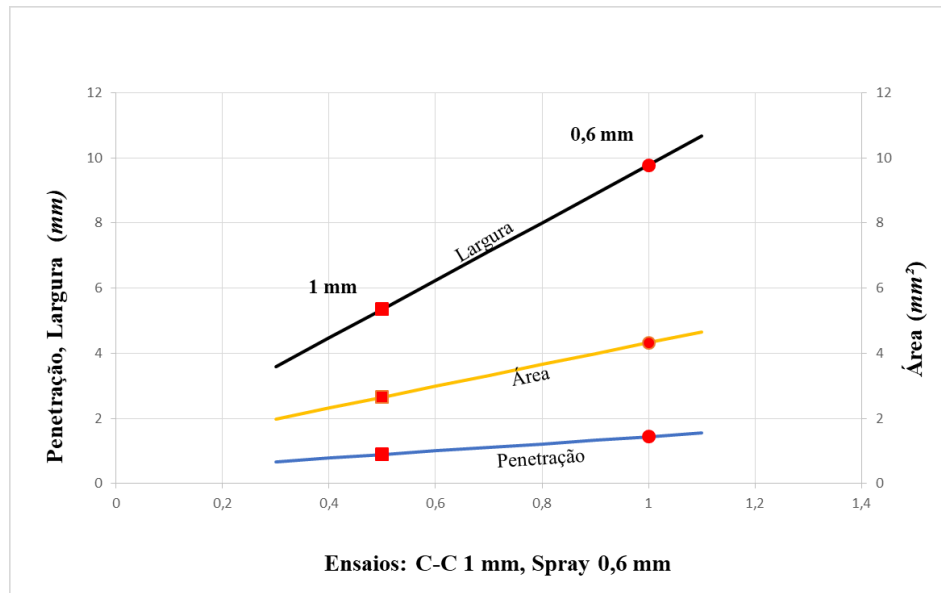


Figura 66. Projeção da penetração, largura e área do cordão em função dos arames utilizados (0,6 mm e 1,0 mm)

Na macrografia do cordão da soldagem com arame de \varnothing 1,0 mm e modo de transferência por curto-circuito (Figura 67), é observado um cordão estreito, com o reforço alto e penetração no centro do cordão. No caso do arame de \varnothing 0,6 mm e modo de transferência spray, foi constatado que uma grande parte do metal de adição foi apenas depositada sobre a superfície do corpo de prova (Figura 68), e a fusão do metal de base aconteceu por baixo da parte direita do cordão.

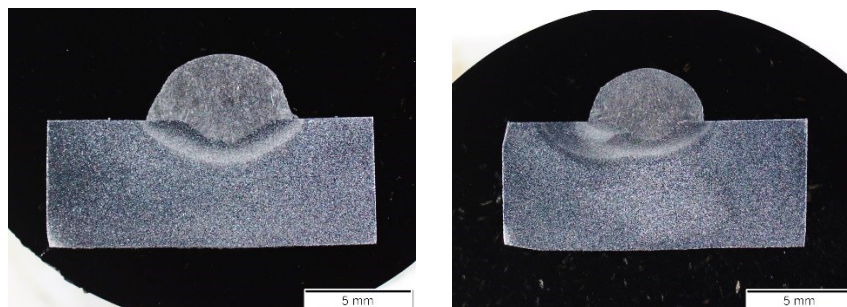


Figura 67. Ensaio macrográfico realizado nas soldagens de arame de \varnothing 1,0 mm e modo de transferência curto-circuito (Teste 1 da Tabela 16)

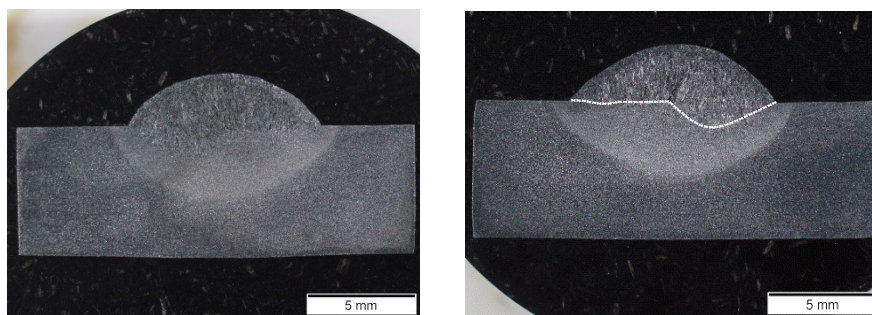


Figura 68. Ensaio macrográfico realizado nas soldagens de arame de Ø 0,6 mm e modo de transferência spray (Teste 3 da Tabela 16)

O processo de soldagem engloba duas premissas: fusão do metal de adição, e fusão do metal de base. Levando em consideração todos os testes realizados e seus respectivos resultados, é possível observar uma tendência de que nos arames grossos (diâmetros acima de 1,0 mm), e transferência por curto-circuito, ocorre boa fusão do metal base e metal de adição; diferente do processo spray em arames ultrafinos, onde a energia de soldagem apesar de ser praticamente o dobro da gerada no processo por curto-circuito, acaba apenas depositando o metal de adição sobre a superfície. Neste caso, o acoplamento arco-peça, às vezes, não cria poça de fusão, e, o processo acaba gerando uma sobreposição metálica.

O grande comprimento do arco, originado dos altos valores de corrente necessários para transferência spray, faz com que grande parte da energia seja perdida para o meio ambiente, tornando-o um processo de baixa eficiência térmica quando comparado ao processo de transferência por curto-circuito.

O grande comprimento de arco faz também com que haja dificuldade em seu controle (tendência de movimentação do arco entre os chanfros) conforme Figura 61, enquanto que, o arco gerado na transferência por curto-circuito, incide de forma direta e concentrada no metal de base. A Figura 69 representa uma soldagem realizada de forma manual em uma junta em V, e é possível observar deposições irregulares. Esta falha de deposição, pode ser tanto da dificuldade de controle do arco, como da dificuldade do soldador em trabalhar com este tipo de arame e tocha de cabo curto.



Figura 69. Ondulação do cordão de solda durante o passe de raiz com arame de Ø 0,6 mm e a transferência do tipo goticular (spray) (Fonte: Vittorino, 2018)

Vale ressaltar também, a diferença entre os diâmetros dos arames utilizados durante os testes: o arame de 0,6 mm possui seção transversal aproximadamente três vezes menor quando comparado ao arame de 1,0 mm (Figura 70), logo, necessita de elevadas velocidades de alimentação (para a mesma corrente e, aproximadamente, a mesma taxa de deposição). Neste trabalho, chegou a ser utilizada a velocidade de 20,7 m/min, valor que nem sempre é encontrado em fontes convencionais e menos modernas. A alta velocidade torna necessária também, a utilização de uma tocha de cabo curto, com o intuito de evitar que o arame embole na saída do alimentador. A tocha deste trabalho foi desenvolvida com finalidade didática, e pode ser um item de difícil aquisição no mercado.

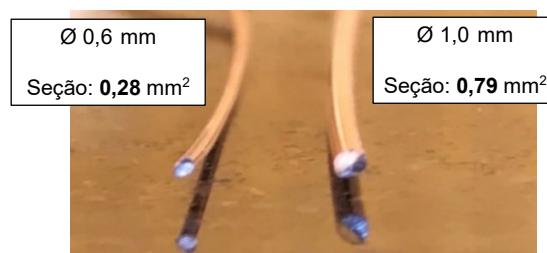


Figura 70: Ilustração comparativa dos arames de Ø 0,6 mm e Ø 1,0 mm

Foi possível observar também que, para a mesma corrente, a velocidade de alimentação e a taxa de fusão crescem mais do que a redução da seção transversal dos arames, conforme Equação (5):

$$\frac{S_{1,0}}{S_{0,6}} \leq \frac{V_{al0,6}}{V_{al1,0}} = \frac{V_{fusão0,6}}{V_{fusão1,0}} \quad (5)$$

Sendo assim, ocorre uma maior eficiência de fusão dos arames finos, que pode ser explicada pela maior razão de superfície x volume. Os arames finos fundem mais rápido na mesma seção, utilizando uma velocidade de alimentação aproximadamente 4 vezes maior quando comparado ao arame grosso. Desta maneira, é possível concluir que a corrente do processo acaba sendo melhor aproveitada neste tipo de arame.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Devido ao seu diâmetro pequeno, os arames ultrafinos necessitam de altas velocidades de alimentação e escolha correta de mistura gasosa, para se chegar à corrente de transição e, logo, à transferência spray. No caso estudado, a velocidade de alimentação as vezes chegava ao limite do alimentador (20,7 m/min), o que para utilização de tochas convencionais (cabos longos) e fontes antigas, normalmente utilizadas em oficinas, torna o processo de soldagem com arame ultrafino inviável.

Embora as condições da transferência spray signifiquem uma alta taxa de fusão do arame (neste caso até 20 m/min), o metal de base não recebe o calor suficiente para criar uma poça de fusão adequada. O grande comprimento do arco, originado dos altos valores de corrente necessários para transferência spray, faz com que grande parte da energia seja perdida para o meio ambiente, tornando-o um processo de baixa eficiência térmica quando comparado ao processo de transferência por curto-circuito. A partir das macrografias, foi constatado que não houve uma boa diluição entre o metal de base e o metal depositado, ocasionado principalmente por este baixo calor imposto.

As macrografias das soldas realizadas com arame fino (0.6 mm) mostraram que em alguns casos é possível obter as soldas com boa penetração e sem os defeitos como a falta de fusão, embora a falta de penetração está ainda presente caso a velocidade de soldagem seja muito alta ou, o que é mais crítico, quando a abertura de raiz é muito estreita.

Conclui-se então que a soldagem MIG/MAG com arame ultrafino de 0,6 mm e modo de transferência goticular, não é um processo viável (dos pontos de vista econômico e de qualidade), quando comparada a soldagem com arame convencional de 1,0 mm e modo de transferência por curto-circuito.

Torna-se importante ressaltar que este trabalho foi todo realizado com soldagem manual (processo semiautomático). Desta forma, torna-se difícil em alguns momentos chegar a conclusões concretas, visto que diversas variáveis podem ter interferido diretamente no resultado final das soldagens: habilidade do soldador, posicionamento correto da tocha (dificuldade de manuseio encontrada devido ao cabo curto), controles precisos de DBCP, velocidade de soldagem, etc. Desta forma, as conclusões aqui citadas, tratam-se de tendências, e servirão de embasamento para possíveis trabalhos futuros.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) Avaliação da aplicabilidade da soldagem MIG/MAG com arame fino (0.6 mm), em chapas de espessura de 3 mm, utilizando transferência spray e soldagem automática

Metodologia: Nos laboratórios do Laprosolda, utilizando o processo automático de soldagem MIG/MAG, modo de transferência spray, calorímetro de fluxo contínuo de água e sistema de aquisição de dados, realizar soldagens com arame fino (0.6 mm) em juntas de topo (com e sem abertura), em corpos de prova de 3 mm de espessura, utilizando três posições distintas: plana, vertical descendente e sobre cabeça. Os mesmos testes deverão ser repetidos com arame de 1.0 mm e modo de transferência por curto-circuito, objetivando traçar um comparativo entre arames e processos. Para comparação de eficiência térmica entre os mesmos, deverão ser estabelecidas algumas premissas durante as soldagens: utilização de mesma corrente, volume de material depositado, etc. Através de um microscópio óptico, realizar análise macrográfica das regiões soldadas.

2) Influência da utilização de diferentes misturas gasosas na corrente de transição goticular (spray);

Metodologia: Nos laboratórios do Laprosolda, utilizando o processo automático de soldagem MIG/MAG, modo de transferência spray, sistema de aquisição de dados e câmera de alta velocidade, realizar soldagens com arame fino (0.6 mm) em corpos de prova na posição plana, utilizando três diferentes misturas gasosas, para verificação da influência das mesmas na corrente de transição goticular. A escolha das misturas gasosas deverá ser feita baseada no que diz a bibliografia existente (Scotti e Ponomarev, 2008):

- Argônio-CO₂: a adição de CO₂ ao Ar aumenta a estabilidade de arco quando trabalhando com metais ferrosos, melhora o desempenho do gás em soldagem por curto-circuito e o deixa mais “quente”. Existem três faixas típicas no comércio:

1ª) CO₂ de 18 a 25%: na qual a transferência predominante é por curto-circuito (o modo goticular não ocorre facilmente) e utilizada em chapas mais espessas (acima de 6 mm);

2ª) Teor de CO₂ variando de 8 a 15%: mistura indicada para soldagens de chapas finas (menos de 3 mm) com operação no modo curto-circuito, apesar da transferência goticular ser possível;

3ª) Teor de CO₂ entre 3 a 5%: mais aplicada competitivamente às misturas de Ar + O₂, ou em soldagens de chapas muito finas com arames de diâmetro menor do que 0,9 mm.

- Argônio-oxigênio: a adição de oxigênio (sempre em teores menores do que 5% para aço ao carbono e 2% para aços inoxidáveis) aumenta a estabilidade do arco e a frequência de transferência, diminuiu a corrente de transição e influencia na forma do cordão de solda. Usado quando a transferência desejada é goticular.

- Argônio-oxigênio- CO₂: são misturas versáteis, por causa da capacidade de operar nos modos de transferência curto-circuito e goticular. A somatória de O₂ e CO₂ normalmente não ultrapassa a 8%.

3) Avaliação da influência do comprimento do arco e da transferência metálica sobre o rendimento térmico na soldagem MIG/MAG com arame fino

Metodologia: Nos laboratórios do Laprosolda, utilizando o processo automático de soldagem MIG/MAG, os três principais modos de transferência (curto-circuito, globular, spray), calorímetro de fluxo contínuo de água, sistema de aquisição de dados e câmera de alta velocidade, realizar soldagens com arame fino (0,6 mm) em juntas de topo, na posição plana. Durante os experimentos verificar a influência e a significância de parâmetros de soldagem (tensão, corrente, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, etc.) sobre aproveitamento do calor gerado

pelo arco e, conseqüentemente, no rendimento térmico de cada transferência metálica utilizando um calorímetro de fluxo contínuo de água.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, H. A. I., MOTA, C. A., SCOTTI, A. Efeitos do Comprimento de Reversão e do Ângulo de Ataque sobre a Estrutura de Solidificação do Cordão em Soldagem MIG/MAG com “Switch Back”, 2011.
- ANDRADE, A. C. Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- AREVALO, H. H. Desenvolvimento e Avaliação de Calorímetros Via Nitrogênio Líquido e Fluxo Contínuo (Água) para Processos de Soldagem. 2011. 145p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- ASM Handbook. W. Volume 6A. Welding Fundamentals and Processes. Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee. Volume Editors, 1993.
- AWS. Welding Handbook, vol. 4, 8ª edição. American Welding Society, Miami, 1998, p. 233-332.
- BRACARENSE, A. Q., Processo de Soldagem TIG – GTAW. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000. 22 p. Disciplina Processo de Soldagem.

- CAYO, E. H. Modelagem e controle da soldagem orbital através do processo GMAW-S. 2013. Tese (Doutorado em sistemas mecatrônicos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- COSTA, T. F. Aplicação de Processos MAG Curto-circuito Convencional e Controlado na Soldagem de Dutos de Aço Carbono. 2011. 197 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- CRUZ, J. A. Uma metodologia para modelagem e controle da altura do reforço e da largura do cordão de solda no processo GMAW. Dissertação (Mestrado em sistemas mecatrônicos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- E. J. SODERSTROM; P. F. MENDEZ; Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO₂ Shielding Gas Mixtures, Welding Research, 2008.
- FISCHER. A. Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW – Arco Pulsado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- HERMANS, M.J.M. and G. DEN OUDEN, Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding; Delft University of Technology: Netherlands, 1997.
- MACHADO, I. G. Condução de calor na soldagem: Fundamentos e aplicações. Ed. Pelo autor e distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Porto Alegre, 2000.
- 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. 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

- MORALES, R. F., RESENDE, A. A., SCOTTI, A., Influência da adição de hélio no gás de proteção sobre a geometria do cordão de solda MIG/MAG de aço ao carbono. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica. 2007.
- NIXON, J.H.& NORRISH, J.: Determination of pulsed MIG process parameters. Synergic MIG Supplement, Welding & Metal Fabrication, 1992.
- OVERBECK, C.J.; MARSH, R.R.; PALMER, W.W. Cenco Physics. All content copyright Cenco Physics and Sargent-Welch, unless otherwise noted. 19 de Agosto de 2009.
- PONOMAREV, V., Apresentação Defeitos em Soldagem, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018. 65 p. Disciplina Fundição e Soldagem.
- REVISTA DO AÇO. Gases de Proteção para Soldagem ao Arco Elétrico, c2017. Página inicial. Disponível em: < <http://www.leandromota.com.br/revista/gases-de-protecao-para-soldagem-ao-arco-eletrico/>> Acesso em: 11 dez. 2018.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo, Artliber Editora, 288 p., 2014.
- SGARBI, P.V., Construção de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2013.
- SOUZA, D.; et al. Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 114 – 122, abr/jun, 2011.
<https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000200004>

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F.; NASCIMENTO, V. C.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Influência dos Parâmetros de Soldagem na Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito. In: XXXV CONSOLDA, 2009, Belo Horizonte - MG. Anais do XXXV CONSOLDA, 2009.

STENBAKKA, N.; PERSSON, K. Shielding gases for Gas Metal Arc Welding. Welding Journal, Miami, v. 8, n. 11, p. 41-47, nov. 1989

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

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

ZIEDAS, T.. SENAI Soldagem – Coleção tecnológica – 1ª ed. 1997.