

OLGA LISKEVYCH

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE CO₂ NA
REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA DE
METAL E ESTABILIDADE DO PROCESSO
MIG/MAG**



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

2010

OLGA LISKEVYCH

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE CO₂ NA
REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA DE
METAL E ESTABILIDADE DO PROCESSO
MIG/MAG**

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. Américo Scotti.

Uberlândia – MG

2010

Слава Україні! Героям Слава!

L769c Liskevych, Olga, 1988-
2014 Estudo da influência do teor de CO₂ na regularidade da
transferência de metal e estabilidade do processo / Olga
Liskevych. - 2014.
101 p. : il.

Orientador: Américo Scotti.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Dissertações. 2. Soldagem
elétrica - Dissertações. 3. MIG/MAG - Dissertações. I. Scotti,
Américo, 1955-. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade da realização deste curso;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Américo Scotti, pela paciência, ensinamentos, discussões e confiança;

Aos órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG.

Ao Pessoal do Laprosolda/UFU pela ajuda e apoio.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução.....	01
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica.....	04
2.1. Transferência metálica.....	04
2.1.1. Modos de transferência metálica.....	05
2.2. Forças que agem na gota em transferência.....	08
2.2.1. Teoria de balanço das forças.....	08
2.2.2. Teoria da instabilidade Pinch.....	14
2.3. Transferência metálica por curto-circuito.....	15
2.3.1. Geometria da gota.....	16
2.3.2. Geração dos respingos em transferência por curto-circuito.....	17
2.4. Gases de proteção em soldagem.....	21
2.4.1. Caracterização dos gases de proteção.....	22
2.5.2. Gases usados em soldagens de aços ao carbono.....	26
2.5. Estabilidade do Processo MIG/MAG com Transferência Metálica por Curto- Circuito.....	30
2.5.1 Influência das Variáveis na Estabilidade da Transferência metálica por curto- circuito	32
CAPÍTULO III - Metodologia, Materiais e Equipamentos.....	35
3.1. Fundamentação metodológica.....	35

3.2. Equipamentos e instrumentos.....	35
3.2.1. Bancada experimental.....	35
3.2.2. Consumíveis (gases de proteção e arame-eletrodo).....	44
3.3. Condições básicas para realização dos testes.....	44
3.3.1. Placas de teste.....	45
3.3.2. Técnicas de Soldagem.....	47
3.3.3. Dimensão dos Cordões.....	47
3.3.4. Operação da fonte de soldagem.....	48
3.4. Etapas de desenvolvimento experimental.....	50
3.4.1. Testes Preliminares.....	50
3.4.2. Confecção dos Testes.....	51
3.5. Análise dos Resultados	51
3.5.1. Aparência do Cordão.....	52
3.5.2. Rendimento de Deposição.....	52
3.5.3. Índice de Regularidade da Transferência Metálica.....	52
3.5.4. Geometria do Cordão.....	54
3.5.5. Avaliação da Transferência Metálica através das Filmagens.....	54
CAPÍTULO IV - Resultados e Discussão.....	55
4.1. Dados obtidos nos testes preliminares.....	55
4.1.1. Escolha das amostras para a comparação.....	58
4.2. Análise dos resultados.....	62

4.2.1. Filmagens da transferência metálica.....	62
4.2.2. Rendimento de deposição.....	70
4.2.3. Índice de regularidade da transferência metálica IVcc.....	72
4.2.4. Aparência dos cordões.....	73
4.2.5. Geometria dos cordões.....	75
CAPÍTULO V - Análise Geral dos Resultados.....	79
CAPÍTULO VI – Conclusão.....	82
CAPÍTULO VII - Trabalhos Futuros.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
APÊNDICE A.....	90

LISKÈVYCH, O. **Estudo da Influência do Teor de CO₂ na Regularidade da Transferência de Metal e Estabilidade do Processo MIG/MAG**. 2010. 101f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

O processo MIG/MAG tem sido considerado como o método de união de maior ascensão e utilização na indústria. A atmosfera protetora é uma das variáveis mais importantes desse processo, pois pode influenciar na formação do arco, nas gotas em transferência, na geometria e na aparência do cordão. A mistura mais usada para soldagem com transferência metálica por curto-circuito (modo de transferência mais utilizado no processo MIG/MAG) é Argônio com Dióxido de Carbono. Entretanto, a quantidade apropriada de CO₂ nessa mistura ainda é um ponto discutível. Por exemplo, a percentagem de CO₂ de uso mais popular é por volta de 20 a 25%, mas é difícil achar justificativas do porquê dessa faixa de valor. Ou de como exatamente a mudança do teor de CO₂ influencia tão significativamente o desempenho da soldagem. Assim, este trabalho teve o objetivo de verificar a influência do teor de CO₂ na mistura com Argônio sobre a regularidade da transferência metálica do processo MIG/MAG operando com curtos-circuitos e, conseqüentemente, procurar entender melhor seu efeito sobre a aparência e geometria de cordão, e geração de respingos.

Misturas gasosas para proteção compostas de Ar com teores diferenciados de CO₂ (de 2 a 100%) foram usadas para soldar chapas finas de aço carbono, utilizando-se um arame de mesma classe de composição química e mantendo um mesmo valor de corrente média. A avaliação da regularidade da transferência foi feita por um índice baseado em parâmetros estatísticos da variância dos tempos durante curtos-circuitos e arco aberto. A geração de respingos foi determinada pela rendimento de deposição. O efeito do teor de CO₂ sobre a geometria do cordão foi obtido por imagens de seções transversais das peças soldadas, enquanto a avaliação do acabamento dos cordões resultantes foi feita subjetivamente por visualização. Filmagens em alta velocidade foram aplicadas para estudar o comportamento da gota em transferência e medir o comprimento do arco sob a ação do teor de CO₂ nas condições consideradas como melhores para cada composição.

Os resultados obtidos permitiram revelar que o aumento do teor do CO₂ reduz a regularidade da transferência e aumenta proporcionalmente a geração de respingos, além de prejudicar a aparência do cordão. Porém, verifica-se também que quanto mais CO₂, maior é a penetração e menor é o reforço do cordão.

Palavras Chaves: Soldagem, MIG/MAG, Transferência Metálica por Curto-Circuito, Gás de proteção, CO₂.

LISKÉVYCH, O. **Study of the Influence of the CO₂ Content on the Metal Transfer Regularity and Process Stability of GMAW**. 2010. 101p. MSc Thesis. Federal University of Uberlandia. Uberlandia – MG.

Abstract

GMAW process has been widely used in the industry. The shilding atmosphere is one of the most important variables in this process since it can influence the arc formation, metal transfer, geometry and bead appearance. CO₂ blended with Ar is the most common shielding gas used for short-circuit GMAW (the most popular transfer mode). However, there is still lack of more scientific data to explain the performance of the mixtures. This paper presents a systematic study of the influence that CO₂ content in mixture with Argon has on the operational performance of the short-circuit GMAW. The objective of this study was to describe, to quantify and to explain the alterations in the metal transfer behavior, spatter generation, weld bead geometry and bead finish due to the different CO₂ contents in the shielding gas. Carbon steel plates were welded in adequate parametric conditions for each CO₂+Ar shielding gas composition (CO₂ ranging from 2% to 100%). These conditions were found by applying a metal transfer regularity index over welds carried out at different setting voltages for each gas blend. A target of 130 A was applied as base for comparison. Laser shadowgrafy with high speed filming and current and voltage oscillograms were used as analysis tools. The results showed (and confirmed) that the increase of the CO₂ content deteriorates metal transfer regularity, leading to excessive spatter generation and uneven bead appearance, but increases the penetration and the fusion area of the weld beads and improve bead convexity. In general, the CO₂ content should neither be lower than 10% nor higher than 30%, unless for thin plates.

Keywords: Welding, GMAW, Short-circuit metal transfer, Shielding gas, CO₂.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O processo de soldagem a arco com alimentação de arame maciço e proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW, ou também conhecido como MIG/MAG) é um processo de soldagem que produz a união dos metais pelo seu aquecimento e até fusão por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo continuamente alimentado e a peça. O eletrodo, na forma de arame, é fundido em sua extremidade e se transfere na forma de pequenas gotas para a poça formada na superfície da peça. As gotas em transferência e a poça de fusão são protegidas das contaminações atmosféricas por um gás ou mistura adequada de gases. Se este gás é inerte (Ar/He), ou seja, não entra em reação química com metal líquido, o processo é referenciado como MIG (Metal Inert Gas). Por outro lado, se o gás é ativo (CO_2 ou misturas Ar/ O_2 / CO_2), ou seja, um gás que interage com o metal líquido, o processo é chamado MAG (Metal Active Gas). Os dois processos diferem entre si unicamente pelo tipo de gás que utilizam. O processo MIG/MAG pode ser aplicado de forma automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, ou semi-automática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo soldador. Em ambos os casos, a alimentação do arame é realizada mecanicamente.

As principais vantagens do processo MIG/MAG, em relação aos outros processos de soldagem a arco, são a alta capacidade de produção (devido às altas densidades de corrente), a relativa portabilidade da tocha e a possibilidade de variação de modos da transferência metálica. As características citadas emprestam ao processo uma grande versatilidade operacional, atingindo separadamente ou em conjunto produção, acabamento bom do cordão de solda e possibilidade de soldar em diversas posições. Entretanto, como acontece em qualquer processo, o MIG/MAG também apresenta algumas limitações, tais como, a regulação do processo mais complexa, maior

sensibilidade aos correntes de ar, geração de respingos, acabamento de cordão prejudicado, custo elevado de consumíveis para soldagem de alumínio e aço inox, etc.

Hoje em dia, o MIG/MAG é o processo mais frequentemente usado na indústria para união da maioria dos metais em diversas faixas de espessuras. Apesar de vários trabalhos e pesquisas terem sido feitas nessa área até o presente momento, ainda existem muitas coisas para desenvolver e investigar sobre este processo, não só em automação e aumento da capacidade de produção, mas também em seus fundamentos. Uma delas é utilização adequada da atmosfera protetora.

O gás de proteção desempenha um papel muito importante no comportamento operacional deste processo. Atmosfera protetora afeta a estabilidade do arco, a transferência metálica, a geometria do cordão e a penetração. Uma das misturas mais usadas para soldagem de aços ao carbono é $\text{Ar}+\text{CO}_2$. Uma das características para justificar o uso de CO_2 em mistura do Argônio é o menor custo do primeiro, que promove a diminuição de custo geral do gás de proteção. Além disso, o CO_2 empreste ao Ar (facilmente ionizável) a capacidade de poder de oxidação necessária para emissão por campo em soldagens de materiais ferríticos (estabilidade de arco). Finalmente, o CO_2 , ainda mais do que o Ar, tem maior densidade do que ar atmosférico, melhorando a proteção gasosa, pois é mais resistente a ventos, principalmente na posição plana (em soldagens fora de posição, o fluxo do gás adequado é que garante a proteção de solda). O efeito oxidante do CO_2 , por outro lado, por ser pequeno é facilmente neutralizado com a adição de elementos desoxidantes no arame-eletrodo, o que conduz à formação de escória evitando assim as porosidades.

De uma forma geral, o teor de CO_2 nesta mistura é selecionado de acordo com a espessura de chapa a soldar: teores baixos de CO_2 são usados para as chapas finas, enquanto porcentagens maiores, e até o CO_2 , puro para as chapas mais grossas. Isso se explica no meio industrial pelo fato do CO_2 produzir um arco “mais quente”. Não se sabe realmente o que significa ser um “arco quente”. Poderia estar relacionado com um maior calor (entalpia), fato que não deve ser confundido com ter maior temperatura (temperatura, em si, representa maior calor interno ao se comparar diferentes gases). Esta maior entalpia é relacionada com a necessidade de dissociação molecular antes da ionização, além, naturalmente, do calor necessário para seu aquecimento e ionização. Assim, gases com maior entalpia (“mais quentes”) transferem mais calor para a chapa. Entretanto, a própria capacidade de transferir o calor de um gás é importante neste aspecto. O CO_2 , como apontado na literatura, é um gás de maior condutividade térmica

do que o Ar. Infelizmente, a literatura atual, ou mesmo o que já se conhece, não permite esclarecer alguns fatores de forma clara.

Apesar do exposto, é difícil encontrar explicações claras na literatura científica e técnica sobre alguns aspectos. Por exemplo, porque uma porcentagem de CO_2 numa mistura Ar+ CO_2 é melhor de que a outra percentagem para as dadas condições. Ou porque a mistura Ar+ CO_2 mais usada para soldar o aço carbono é com CO_2 por volta de 20% a 25%. Ou seja, em relação a faixa das misturas Ar+ CO_2 entre 20 e 100% de CO_2 sente-se falta de maiores informações na literatura corrente.

Dessa forma, é proposto nesse trabalho, como tema de uma dissertação de mestrado, um estudo sistemático da influência do teor de CO_2 na faixa de 2 até 100% na mistura com Ar sobre regularidade da transferência de metal, na geometria e acabamento de cordão, assim como no nível de geração de respingos. Espera-se, ao final, conseguir dados quantificados, os quais podem ajudar explicar as alterações que a mudança de teor de CO_2 faz durante a soldagem MIG/MAG operando em curto-circuito.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De uma forma geral, informações genéricas sobre o processo MIG/MAG, e suas diversas versões, podem ser encontradas facilmente na literatura, inclusive em livros (NIKOLAEV, 1978; ASM HANDBOOK, 1993; MARQUES, 2007, etc.). O texto a seguir tenta apresentar uma visão geral dos conhecimentos sobre alguns aspectos do processo MIG/MAG, mas mais especificamente sobre a influência do gás de proteção (em conjunto com outros parâmetros) sobre estabilidade do processo de soldagem e transferência metálica.

2.1. Transferência metálica

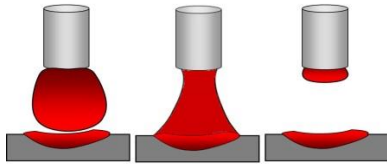
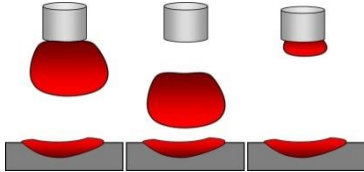
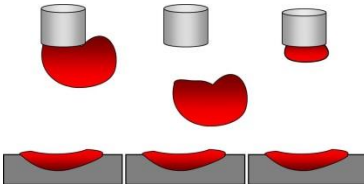
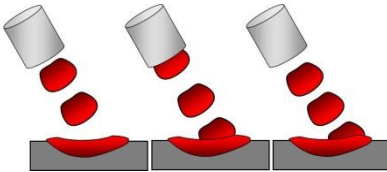
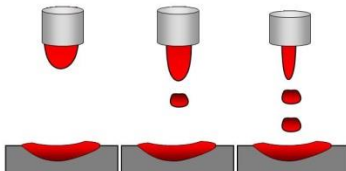
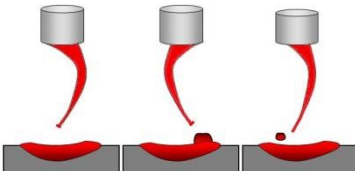
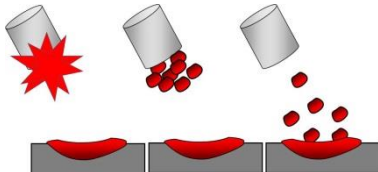
A American Welding Society (AWS) (1981) define a transferência metálica como maneira com que o material é transferido da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão. Soderstrom e Mendez (2008) citam que, desde o desenvolvimento do processo de soldagem MIG/MAG, vários estudos mostram que a forma com a qual a transferência metálica ocorre influencia na penetração, morfologia de cordão, estabilidade do processo e geração dos respingos. Segundo Modenesi (2009), o modo de transferência depende de diversos fatores como, por exemplo, os parâmetros elétricos do arco (tipo e valor da corrente, tensão e polaridade), o diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento energizado do eletrodo, pressão atmosférica, etc. Esse grande número de variáveis operacionais é responsável pela existência dos variados modos de transferência da gota.

2.1.1. Modos de transferência metálica

Observações da transferência metálica no processo MIG/MAG apareceram nas publicações na década de 1950 e hoje em dia continuam sendo de grande interesse. Diversas formas de transferência de metal podem ser observadas no processo de soldagem MIG/MAG. Assim, como resultado do trabalho de vários autores em diferentes países, diversas terminologias, muitas vezes conflitantes (devido à diversidade de traduções existentes e à criação de novos termos por autores nacionais), têm sido apresentadas na literatura. Por exemplo, Stenbacka e Persson (1989) citam e descrevem os modos básicos de transferência, a saber, globular, curto-circuito, goticular, goticular com alongamento e rotacional. Scotti (2000) acrescenta e descreve outros modos que ocorrem como combinação de dois ou mais modos básicos: globular/curto-circuito; globular/curto-circuito/globular, globular/curto-circuito/goticular ou goticular com alongamento; globular/goticular; e globular/ricocheteamento. Essas classes, denominadas como combinadas, se caracterizam pela ocorrência de dois (ou três) tipos de transferência periodicamente, ou seja, ocorre um tipo de transferência, vira em segundo, terceiro e depois volta a ser primeiro tipo de novo. Já Ushio et al. (1995) descreve outras subdivisões para tipo rotacional, a saber, “oscillating-spray” e “swirling-spray”, caracterizados pelos valores da corrente de soldagem muito altos. Em um trabalho recente do Ponomarev et al. (2009), se propõe sistematizar todas as transferências encontradas dependendo de modos, grupos e classes. De acordo com os autores, “modos de transferência” descrevem todas as formas pela quais a gota é transferida para a poça. As “classes” de modos são divididas em natural, controlada e combinada. Os grupos dentro da classe de transferência natural são caracterizados pela existência ou ausência de contato entre a gota a ser transferida e a poça de fusão e são denominados como “por curto-circuito” e “por vôo livre”.

Neste trabalho, por área de investigações ser muito estreita, apenas os modos básicos vão ser descritos. Um sistema de classificação para processo de soldagem MIG/MAG proposto pelo International Institute of Welding (IIW) e baseado em aspectos fenomenológicos da transferência de metal é apresentado na Tab.2.1. Os modos da transferência metálica mencionados acima estão relacionados com parâmetros de regulação do processo, ou seja, corrente de soldagem e tensão de arco, e tipos de gás de proteção. Os autores Scotti e Ponomarev (2008) procuraram apresentar os mapas dos campos de incidência dos modos principais de transferência metálica em MIG/MAG, considerando os três fatores influentes. A Figura 2.1 ilustra esse mapa.

Tabela 2.1 – Modos de transferência metálica de acordo com a classificação do IIW

Classe de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante
Por curto-circuito	Por curto-circuito		Tensão superficial
Por voo livre	Globular		Gravitacional
	Globular repulsiva		Gravitacional e reação
	Goticular (ou Goticular Projetada)		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Reações químicas

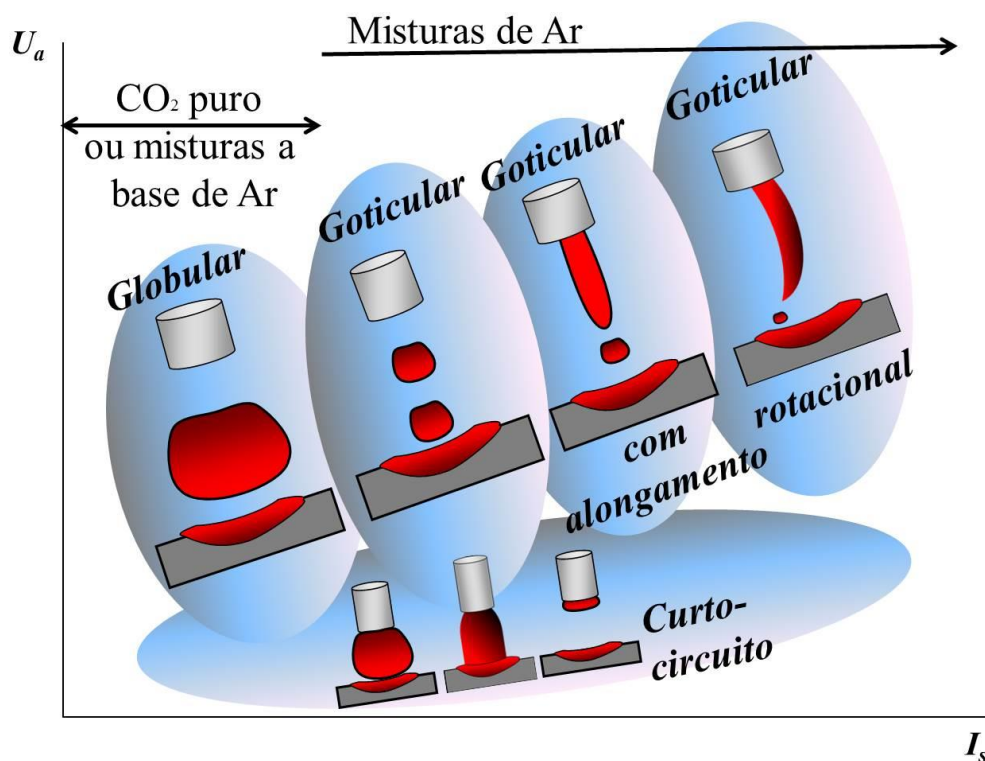


Figura 2.1 – Mapa esquemático dos campos de incidência dos modos principais de transferência metálica em MIG/MAG em função da corrente e da tensão

Como se pode observar na Fig. 2.1, os campos dos modos Globular Repulsiva e Explosiva não são apresentados no mapa, pois sobrepõem os campos Globular e Goticular. Além disso, os modos de transferência Globular Repulsiva e Explosiva são mais governados pelo gás de proteção e material do arame, respectivamente, do que pela corrente e tensão (comprimento de arco). É importante ressaltar que entre os campos dos modos existem zonas de intercessão, nas quais pode aparecer instabilidade de transferência causada por transição entre dois modos (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Algumas características dos modos de transferência metálica mencionados anteriormente são apresentadas a seguir. Transferência metálica por curto-circuito ocorre quando uma gota de metal líquido antes de se destacar da ponta de eletrodo encosta na poça de fusão e se transfere nela devido ação da força de tensão superficial. Segundo ASM Handbook (1993), esse modo é adequado para chapas finas ou para as quais não se requer a penetração total. Já modos de transferência metálica Globular e Goticular servem para soldagem das seções grossas. Segundo Modenesi (2009), Globular é definido como ocorrente quando o diâmetro da gota é dois ou três vezes maior do que diâmetro de

eletrodo. Definir a transferência Goticular é mais complicado, pois há três tipos diferentes: projetado; com alongamento; e rotacional. No caso de projetado, o diâmetro da gota é aproximadamente do mesmo tamanho do diâmetro de eletrodo. Normalmente, esse modo é muito estável. Em transferência Goticular com alongamento o tamanho da gota formada na ponta de eletrodo é reduzido. Modo rotacional ocorre na região operacional com correntes muito altas, quando o fio quase líquido roda de forma descontrolada devido ao campo magnético criado ao redor do arco voltaico. Esse modo de transferência é extremamente instável e é acompanhado pela grande quantidade de respingos finos.

Além dos modos naturais da transferência metálica mencionados acima, existem modos controlados, produzidos pelas fontes eletrônicas de soldagem com sistemas de controle. Há muitas razões por que esse controle seja desejável. Por exemplo, segundo Jones et al. (1992), um sistema de controle da transferência metálica pode precisamente monitorar a quantidade de metal transferido, ou enforçar o fluxo uniforme das gotas descentes da ponta do eletrodo, ou ainda fornecer gotas pequenas á qualquer corrente, minimizando respingos. Finalmente, pode regular o tempo que o metal fundido fica na ponta do eletrodo, controlando assim a temperatura do mesmo. Os modos controlados mais utilizados são: *Pulsado*, *Pulsado com corrente alternada*, *Curto-circuito controlado pela corrente*, *Curto-circuito controlado pela corrente e velocidade de alimentação*, etc.

2.2. Forças que agem na gota em transferência

Algumas teorias foram propostas para explicar o mecanismo da transferência metálica. Por exemplo, a teoria de balanço das forças (GREENE, 1960; WASZNIC; GRATT, 1983), a teoria da instabilidade Pinch (LANCASTER, 1978; ALLUM, 1985), a teoria da força de plasma (NEEDHA et al., 1960) e a teoria da velocidade critica (WASNIC et al., 1982). Entre essas teorias, a teoria da força de plasma, a teoria da velocidade critica e a teoria da instabilidade Pinch são propostos para explicar a transição de transferência metálica globular para transferência goticular.

2.2.1. Teoria de balanço das forças

A teoria de balanço das forças considera que existe um grupo de forças agindo na gota em transferência e determinando as características da transferência metálica. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), as principais forças que atuam sobre a transferência

são: força gravitacional (F_g); força de Lorentz (eletromagnética) (F_{em}); força devido á tensão superficial (F_r); força de arraste (F_a); força de reação por vaporização (F_v). A Figura 2.2 ilustra esquematicamente ação dessas forças.

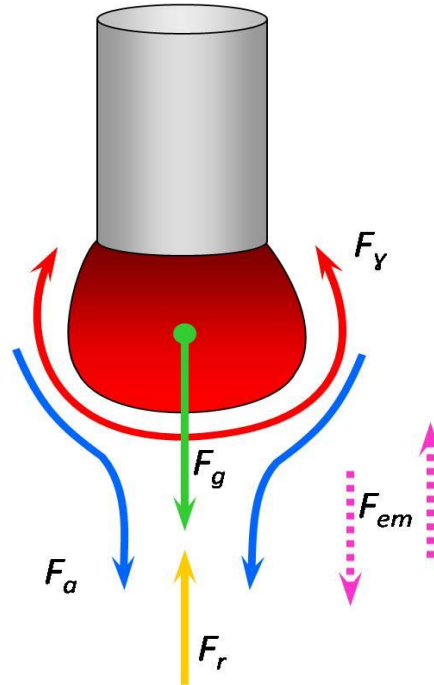


Figura 2.2 – Apresentação esquemática das forças que agem na gota em transferência

Pela teoria de balanço das forças, o destacamento da gota acontece quando as forças que promovem a transferência superam as forças que seguram a gota na ponta de eletrodo. A Equação 2.1 descreve matematicamente essa teoria:

$$F_g + F_a + F_{em} > F_r + F_v \quad (2.1)$$

Algumas forças sempre agem no mesmo sentido (promovendo ou atrapalhando transferência), outros mudam a sua influência dependendo das condições.

a) Força gravitacional

É a força originada pela ação da gravidade e é função da dimensão da gota (r) e do material da gota (ρ), como quantifica a Eq. 2.2.

$$F = \frac{4\pi r^3 \rho g}{3} \cos\theta \quad (2.2)$$

onde θ é um ângulo entre eletrodo e eixo horizontal.

A partir dessa equação, pode-se perceber que na posição plana, ou seja, quando $\cos\theta=1$, a força gravitacional favorece a transferência metálica, e quando a soldagem é realizada fora de posição plana, ou seja, $\cos\theta < 1$, essa força atrapalha a transferência. No modo de transferência Globular, o destacamento da gota ocorre quando força gravitacional é predominante.

b) Força devido á tensão superficial

Essa força é associada com formação de superfície livre da gota e é função da dimensão da gota e da energia da superfície do material ou tensão superficial do material no meio. Matematicamente, a força para manter uma superfície de uma gota esférica pode ser expressa de acordo com a Eq.2.3.

$$F_{\gamma} = 2\pi r\gamma \quad (2.3)$$

onde r é raio da gota e γ é tensão superficial do material.

O valor da força da tensão superficial varia de 400 até 800 dinas para diâmetros de eletrodo de 1,2 á 3 mm. È difícil determinar o valor exato de γ para uma gota em transferência, por ser uma variável dependente das condições de soldagem. Entretanto, alguns estudos foram feitos para investigar a influência desses na tensão superficial da gota. Por exemplo, segundo Rhee et al. (1992), γ depende de composição química do eletrodo, temperatura da gota, forma geométrica da gota, gradiente da temperatura na superfície da gota, composição química do meio (gás de proteção), etc. Além disso, quanto maior é a temperatura da gota em transferência, menor é a sua tensão superficial. Segundo Patskevych (1991), a tensão superficial do metal líquido pode ser controlada com elementos de liga adicionados no arame-eletrodo. Por exemplo, para diminuir a tensão superficial no caso de deposição simples do material na chapa de aço ao carbono foram adicionados maiores quantidades de Cu, Mn, Si no arame-eletrodo. Zielinska et al. (2008) em sua revisão da literatura mencionam que o coeficiente da tensão superficial do metal líquido muda, sendo influenciando por gases quimicamente ativos (os dois Oxigênio e Dióxido de carbono diminuem coeficiente da tensão superficial do aço). Por outro lado, eles mesmo divergem, porque aumento de teor de oxidante no gás de proteção deveria, assim, facilitar obtenção da transferência metálica Goticular, mas os autores demostram, através dos experimentos, que isso acontece só para pequenas adições de CO_2 .

Em relação à transferência metálica, a força devido à tensão superficial pode influenciar de duas maneiras, atrapalhando ou favorecendo a transferência da gota. No primeiro caso, a força devido à tensão superficial tende a segurar a gota na ponta do eletrodo quando a mesma estiver crescendo, fazendo-a mais volumosa. A Equação 2.3 demonstra que quanto maior é a gota (raio), maior é a força de tensão superficial. Se não tivesse as forças contraídas, a gota cresceria até o tamanho infinito. Mas, com crescimento da gota aumenta-se a massa dela e, conseqüentemente, a força de gravidade que age nela. E quando força de gravidade supera a força devido à tensão superficial a gota se transfere para a poça de fusão.

Mas também ocorrem os casos quando a força devido à tensão superficial favorece a transferência da gota. Quando se tem o contato entre a gota e poça de fusão (no caso de transferência por curto-circuito), a menor energia livre da poça de fusão (menor relação entre área de superfície livre e volume) faz com que a poça sugue a gota em transferência, como esquematicamente ilustra a Fig. 2.3. Os fenômenos descritos anteriormente não dependem da posição de soldagem.

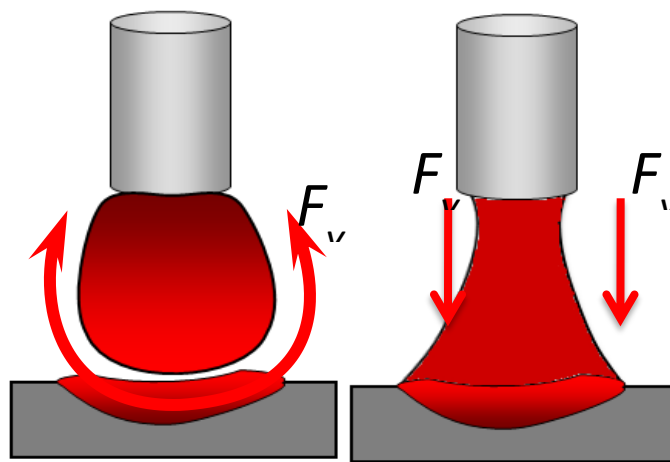


Figura 2.3 – Apresentação esquemática de ação da força devido à tensão superficial antes de contato da gota com a poça de fusão (esquerda) e depois do contato (direita)

c) Força eletromagnética (Força de Lorentz)

Como a gota em formação na ponta de eletrodo conduz corrente de soldagem, ela sofre de ação da força eletromagnética. Essa força existe devido às forças radiais no sentido do centro do condutor (no caso, da gota), induzidas por campo magnético que é gerado pela corrente de soldagem. A Figura 2.4 ilustra esquematicamente o mecanismo de ação da força eletromagnética na gota em transferência.

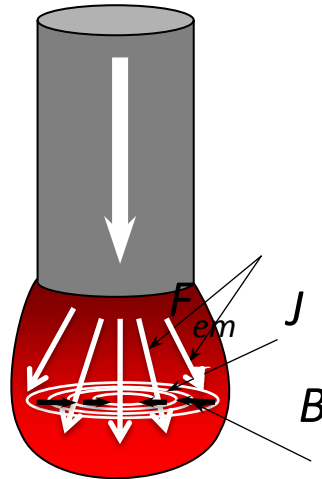


Figura 2.4 – Apresentação esquemática do mecanismo de ação da força eletromagnética na gota em formação (I_{sold} – corrente de soldagem, J – densidade da corrente, B – fluxo do campo magnético, F_{em} – força eletromagnética)

O que é importante em relação da transferência metálica é a pressão que a força eletromagnética faz na gota. Scotti e Ponomarev (2008) citam que a pressão na gota (P_{em}) devido à força eletromagnética é função da permeabilidade magnética do material do eletrodo, corrente de soldagem (I), raio da gota (R) e posição no plano em que se está medindo (r), ou seja, para seções transversais maiores (grandes R), a pressão máxima é menor. No centro da seção ($r=0$), a pressão é máxima. A Equação 2.4 demonstra essa dependência.

$$F_{\text{em}} = \frac{\mu I^2}{4\pi^2 R^2} (1 - r^2/R^2) \quad (2.4)$$

O comportamento de destacamento da gota em transferência, segundo Waszink e Graat (1983), é determinado por distribuição da corrente dentro dela, ou seja, depende de magnitude e direção da força eletromagnética induzida: a força de Lorentz pode atuar ou como força de destacamento (se linhas da corrente são divergentes) ou, ao contrário, como força de junção da gota ao eletrodo (se as linhas da corrente são convergentes). Também os cálculos detalhados feitos por Haidar (1998) indicam que, dependendo das condições de soldagem, o componente axial da força eletromagnética pode apresentar essa dupla função. Além disso, o autor demonstra que o componente radial da força

eletromagnética é dominante quando o destacamento da gota e é esse componente que é o responsável pela transição de transferência metálica de Globular para Goticular.

d) Força de arraste

Ação da força de arraste na gota ocorre devido aos fenômenos aerodinâmicos. Por causa da alta pressão, o jato de plasma contornando a gota gera vórtices, arrastando assim a gota pelo fluxo. A Figura 2.5 demonstra esquematicamente o mecanismo de ação dessa força.

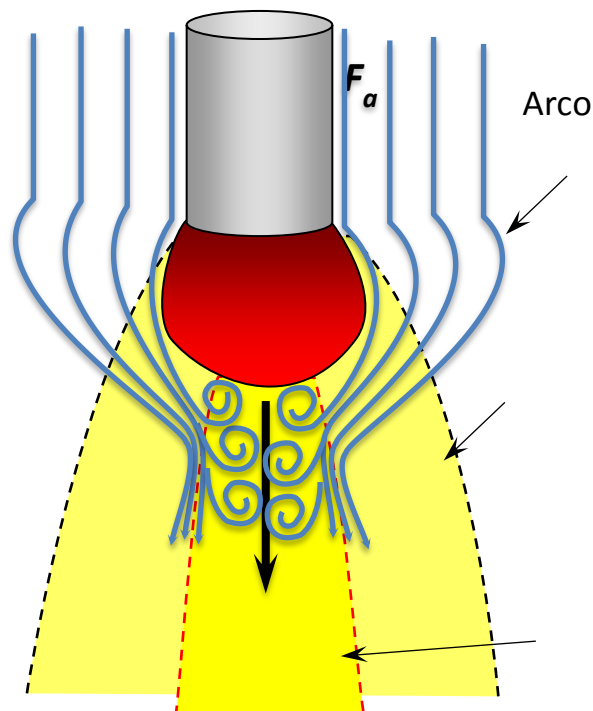


Figura 2.5 – Apresentação esquemática do mecanismo de ação da força de arraste

Scotti e Ponomarev (2008) citam que a força de arraste depende da dimensão da gota, da densidade e da velocidade do jato de plasma e do respectivo coeficiente de arraste do sistema. Maslovsky (2005) através da simulação numérica demonstra, que ação da força de arraste torna-se mais significativa quando se trabalha com correntes mais altas e gases com maior densidade (Ar, CO₂).

É óbvio que a força de arraste sempre vai favorecer ao destacamento da gota da ponta de eletrodo, pois a direção do jato sempre ocorre de área menor para área maior, ou seja, do eletrodo para a peça a ser soldada.

e) Força de reação por vaporização

Essa força ocorre por causa de vaporização metálica na superfície da gota na área de acoplamento com o arco, devido às altas temperaturas, ocasionando a aceleração térmica das partículas de vapor na coluna de plasma. A reação ocorre sobre a gota e sempre atua no sentido contrario do destacamento da gota.

O fenômeno depende da corrente de soldagem (temperatura na região de soldagem), da composição química do metal líquido e da atmosfera protetora. Jacobsen (1992), por exemplo, concluiu que com o aumento da concentração de O_2 no gás de proteção e, consequentemente, de uma maior oxidação da superfície do eletrodo, a quantidade de vapores aumenta. Isso, por sua vez, piora a formação das gotas e atrapalha o seu destacamento, pois a força de reação por vaporização torna-se maior. Também, segundo Kim e Eagard (1992), força de reação por vaporização pode ser responsável pelo desvio da gota em formação na ponta de eletrodo. Os autores observaram a transferência metálica Globular Repulsiva utilizando misturas de $He+O_2$ e $Ar+CO_2$.

Resumindo, o destacamento adequado das gotas e a sua transferência correta para a poça de fusão tem uma influência significativa na qualidade da solda.

2.2.2. Teoria da instabilidade Pinch

Teoria de balanço das forças funciona bem para correntes inferiores a corrente de transição. Para correntes acima, a fluidez do metal da gota aumenta muito e explicar a transferência metálica pela ação das forças estáticas torna-se mais difícil. Dessa forma, o fenômeno de transferência das gotas pode ser explicado com outra teoria – teoria de instabilidade Pinch (KANNATEY-ASIBU, 1991). Segundo Hazlett e Gordon (1957), essa teoria vem do modelo de Rayleigh que descreve a instabilidade da coluna líquida. Qualquer alteração nela provoca ativação das forças que causam a repartição da coluna líquida e formação das gotas, pois gotas têm energia livre menor do que coluna líquida. As condições para repartição da coluna foram descritos por Rayleigh, baseando-se nos princípios de conservação de energia do sistema. Ele afirma que o tamanho provável da gota formada da coluna líquida será duas vezes o diâmetro da coluna líquida. De acordo com teoria da instabilidade Pinch, foi postulado que a força de Pinch na coluna líquida, devido á força eletromagnética gerada por campo magnético, é que causa o rompimento da coluna em gotas.

2.3. Transferência metálica por curto-circuito

Aporte de calor baixo e, conseqüentemente, poça de fusão resultante pequena e de solidificação rápida fazem o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito muito adequado para soldagens fora de posição e dos metais de espessuras finas (MARQUES, 1991).

Dizendo de forma simples, esse modo de transferência ocorre quando a velocidade de alimentação supera a velocidade de fusão do arame e, conseqüentemente, o arame na forma de gota de metal líquido toca na poça de fusão. Segundo Norrish (1992), nesse caso a força eletromagnética e a força devido á tensão superficial são dominantes, comparando com pequena influência das outras forças estáticas. Curto-circuito ocorre geralmente com tensões baixas e correntes relativamente não altas. Durante o curto-circuito, a tensão entre o eletrodo e material de base diminui até o valor próximo a zero e corrente aumenta até um valor alto. Neste momento, o arco se apaga e a gota se transfere pela tensão superficial (Fig. 2.6). Depois ocorre re-ignição do arco e o ciclo começa de novo (PONOMAREV, 2004).

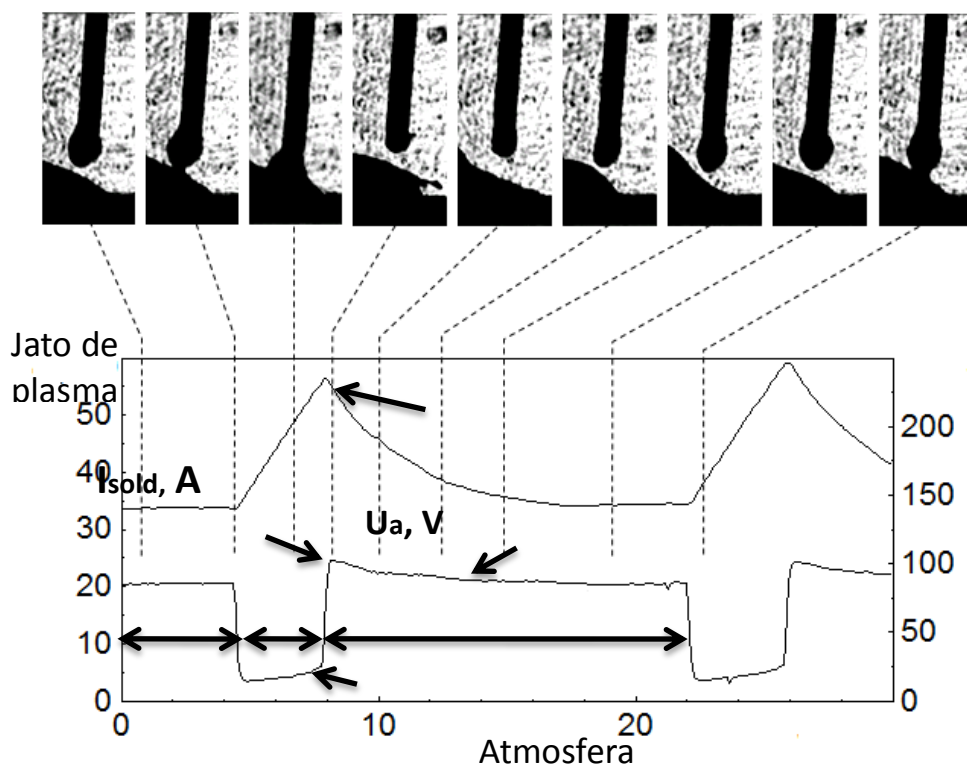


Figura 2.6 – Curvas da tensão e corrente com imagens sincronizadas típicos para transferência metálica por curto-circuito (PONOMAREV, 2004)

Como desvantagens do processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito podem ser citados o risco de altos níveis de respingos, a natureza randômica dos curtos-circuitos e o paradigma do modo de operação, a qual produz os defeitos tipo a falta de penetração, quando aplicado em espessuras maiores (NORRISH, 1992). Também, o processo MIG/MAG, quando opera em curto-circuito convencional, sempre é de controle mais difícil do que os outros processos MIG/MAG com transferência metálica por voo livre.

No texto a seguir serão apresentadas algumas particularidades desse modo de transferência, tais como, influência da geometria da gota na transferência e geração de respingos durante a soldagem.

2.3.1. Geometria da gota

A geometria da gota fundamentalmente influencia no balanço das forças dominantes durante a transferência. A gota com menores dimensões terá a tendência de formar um menisco estável entre o eletrodo e a poça de fusão com ação da força devido à tensão superficial não suficiente para promover a transferência por si só (GARY, 2003). Entretanto, de acordo com Bless (1974), quando a gota alcança o tamanho crítico, ela se transfere devido à ação de tensão superficial apenas. Ambos os casos são apresentados na Fig. 2.7.

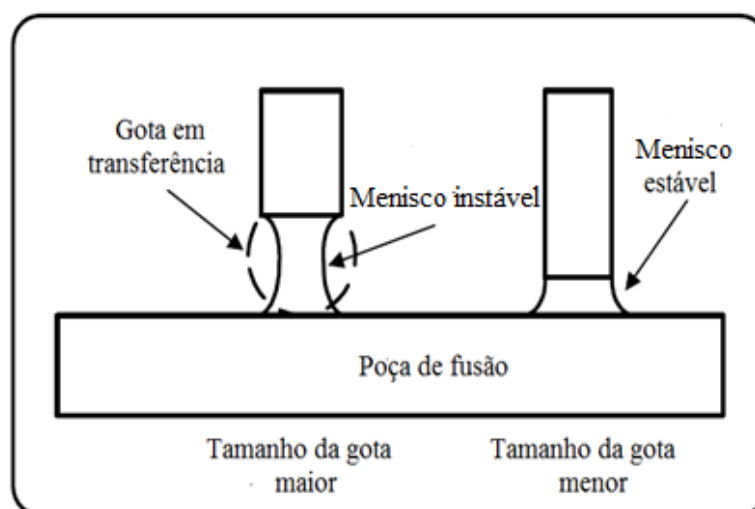


Figura 2.7 – Condições da transferência metálica dependendo do comprimento do arco e do tamanho da gota (GARY, 2003)

Kiyohara et al. (1973) desenvolveram uma equação para determinar o comprimento crítico da coluna líquida (Eq. 2.5). Segundo Gary (2003), para comprimento da coluna líquida menor do que o comprimento crítico o rompimento de menisco é impossível. Portanto, quando a coluna alcança o comprimento crítico, o menisco torna-se mais fino e rompe. De acordo com essa equação, o comprimento crítico é inversamente proporcional ao quadrado da corrente

$$L_b = \frac{4\gamma R^2}{\alpha I^2} \quad (2.5)$$

onde L_b é comprimento crítico da coluna líquida, α é constante, γ é coeficiente da tensão superficial, R é o raio do eletrodo e I é corrente de soldagem.

Posteriormente, Bless (1974) fez uma correção nessa equação ao afirmar que a gota não pode ser transferida apenas pela tensão superficial se ela é menor do que o diâmetro do arame. Através de uma análise de transferência das gotas de mercúrio e água ele também conseguiu uma equação que considera o tempo da transferência da gota para a poça de fusão como função de tensão superficial e massa da gota (Eq. 2.6).

$$T_k = k \sqrt{\frac{M}{4\pi\gamma}} \quad (2.6)$$

onde k é definido como constante e M é massa da gota.

A equação implica que uma gota de tamanho crítico vai se transferir para a poça de fusão em um tempo mínimo; o tempo de transferência aumenta correspondentemente com aumento de massa da gota.

Então, pode-se esperar que apenas a tensão superficial possa fornecer a transferência metálica da gota quando ela atinge o tamanho crítico, com tempo de rompimento baseado no volume da gota. Entretanto, se uma gota forma o menisco estável, o fluxo da corrente seria requerido para fornecer a transferência, cuja magnitude depende do comprimento do menisco.

2.3.2. Geração dos respingos em transferência por curto-circuito

Segundo ASM Handbook (1993), o respingo é definido como uma partícula de metal líquido expelida durante a soldagem. Pesquisadores indicam uma quantidade

grande de fatores que provocam a geração dos respingos. Entre eles, o fator mais governante, segundo Nikolaev (1978), é relacionado com irregularidades da poça de fusão durante a transferência metálica. Tipicamente, isto é observado quando a tensão é muito baixa ou a corrente é muito alta para a combinação dada de arame-eletrodo e gás de proteção. As correntes de soldagem elevadas resultam em crescimento de quantidade dos respingos devido à amplificação das forças no arco, o que, por sua vez, provoca uma dispersão de metal líquido para fora da poça de fusão. No seu trabalho, Gary (2003) observa que a geração dos respingos ocorre durante a transferência da gota, ou seja, durante curto-circuito, quando o arco está apagado. Entretanto, alguns trabalhos (KATAOKA et al., 2008) demonstram que o respingo ocorre também durante o arco aberto.

Os principais mecanismos e fenômenos citados na literatura que resultam na geração dos respingos associados com transferência metálica por curto-circuito serão listados a seguir:

- Curtos-circuitos instantâneos;
- Oscilações da poça de fusão;
- Deslocamento da gota em formação na ponta do eletrodo;
- Contato entre a gota e a poça de fusão que causa dispersão de metal líquido da poça;
- Pequenas explosões que ocorrem devido o aquecimento exagerado do metal após o curto-circuito aos correntes elevadas;
- Repulsão na poça de fusão devido á força magnética de curto-circuito;
- Aumento de energia gerada na região de arco devido ao teor de CO₂ grande no gás de proteção;
- Rompimento de menisco de metal líquido durante a transferência;
- Outros fatores, cuja combinação causa alterações na corrente e na tensão de soldagem, tais como, qualidade prejudicada de arame-eletrodo, impurezas na superfície do metal de base (oleosidade, tinta, etc.), ângulo de tocha e/ou DBCP não adequados, fluxo de gás de proteção não suficiente, mistura não adequada dos gases, umidade na atmosfera protetora, etc.

A maioria dos fatores citados anteriormente pode ser controlada ou restringida através das varias técnicas.

Porém, no caso de transferência metálica por curto-circuito, os fenômenos mais pronunciados que causam geração dos respingos são devido aos curtos-circuitos instantâneos e ao rompimento de menisco durante a transferência, cujas particularidades são descritos no texto a seguir.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), a natureza de curto-circuito instantâneo (ou incipiente) além de ser relacionada com as forças normalmente atuantes (tensão superficial, eletromagnética, gravitacional, etc.), também é devida o movimento caótico da superfície da poça de fusão e da gota formada na ponta de eletrodo. Caso o balanço destas forças seja favorável, a gota será repelida no momento em que encosta na poça e o curto-circuito não será acompanhado pela transferência metálica propriamente dita. Estes toques provocam a separação dos pedaços de material da gota, apesar da força de tensão superficial tentar sugar a gota para a poça, mas, por algumas razões, não consegue, criando os respingos (GARY, 2003).

No seu estudo, Ueguri et al. (1986) relataram que o crescimento da corrente durante o curto-circuito instantâneo produz um desvio muito forte da gota atrapalhando a transferência metálica. O nível da corrente que vai iniciar a repulsão é relacionado com o raio de curvatura na ponta de contato entre a gota e a poça de fusão, segundo Lebedev et al. (1975), e pode ser determinado através da Eq. 2.7:

$$I_w = \pi \sqrt{\frac{2\gamma R_k}{\mu_0}} \quad (2.7)$$

onde I_w é o nível crítico da corrente, γ é o coeficiente da tensão superficial, e R_k é o raio de curvatura na ponta de contato entre a gota e a poça de fusão.

A Equação 2.7 implica em que níveis mais altos da corrente são requeridos com crescimento do raio de curvatura da gota para iniciar a repulsão da gota. Entretanto, o crescimento da gota por si não necessariamente vai aumentar o raio de curvatura. Por exemplo, segundo Gary (2003), o crescimento exagerado da gota usando CO_2 como gás de proteção é prejudicial para processo de transferência, pois a forma da gota fica irregular com a tendência de momento rotacional e a curvatura na ponta de contato não suficiente para a transferência. A área de contato minimizada combinada com o

crescimento rápido da corrente, que normalmente acompanha o curto-circuito, facilita muito a repulsão da gota e como resultado aumenta a geração dos respingos.

Enquanto o rompimento do menisco líquido durante o curto-circuito, a geração de respingos durante este período é relacionado com picos muito altos da corrente de soldagem (LIPEI; JINGCHANG; ZHIHUAN, 1988). Ainda de acordo com Zaruba (1970), geração de respingos neste momento é uma consequência direta da força elétrica explosiva. Dessa maneira, pode ser feita uma suposição de que a geração dos respingos pode ser diminuída através de redução da corrente de curto-circuito ou queda de tensão no menisco líquido, através de diminuição do seu comprimento ou através de minimização do período de curto-circuito.

Análise detalhada feita por Zaruba (1970) determinou que o calor gerado no menisco líquido é suficiente para vaporizar o metal fundido quando ele alcança o diâmetro determinado. A análise confirmou que a densidade da corrente que passa por um menisco líquido na hora de rompimento foi na faixa adequada para explosão elétrica de condutor. Ogasawa et. al. (1987) observaram que a supressão de geração dos respingos é alcançada quando o curto-circuito é acompanhado pela redução da corrente.

Muitos trabalhos foram feitos para analisar a geração dos respingos durante soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito. Por exemplo, Kang e Rhee (2001) desenvolveram um modelo para estimação da quantidade dos respingos usando várias características das curvas da tensão e da corrente de soldagem. Chen et al. (1996), no seu estudo, explicaram o mecanismo de ocorrência dos respingos durante a transferência metálica por curto-circuito. Somando, eles demonstraram que os respingos são gerados devido as reações químicas na hora de ocorrência dos curtos-circuitos instantâneos. Kang e Na (2005) investigaram na forma quantitativa a geração dos respingos dependendo da corrente de soldagem e volume da gota. Kataoka, Ikeda e Yasuda (2008) estudaram a influência dos elementos de liga no arame-eletrodo no fenômeno de geração dos respingos e observaram as alterações determinadas, a saber, adição de Ti diminui geração dos respingos através de restrição das oscilações de poça de fusão; adição de K no arame faz com que seja possível de reduzir a geração dos respingos através de estabilização de arco e transferência metálica; por sua vez, adição de REM (rare earth metal) e Ca provoca um aumento em comprimento do arco, o que causa flutuações fortes da gota e mudanças de formato do arco e, conseqüentemente, aumento em geração dos respingos.

É comumente aceito que os respingos podem ser diminuídos através de otimização dos parâmetros de soldagem. Melhor estabilidade do processo é refletida em distribuições estatísticas da tensão, corrente, períodos de curtos-circuitos e arco aberto (GUPTA et. al., 1988), o que conduziu para desenvolvimento dos modelos estatísticos de estimação de quantidade dos respingos, por exemplo, o do Kang e Rhee (2001). Segundo Lewis e Bax (1964) e Smith (1962), para sistemas de controle convencionais (tensão constante) redução dos respingos e aumento em estabilidade do processo é alcançado através de otimização da tensão e adição das indutâncias em série no circuito de soldagem.

2.4. Gases de proteção em soldagem

Segundo Jonsson et. al (1995), o gás de proteção é uma variável crítica que influencia o processo de soldagem. Ele tem as funções primárias de atuar como meio adequado para que a corrente possa fluir, sustentando o arco, e como proteção do metal fundido da oxidação do meio ambiente, deste o eletrodo até a poça de fusão. Além disso, o gás de proteção influencia sobre a geometria e as propriedades mecânicas do cordão de solda (Lyttle e Stapon, 1990; Norrish, 1992; Jonsson et. al, 1995). A Fig. 2.8 ilustra os principais efeitos dos gases de proteção em uma soldagem MIG/MAG, com ênfases em outras funções além das apontadas.

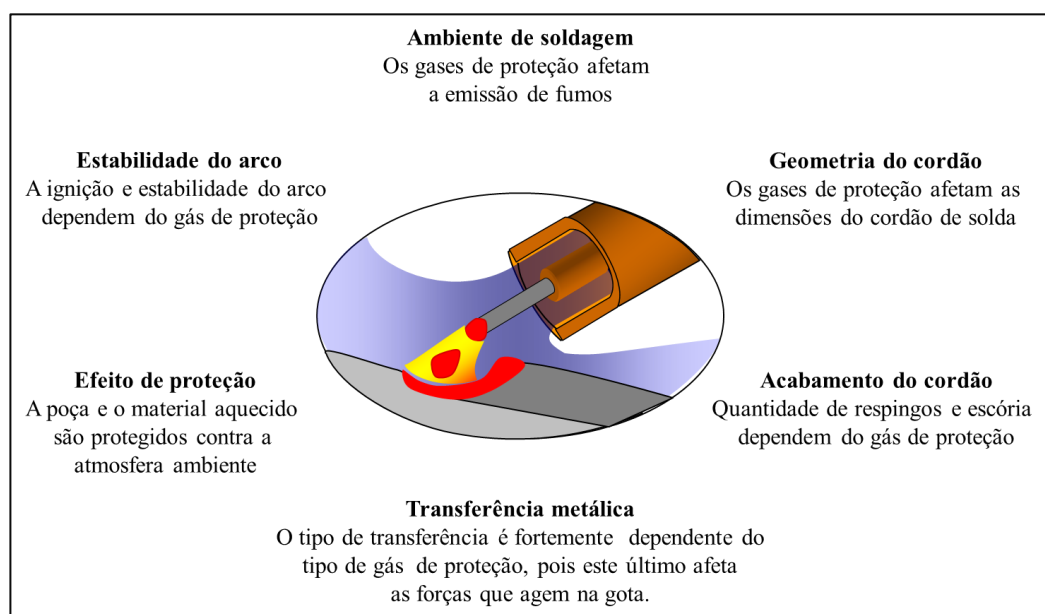


Figura 2.8 – Principais funções e características dos gases de proteção (modificado SUBAN; TUSEK, 2001)

Cada tipo de proteção gasosa (gás puro ou mistura) possui propriedades físico-químicas específicas que a torna mais ou menos adequada para uma dada aplicação. Na natureza é muito difícil encontrar um gás que reúna um conjunto de propriedades adequadas á uma dada situação. Por isso, procura-se obter as propriedades desejáveis através da mistura de diferentes gases. Segundo Zielinska et al. (2008), gases ou misturas gasosas mais frequentemente usadas são argônio e/ou hélio no caso de MIG e CO₂ puro ou na mistura com Ar e O₂, assim como H₂ e N₂, no caso de processo MAG.

2.4.1. Caracterização dos gases de proteção

Os gases para soldagem apresentam como propriedades básicas importantes o potencial de ionização, a condutividade térmica, o potencial de oxidação e a densidade. Scotti e Ponomarev (2008) também consideram como característica muito importante a eficiência de proteção, que é a capacidade do sistema excluir os gases do meio ambiente. Essa característica, além do tipo e vazão de gás de proteção, também depende da configuração do bocal da tocha e da junta. Além das propriedades, uma importante característica dos gases de proteção é a pureza. Dependendo do metal que está sendo soldado e do processo de soldagem utilizado, pequenas quantidades de impurezas no gás podem afetar significativamente a velocidade de soldagem, aspecto superficial do cordão, solidificação do cordão de solda e quantidade de porosidades.

Descrição das algumas propriedades dos gases de proteção utilizados para soldagem é apresentada a seguir, acentuando a atenção nas propriedades do Ar e CO₂.

a) Potencial de ionização

A formação de plasma é dependente do potencial de ionização, que é a energia, expressa em elétrons-volts, necessária para remover um elétron de um átomo, fazendo dele um íon (LYTTLE e STAPON, 1990). Os valores do potencial de ionização dos gases de proteção mais usados em soldagem são indicados na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Potencial de ionização dos gases de proteção (modificado SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Gás de proteção	Ar	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂
Potencial de ionização (eV)	15,8	14,4	24,6	13,5	14,5	13,2

A abertura e estabilidade do arco são fortemente dependentes do potencial de ionização do gás de proteção usado (NORRISH, 1992). Os gases com um potencial de ionização baixo transformam átomos em íons facilmente, ajudando a manter o arco suave e estável, enquanto os gases com potencial de ionização elevado apresentam dificuldade para abertura e estabilidade do arco.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), para um mesmo comprimento do arco e mesma corrente de soldagem, a tensão é menor para os gases com menor potencial de ionização (Ar) comparando com gases com maior potencial de ionização (He).

b) Densidade

A densidade é um dos fatores que influenciam a eficiência do gás de proteção. A Tabela 2.3 mostra os valores de densidade dos gases de proteção.

Tabela 2.3 – Densidade dos gases de proteção (modificado SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Gás de proteção	Ar	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂
Densidade (kg/m ³)	1,78	1,98	0,18	0,07	1,16	1,33

Os gases mais densos, tais como Ar e CO₂, têm maior eficiência de proteção e requerem menor vazão. Os gases “mais leves” (He) precisam de uma maior vazão para fornecer a proteção adequada da poça de fusão e da gota em transferência. Porém, nas soldagens fora de posição plana, quanto menos denso é o gás maior é a eficiência de proteção (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). Segundo AWS (1987), a densidade dos gases afeta o aquecimento do arco e a sua proteção.

c) Condutividade térmica

A condutividade térmica de um gás é a capacidade do mesmo conduzir calor (para ambiente ou para a peça). Esta característica, junto com o potencial de ionização, influencia na escolha dos parâmetros de regulagem, ou seja, quanto menor a condutividade do gás, maior é a tensão necessária para manter o mesmo arco.

A Tabela 2.4 mostra os valores de condutividade térmica para os gases de proteção utilizados em soldagem. Deve ser mencionado que no caso dos gases moleculares (H₂,

N₂, CO₂) o calor transferido pode ser aumentado, pois antes de ionização estes se dissociam consumindo o calor.

Tabela 2.4 – Condutividade térmica dos gases de proteção (modificado SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Gás de proteção	Ar	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂
Condutividade térmica (mW/m.K)	16,4	14,7	142,6	168,3	24,0	24,2

Como mostra um trabalho do Lyttle e Stapon (1990), a diferença em condutividade térmica dos gases de proteção causa as diferenças nas características resultantes de deposição. Os autores afirmam que os gases com maior condutividade térmica transferem mais calor para a peça, influenciando no perfil do cordão, fazendo a penetração e a fluidez da poça de fusão mais pronunciadas. Por exemplo, segundo ASM Handbook (1993), He, que tem maior condutividade térmica, produz uma poça de fusão maior e mais distribuída, enquanto o Ar, que tem menor condutividade térmica, produz um perfil de cordão com maior penetração no centro (Fig. 2.9).

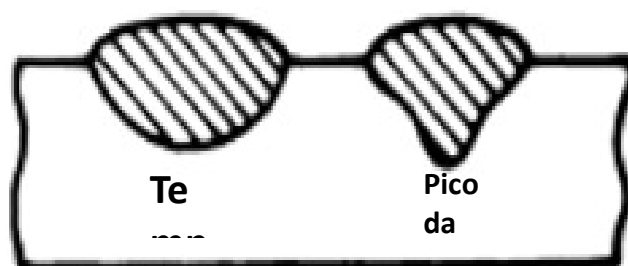


Figura 2.9 – Perfil do cordão de solda utilizando He e Ar (ASM HANDBOOK, 1993)

Porém, como mencionam Scotti e Ponomarev (2008), a condutividade térmica neste caso é só um dos fatores que influenciam. A ação mecânica da gota em transferência também governa a formação do perfil do cordão, pois, por exemplo, no processo TIG, mesmo com Ar puro, não se tem cordão com forma de cálice.

De acordo com Lyttle e Stapon (1990), para alcançar a transferência de calor otimizada para uma dada aplicação, normalmente no gás de proteção se adicionam He ou CO₂, devido às suas capacidades de troca de calor.

d) Potencial de oxidação e reatividade

Entre os gases utilizados para proteção, argônio e hélio, por exemplo, são gases inertes, pois não tem qualquer influência química no metal depositado. Gases oxidantes, como o dióxido de carbono e o oxigênio, reagem com elementos do metal de adição ou metal de base.

O potencial de oxidação influencia, além da aparência do cordão resultante, na sua dureza e resistência, na quantidade da escoria, emissão dos fumos, formação de óxidos de ozônio e nitrogênio, fluidez da poça de fusão (STEBACKA e PERSSON, 1989). Segundo Kim et al. (1991), o potencial de oxidação também influencia no tamanho das gotas em transferência. A Figura 2.10 demonstra a tendência de tamanho das gotas em função da corrente de soldagem para gases de proteção com potenciais de oxidação diferentes. Pode-se perceber que o tamanho das gotas no caso da mistura Ar+2%O₂ varia muito com aumento da corrente, mas no caso de proteção com He não representa alterações significantes, e até menos com proteção de CO₂.

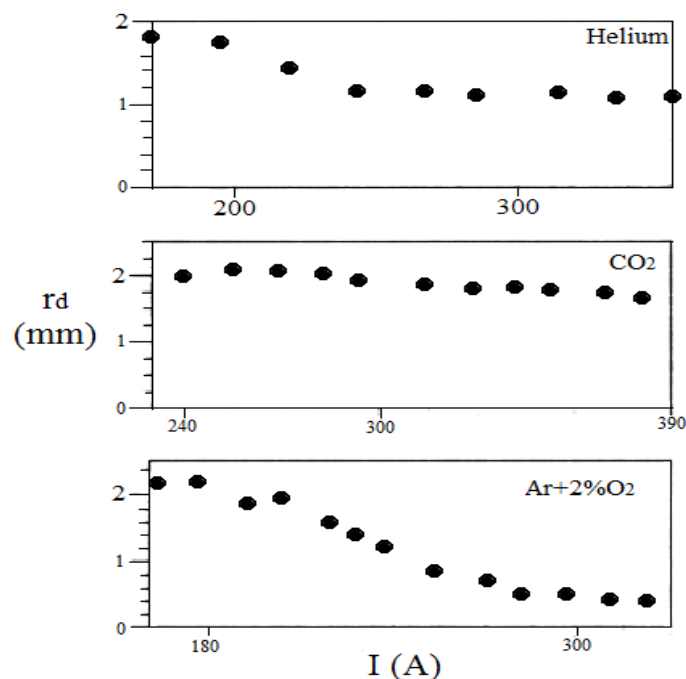


Figura 2.10 – Efeito do gás de proteção no tamanho das gotas, onde r_d é raio da gota e I é corrente de soldagem media (KIM et al., 1991)

Modenesi e Nixon (1994) obtiveram como resultado em seu trabalho que a presença de um componente oxidante no gás de proteção melhora perfil do cordão de

solda, reduzindo seu ângulo de molhabilidade e altura de reforço, aumentando a penetração e reduzindo a tendência de mordedura pela redução da tensão superficial da poça. Também existe opinião de que a adição de gases reativos como o oxigênio e o dióxido de carbono aumentam a estabilidade do arco e afetam o tipo de transferência metálica obtida. Entretanto, existem os estudos que demonstram a adição dos elementos-oxidantes no gás de proteção pode ser prejudicial. Por exemplo, Jacobsen (1992) no seu trabalho demonstra que o aumento de concentração de O_2 e, conseqüentemente, maior oxidação da superfície do eletrodo faz com que a vaporização dos elementos de liga aumenta (comparado com Ar puro), afetando assim a formação das gotas e destacamento destes, devido o crescimento da força de reação por vaporização. Por fim, pode-se citar Stebacka e Persson (1989), os quais demonstram que para uma boa estabilidade, a quantidade mínima que deve ser adicionada no gás de proteção é de 5% de CO_2 ou 2% de O_2 .

2.4.2. Gases usados em soldagens de aços ao carbono

a) Argônio (Ar)

Argônio promove uma excelente penetração e perfil do cordão, pois produz uma coluna de arco constrita com alta densidade de corrente, a qual concentra a energia do arco em uma pequena área, resultando em uma profunda penetração do tipo “cálice”. Seu baixo potencial de ionização resulta em uma abertura fácil do arco. O Ar é extraído do ar atmosférico, garantindo-lhe um custo relativamente baixo. Também, segundo Lyttle e Stapon (1990), a utilização deste resulta em propriedades mecânicas excelentes do cordão de solda. Vários estudos mostram que adição dos elementos-oxidantes no Ar aumenta a facilidade de emissão catódica e melhora estabilidade do arco (ZIELINSKA et al., 2008).

Argônio puro é geralmente usado em metais de base não ferrosos, como o alumínio, níquel, cobre e ligas de magnésio e metais reativos como o titânio. Entretanto, acredita-se que o Ar, tanto puro quanto na mistura, facilita a formação de ozônio (O_3) na região próxima ao arco, sendo um gás muito tóxico (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

b) Dióxido de Carbono (CO_2)

Dióxido de carbono é um gás ativo geralmente usado em soldagem de aço carbono. É facilmente disponível e relativamente barato, o que empresta a este gás grande usualidade. Porém, segundo Lyttle e Stapon (1990), o CO_2 puro normalmente é aplicado para proteção de arames maciços e tubulares só quando custo reduzido é requerido. Mas,

na maioria dos casos, isto é uma economia falsa, pois após de soldagem com CO₂ puro, procedimentos de limpeza podem ser necessários para fazer o produto aceitável. Segundo Baixo e Dutra (1989), devido á grande condutividade térmica do CO₂ em temperaturas elevadas, a região ionizada que compõem o plasma sofre uma constrição, reduzindo sua área de interface com a extremidade inferior da gota fundida. Este efeito de constrição, em conjunto com a natureza oxidante da atmosfera, promove um desequilíbrio das forças eletromagnéticas que atuam sobre a gota durante sua fase de crescimento e o aparecimento de forças repulsivas, oriundas da vaporização de óxidos, que conduzem a gota em movimento oscilatório. Isto, por sua vez, provoca geração elevada de respingos e formação irregular de superfície do cordão de solda. Além disso, muitas vezes a transferência metálica repulsiva é observada durante processo de soldagem usando CO₂ puro como gás de proteção (KIM, 1993).

Portanto, de acordo com Kuwana e Sato (1986) e Lyttle e Stapon (1990), os níveis maiores da corrente de soldagem e comprimentos de arco menores podem melhorar a estabilidade da transferência metálica e minimizar a geração dos respingos nas algumas aplicações.

c) Mistura de Argônio com Dióxido de Carbono

Esta mistura é mais utilizada no processo MIG/MAG para aços ao carbono e de baixa-liga. Uma das razões para justificar o uso de CO₂ na mistura com argônio é devida ao custo reduzido. Este benefício foi descoberto ainda em 1956, quando Rothschild relatou que CO₂ pode ser uma alternativa para utilização de Ar em soldagem com proteção gasosa. Além disso, de acordo com AWS (1987) adições de dióxido de carbono (5-10%) estabilizam o arco, melhoram a molhabilidade e forma do cordão. Segundo Haidar e Lowke (1997), o CO₂ empresta ao argônio (facilmente ionizável) a capacidade de oxidação necessária para a emissão por campo nas soldagens de materiais ferríticos, resultando em arco mais estável. Entretanto, segundo Soderstrom e Mendez (2008), a qualidade da solda e rendimento de deposição diminuem com aumento de teor de CO₂.

Por outro lado, segundo Scotti e Ponomarev (2008), a adição do CO₂ ao Ar melhora a geometria e penetração do cordão de solda, fazendo que o perfil de penetração torna-se mais distribuído e aumenta a zona fundida. Além disto, o CO₂, ainda mais do que o Ar, tem maior densidade do que o ar atmosférico, então, a mistura destes, melhora a proteção gasosa, pois é mais resistente aos correntes de ar, principalmente na posição plana.

Misturas com maiores níveis de dióxido de carbono podem ser usadas para transferência por curto-circuito, comumente argônio com 20 ou 25% de CO_2 (AWS, 1987). Porém, Stenbacka e Persson (1989) demonstram nas suas pesquisas que mais de 15% de CO_2 no gás de proteção desestabiliza a transferência metálica e aumenta a quantidade de respingos e fumos. Ainda segundo estes autores, quando a quantidade de CO_2 excede 9%, pode-se observar claramente uma mudança no destacamento das gotas. Os resultados obtidos por Soderstrom e Mendez (2008) confirmam isto. A Figura 2.11 esquematicamente mostra como o aumento de CO_2 na mistura altera a transferência da gota. Maiores porcentagem deste aumentam a densidade da corrente e diminuem a mancha anódica na gota em formação. A pressão concentrada do plasma na área pequena da gota pode resultar em força suficiente para levantar a gota, provocando o deslocamento dela na ponta de eletrodo.

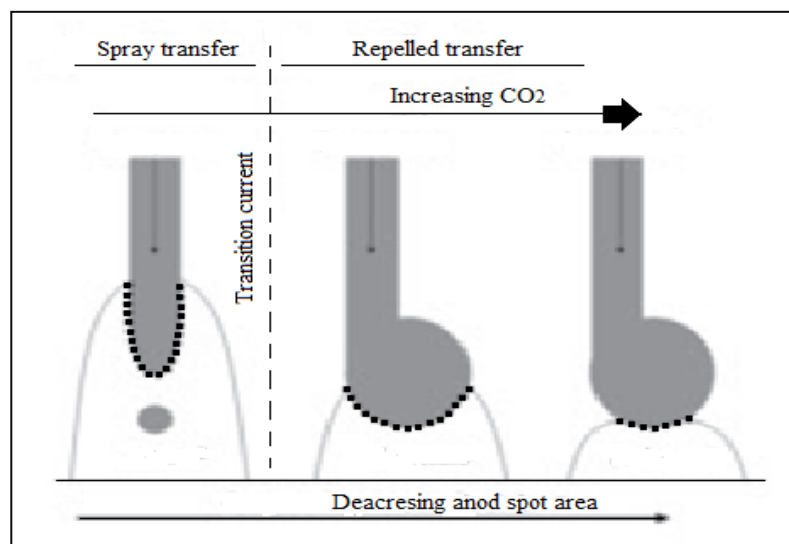


Figura 2.11 – Efeito do CO_2 no gás de proteção no formato da na mancha anódica e, consequentemente, na densidade da corrente (SODERSTROM e MENDEZ, 2008)

Ushio et al. (1995) também observaram a transferência metálica com deslocamento da gota no eixo do eletrodo quando o teor de CO_2 superou 10%. Zielinska et al. (2008) confirmam a existência deste fenômeno com porcentagem de CO_2 maior do que 9%. Também os autores indicam que depois dessa faixa o arco perde a estabilidade, aumenta geração de respingos e formação dos fumos.

O estudo do Ponomarev, Scotti e Resende (2006) mostra que o teor de CO_2 também influencia nas propriedades do arco. A relação entre a resistividade da gota e da coluna de arco muda dependendo de porcentagem de CO_2 na mistura. Para teores baixos, a

resistividade da gota é maior do que do arco e para teores maiores de CO_2 a resistividade do arco torna-se maior do que a da gota. Mas também existe uma faixa (por volta de 10%) quando a resistividade da gota é mais ou menos igual à resistividade da coluna de arco e as curvas da tensão não apresentam nenhuma tendência clara para a tensão aumentar ou diminuir durante o crescimento e destacamento da gota.

Zielinska et al. (2008) variaram a quantidade de CO_2 em argônio para mostrar a influência do CO_2 na tensão do arco (Fig. 2.12). Uma maior tensão do arco necessária para maiores quantidades de CO_2 no gás de proteção pode ser explicada com uma maior necessidade de energia para manutenção do arco com quantidades maiores de CO_2 na mistura, por causa da sua maior capacidade de troca de calor e a necessidade de se dissociar antes de ser ionizado (NIKOLAEV, 1978). Estes mesmos autores fizeram imagens do arco com várias misturas de Ar + CO_2 , mostradas na Fig. 2.13.

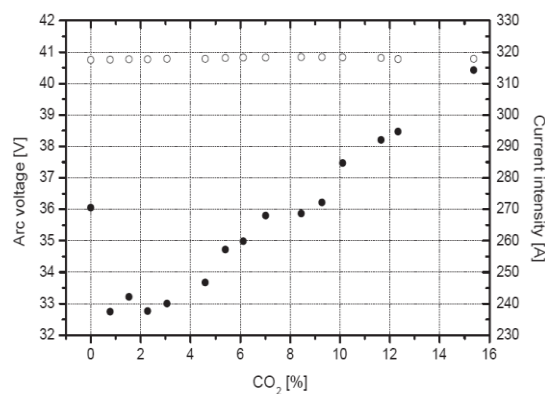


Figura 2.12 – Influência da adição de CO_2 na tensão de soldagem operando no modo *corrente constante* (ZIELINSKA et al., 2008)

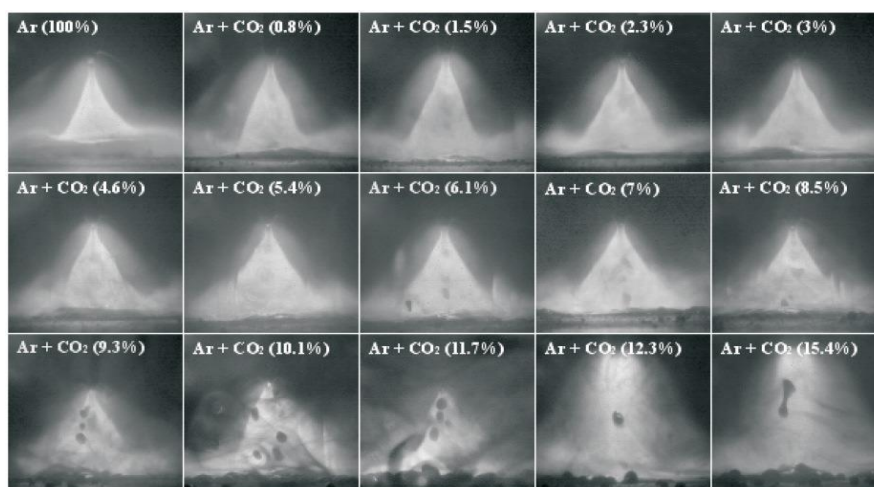


Figura 2.13 – Formato do arco para diferentes misturas de CO_2 e Ar (ZIELINSKA et al., 2008)

Ainda existe um ponto discutível em relação às alterações que o teor de CO_2 faz na tensão superficial do metal líquido na hora de soldar. Lyttle e Stapon (1990), Silva et. al, (2009) e a maioria das fontes citam que o aumento do teor de CO_2 e, conseqüentemente de O_2 , no gás de proteção, reduz a tensão superficial do metal líquido. Mas já foi observado em trabalhos anteriores, conforme apresentado por Soderstrom e Mendez (2008) que, com o crescimento da porcentagem de CO_2 na mistura com Ar, o tamanho da gota aumenta. Além disso, neste caso seria mais fácil obter a transferência metálica goticular, o que nunca ocorre. Por isso, Scotti e Ponomarev (2008) apresentaram uma teoria que, a adição de gases-oxidantes aumenta a força devido á tensão superficial, que ainda precisa de confirmação.

2.5. Estabilidade do Processo MIG/MAG com Transferência Metálica por Curto-Circuito

Segundo Ponomarev (1997), a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG é determinada por três fatores: estabilidade do arco, regularidade da transferência metálica e comportamento do processo de soldagem, os quais se relacionam de forma muito próxima e complicada. Além disso, de acordo com Modenesi (2009), o termo “soldagem instável” pode estar associado com diferentes aspectos da operação de soldagem como, por exemplo, transferência de metal, aspectos térmicos ou elétricos da coluna do arco, problemas nas regiões de queda anódica ou catódica ("raiz do arco"), interação com campos magnéticos, características do equipamento de soldagem ou problemas com o mesmo, etc. A estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito é considerada como baixa devido aos vários fatores. O principal problema é a geração de respingos devido aos curtos-circuitos instantâneos e rompimento de menisco líquido na hora de transferência. Isto diminui a capacidade de produção, seja devido á perda de material de adição ou á necessidade de gasto de recursos para sua retirada.

Com a finalidade de facilitar a realização das soldagens e, em consequência, a estimação da qualidade de solda, os pesquisadores sempre procuram quantificar os fatores que influenciam na estabilidade do processo de soldagem. Segundo Ponomarev (1997), a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG pode ser avaliada por meios subjetivos (qualitativos) ou objetivos (quantitativos). Os dois representam suas vantagens

e desvantagens. Por exemplo, métodos quantitativos, normalmente baseados nas análises estatísticas das curvas de tensão do arco e da corrente elétrica utilizada no processo, podem fornecer muitas informações úteis relacionadas com regularidade da transferência e estabilidade do arco. Mas, infelizmente, nem sempre estes dados correspondem à realidade, principalmente por causa das falhas em metodologia de avaliação. Os métodos qualitativos prevêem a avaliação dos fatores de estabilidade por soldadores experientes. Apesar de ser o meio mais comum, ele não pode garantir a indicação das mudanças em estabilidade ocorrente durante o processo de soldagem, e também requer habilidades determinados e disponibilidade de tempo.

Desta maneira, surgiu-se a necessidade de desenvolvimento de índices, que vão indicar estabilidade/instabilidade da transferência metálica, estabilidade do arco e comportamento do processo. Até hoje, vários trabalhos foram feitos nessa área e, normalmente, eles são baseados nas análises estatísticas das oscilogramas. Por exemplo, Arai et al. (1983), demonstra, que há uma relação muito próxima entre desvio padrão de tempo do arco aberto e estabilidade do arco, baseado em experiência em soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito. Lucas (1987) revelou a distribuição para desvio padrão dos picos de corrente de curto-circuito e períodos de curtos-circuitos sob várias condições da tensão de soldagem, usando vários tipos de fontes de soldagem, e provou que há uma relação entre estes desvios padrão e estabilidade do arco. Mita et al. (1988) obtiveram um desvio padrão dos fatores das curvas de tensão do arco e da corrente de soldagem (tempo de arco aberto, tempo de curto-circuito, corrente média e corrente média de curto-circuito, etc.). Eles propuseram alguns modelos de regressão, os quais foram compostos por elementos tirados dos oscilogramas (por exemplo, tempos de arco aberto, tempos de curto-circuito, picos de corrente de curto-circuito, etc.) e seus desvios padrão. Eles também fizeram um modelo composto baseado na avaliação de soldadores experientes e consideraram esse modelo como um índice de estabilidade do arco. Eles mostraram ainda que quando o índice era alto, o arco ficava instável, e quando o índice era baixo, o arco podia ser estimado como estável. Outro trabalho, de Kang e Rhee (2001), mostra um modelo otimizado de estimação para a quantidade de respingos, quando se considera a extinção do arco operando em transferência metálica por curto-circuito, usando análise de regressão múltipla. Roca et al (2007) utilizam um índice baseado no sinal de emissão acústica. Este índice utiliza o desvio padrão dos tempos entre curtos-circuitos e desvio padrão das amplitudes dos picos de sinais acústicos dos curtos-circuitos.

Sumarizando, a maioria dos trabalhos utiliza a regularidade dos elementos das oscilogramas ou a relação entre sentimentos do soldador e alguns modelos para estimar o comportamento do processo de soldagem MIG/MAG, mas nenhum deles considera estabilidade do arco e regularidade da transferência metálica em conjunto com a geração dos respingos e formação do cordão.

2.5.1. Influencia das Variáveis na Estabilidade da Transferência metálica por curto-circuito

Na soldagem MIG/MAG em geral e na operação com transferência por curto-circuito em particular, a estabilidade do processo, incluindo o nível de respingos depende fortemente dos parâmetros de soldagem empregados, por exemplo, do comprimento do arco (tensão), corrente de soldagem e gás de proteção. Durante, ou antes, da soldagem, um soldador, ou operador, ajusta e controla estes parâmetros dentro da faixa operacional que fornece a melhor estabilidade do processo.

a) Tensão do arco e corrente de soldagem

Por exemplo, segundo Modenesi e Avelar (1999), na transferência por curto-circuito com uma fonte convencional de tensão constante e para uma dada velocidade de alimentação de arame, a estabilidade do processo tende a melhorar, quando a tensão de operação é aumentada. Contudo, após passar por um ponto de máxima da estabilidade (estimada através de respingos gerados), esta tende a se deteriorar (Fig. 2.14). O estudo do Hernans e den Ouden (1999) confirma isto, mostrando que existe uma relativamente pequena faixa de regulagem entre tensão de soldagem e velocidade de alimentação de arame, onde é possível observar a estabilidade máxima do processo.

Em outro trabalho, Modenesi (1994) observou uma mudança da forma de transferência, de axial para repulsiva, quando o comprimento do arco foi reduzido usando os gases de proteção de baixo potencial de oxidação. Este fenômeno foi associado com as mudanças no mecanismo de emissão de elétrons operando na raiz do arco (região catódica), causando variações na tensão de queda catódica, no formato do arco e no fluxo de gases neste e, desta forma, no balanço de forças na ponta do eletrodo e, assim, afetando a forma de transferência. Também o autor afirma que no caso de transferência por curto-circuito estas mudanças podem ocorrer mesmo com gases com maior potencial de oxidação.

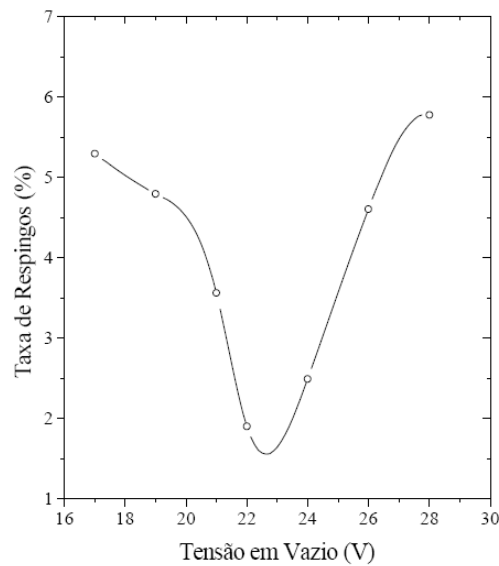


Figura 2.14 – Variação da quantidade de respingos com a tensão em vazio, 100% de CO₂ (MODENESI e AVELAR, 1999)

Adicionalmente, diversos trabalhos procuram associar a estabilidade com o máximo (ou mínimo) em algum parâmetro característico da transferência por curto-circuito, por exemplo, com o período de curto-circuito, com o desvio padrão da corrente de curto-circuito, ou da corrente de operação ou, ainda, com mudanças de comportamento de algum outro parâmetro. Por exemplo, os resultados obtidos por Hermans e den Ouden (1999) demonstram que a estabilidade do processo máxima foi atingida quando o desvio padrão da frequência dos curtos-circuitos era mínimo.

b) Indutância

O modo de transferência por curto-circuito é fortemente influenciado por algumas características do equipamento. O principal delas é a indutância. Indutância é uma propriedade que o circuito elétrico possui de resistir à variação da corrente. Durante um curto-circuito, a corrente de soldagem tende a aumentar rapidamente e a ruptura do contato líquido entre a poça de fusão e o eletrodo ao final do curto-circuito pode ser violenta (ou, mesmo, explosiva) com a vaporização de parte do material e a formação de respingos. Por outro lado, se, durante o curto-circuito, a corrente se elevar muito lentamente, o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte líquida e o processo ser interrompido com o arame superaquecido (formando um emaranhado não fundido sobre o metal de base). Máquinas para a soldagem MIG/MAG possuem, em geral, um controle que permite ajustar a taxa de crescimento (ou redução) da corrente de

soldagem e, assim, otimizar a sua variação durante o curto-circuito. Em fontes convencionais, este controle envolve um circuito magnético variável sendo, portanto, conhecido como “*indutância*”. Por outro lado, a taxa de redução da corrente deve ser menor e dependente do gás de proteção utilizado, por exemplo, segundo Modenesi (2009), em torno de 20 kA/s para proteção de Ar-25%CO₂ e de 44 kA/s para CO₂. Foi observado, também, que o valor da taxa de redução da corrente tem uma forte influência sobre as condições de curto-circuito, particularmente sobre a frequência de curto-circuito e o valor da corrente máxima de curto-circuito. Este efeito estaria ligado com mudanças no comprimento do arco ao final dos períodos de curto-circuito.

c) Oscilação da poça de fusão

Mais um efeito na estabilidade do processo de soldagem e regularidade da transferência metálica foi observado pelo Hermans e den Ouden (1999). Eles afirmam que no caso da transferência metálica por curto-circuito as oscilações da poça de fusão foram provocadas por re-ignição do arco, após do rompimento de contato líquido. Estes oscilações desempenham um papel muito importante quando a estabilidade do processo, pois a estabilidade máxima foi atingida quando as frequências dos curtos-circuitos e oscilação da poça de fusão foram iguais.

d) Outros fatores

A regularidade da transferência metálica também pode ser afetada por outros fatores. Segundo vários autores adição dos elementos-oxidantes nos gases de proteção aumentam a possibilidade da emissão catódica e melhoram estabilidade do arco (ZIELINSKA et al., 2008). Mas por outro lado, Lucas e Amin (1975) associam as mudanças na forma de transferência com o nível de desoxidação de arames de aço para soldagem MIG/MAG. Neste caso, arames com maior teor de oxigênio tenderiam a apresentar transferência explosiva. Perturbações no arco (mudanças abruptas no comprimento de arco, no modo de transferência e no nível de corrente) e no formato do cordão na soldagem GMAW foram associadas com contaminações na superfície do arame e com desgaste do bico de contato (Rodwell, 1985) ou com variações na composição do material (Hutt e Lucas, 1982).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1. Fundamentação metodológica

Estabilidade de um processo MIG/MAG e, conseqüentemente, boa qualidade de solda são alcançadas quando se garante a estabilidade do arco e da transferência metálica ao mesmo tempo. Por sua vez, estabilidade da transferência metálica depende dos vários fatores, tais como, regulagem dos parâmetros, consumíveis, equipamento de soldagem, etc. Um dos fatores seria o teor de CO₂ na mistura com Ar. O objetivo de desenvolvimento de metodologia do presente trabalho foi, primeiramente, aproximar-se às condições de fabricação na indústria. Além disso, foi muito importante fornecer comparabilidade dos resultados obtidos, ou seja, ao variar um fator garantir que o mesmo reflita apenas o seu efeito. Finalmente, procurou-se confiabilidade das conclusões através de avaliação do processo de soldagem com diferentes critérios subjetivos (qualificativos) e objetivos (quantitativos).

Dessa forma, utilizou-se misturas Ar+CO₂ com teores de CO₂ diferentes, cobrindo uma faixa de 2 até 100%, procurando-se resultados quantificados e sistemáticos do comportamento da transferência de metal dependente desta variável. Analisou-se como resposta: o acabamento e geometria do cordão, rendimento de deposição, índice de regularidade da transferência metálica e comportamento da transferência metálica (filmagem á alta velocidade).

3.2. Equipamentos e instrumentos

3.2.1. Bancada experimental

A Figura 3.1 mostra como a bancada experimental foi montada. Nesta figura, pode-se observar a fonte de soldagem, o alimentador de arame, a tocha montada no

robô, cilindros com gases, o misturador de gases, o sistema de refrigeração da tocha, o sistema de aquisição dos dados e a mesa sobre a qual fica o suporte para fixação dos placas de teste. Os equipamentos utilizados são descritos a seguir.

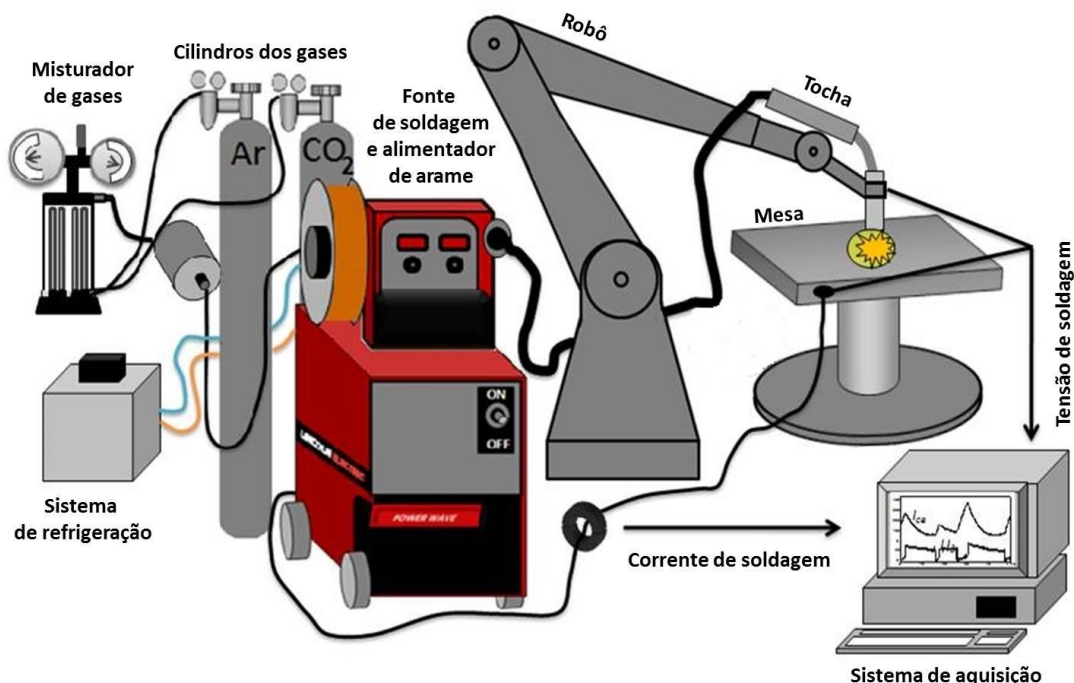


Figura 3.1 – Esquema de montagem da bancada experimental

a) Fonte de soldagem, alimentador de arames

Foi utilizada uma fonte eletrônica da marca Lincoln Electric modelo Power Wave 455M/STT em conjunto com o alimentador de arames modelo Power Feed 10M do mesmo fabricante, ambos apresentados na Fig. 3.2. As suas características são mostradas nas Tab. 3.1 e 3.2 respectivamente.

Tabela 3.1 – Características da fonte de soldagem

Fabricante	Lincoln Electric
Modelo	Power Wave 455M/STT
Tipo da fonte	inversora
Corrente máxima/Tensão máxima/Fator de trabalho	500A/40V/60%
	400A/36V/100%
	STT: 325A/33V/100%
Faixa da corrente de regulação	5-570 A
Tensão em vazio	25-90 V

Dimensões altura × largura × comprimento, mm	663 x 505 x 835
Peso, kg	121

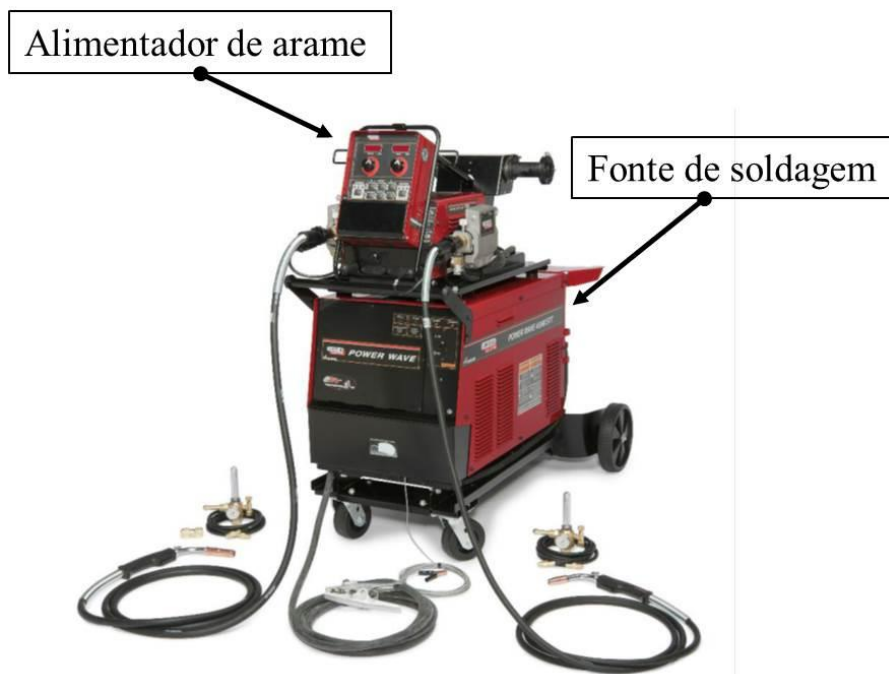


Figura 3.2 – Fonte de soldagem e alimentador de arames utilizados

Tabela 3.2 – Características do alimentador de arame

Fabricante	Lincoln Electric
Modelo	Power Feed 10M
Velocidade de alimentação, m/min	1,2 - 30,5
Diâmetro do arame (maciço), mm	0,6-3,0
Tensão de entrada	40V (AC)
Dimensões altura × largura × comprimento, mm	508 x 584 x 864
Peso (kg)	20,5

b) Tocha e sistema de translação da tocha

Foi utilizada uma tocha automática para processo MIG/MAG, do fabricante TBi modelo 511 Aut. Esta é uma tocha refrigerada à água com corrente máxima de soldagem de 450 A usando uma mistura de gases e 500 A quando se utilizada CO₂ puro.

Para deslocamento da tocha foi utilizado um robô do fabricante FANUC Robotics America modelo Arc Mate 100 iBe, apresentado na Fig. 3.3. As suas características são apresentadas na Tab. 3.3.



Figura 3.3 – Robô Arc Mate 100 iBe

Tabela 3.3 – Características do robô

Fabricante	FANUC Robotics America
Modelo	Arc Mate 100 iBe
Grau de liberdade	6
Raio de ação, mm	1885
Capacidade máxima de carga, kg	6
Peso (kg)	238

c) Misturador e analisador de gases

Para preparar as misturas requeridas de Ar e CO₂ foi usado um misturador de gases de proteção, mostrado na Fig. 3.4. O misturador consiste de quatro rotâmetros, um para cada gás, e permite monitorar a vazão de até quatro gases diferentes. Os

gases se misturam no inferior de um “pulmão”, que se encontra logo após a saída dos rotômetros. Cada rotômetro possui dois flutuadores esféricos, um de aço inoxidável e outro de vidro, que são escolhidos de acordo com a vazão do gás de trabalho.

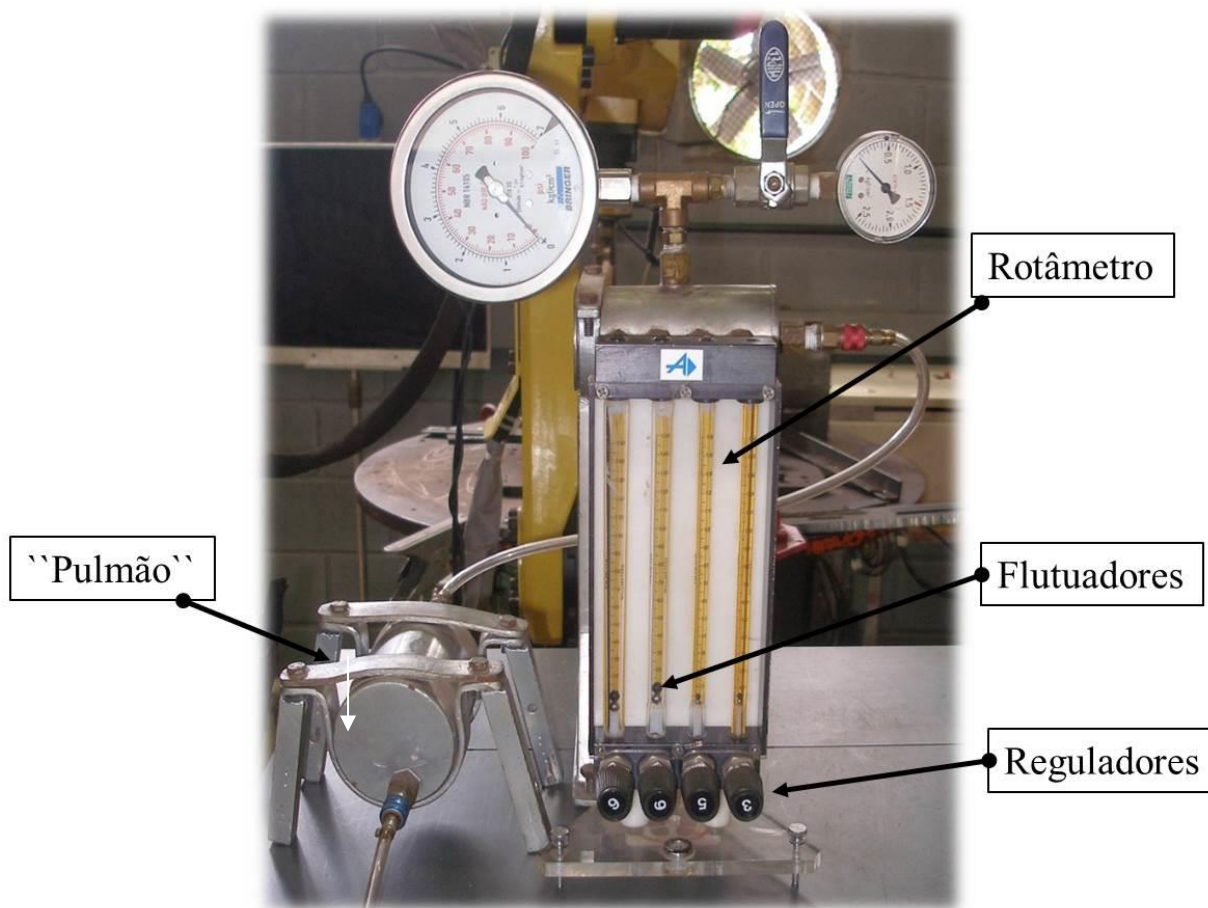


Figura 3.4 – Misturador de gases

O programa ROTO_BR foi desenvolvido no software Microsoft Excel® para os cálculos necessários para ajustar as vazões dos gases a ser misturados. Nesse programa, o operador entra com os parâmetros de entrada da mistura desejada (tipo de gases e seus teores na mistura, vazão, temperatura do ambiente) e ao mesmo tempo ele fornece os parâmetros de saída (níveis dos flutuadores correspondentes). A tela de interface do programa com o usuário é apresentada na Fig. 3.5.

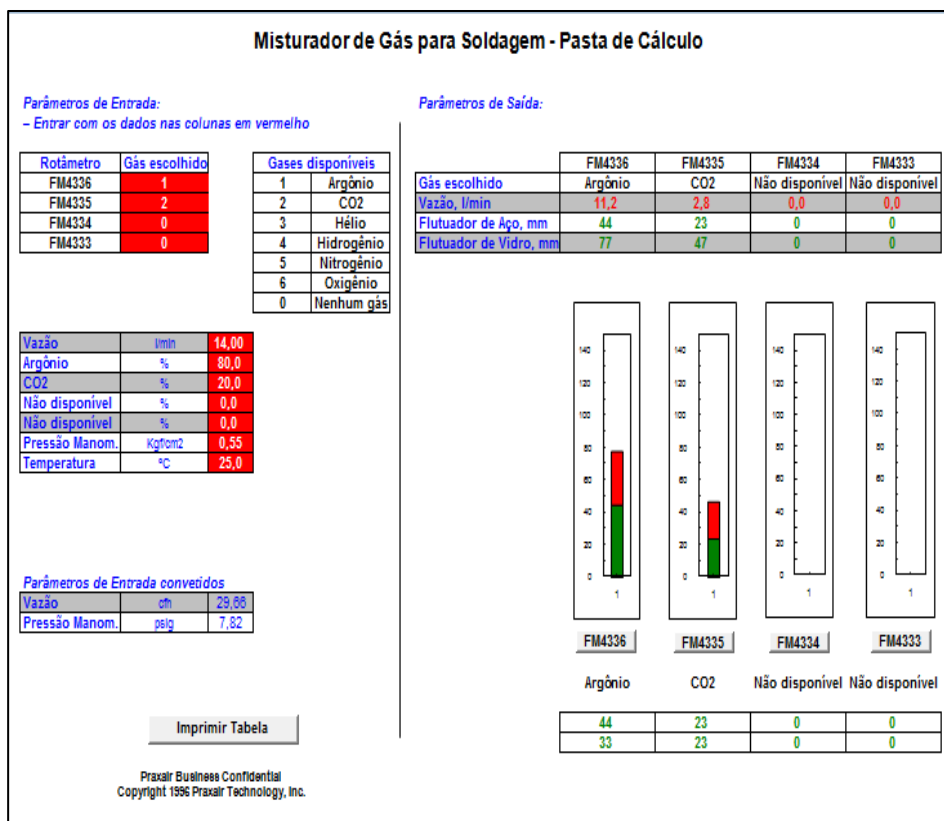


Figura 3.5 – Interface do programa ROTO_BR com o usuário

Para conferir que as misturas foram feitas de forma correta e o teor desejado de CO₂ na mistura com Ar era atingido, foi usado um analisador de gases Witt – Oxybaby (Fig. 3.6), que mede a quantidade de O₂ e CO₂ (de 0 até 100%) na mistura. Foram realizadas três análises para cada mistura feita na hora de realização dos testes.



Figura 3.6 – Analisador de gases Witt – Oxybaby

d) Sistema de aquisição de dados (U , I , V_{alim})

A Figura 3.7 demonstra o esquema da montagem geral do sistema de aquisição utilizado para medição da velocidade de alimentação e dos sinais elétricos da corrente e tensão de soldagem. A placa de aquisição ligada em um microcomputador é responsável pela coleta dos sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação. Na Figura 3.8 pode-se observar a placa de aquisição utilizada do fabricante National Instruments, modelo NI USB-6009 com resolução de 14 bits e faixa de medição de ± 10 V.

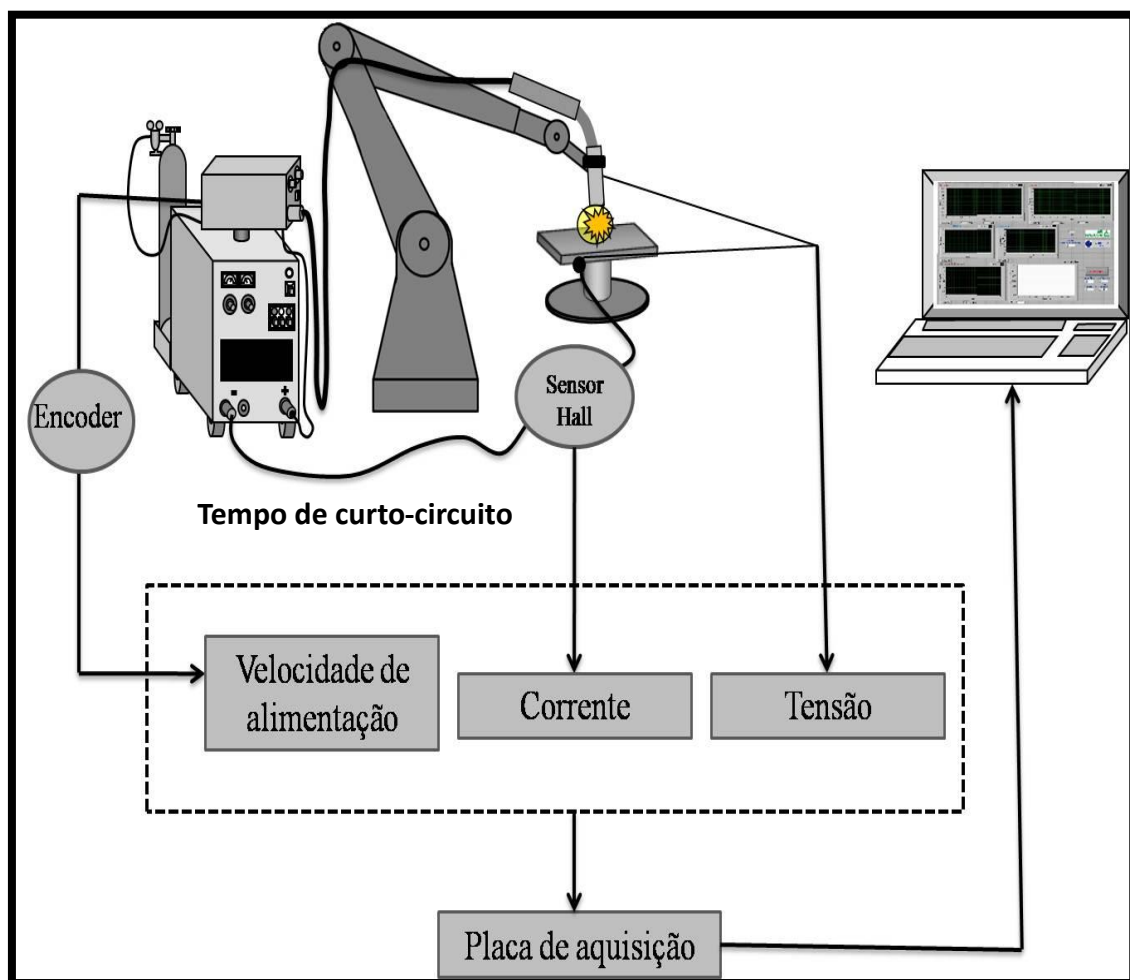


Figura 3.7 – Esquema da montagem do sistema de aquisição

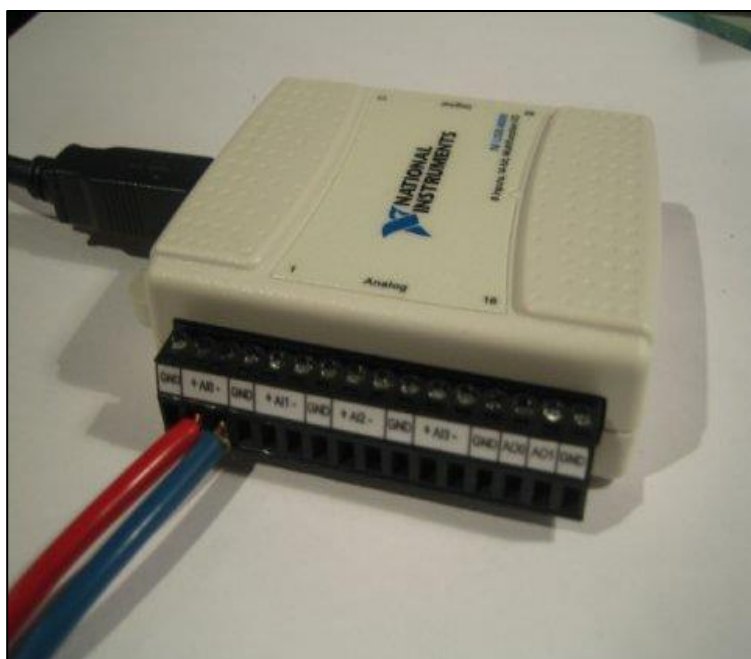


Figura 3.8 – Placa de aquisição

Para coletar os sinais da corrente, da tensão e da velocidade de alimentação foi necessário usar uma caixa condicionadora de sinais. A destinação da caixa foi preparar os sinais elétricos em níveis adequados para entrar na placa de aquisição. Para isto, a caixa condicionadora tinha que promover um ganho ao sinal de tensão vindo de um sensor Hall (para medir a corrente de soldagem), dividir e isolar a tensão que era tomada diretamente na fonte (para medir a tensão de soldagem) e converter e condicionar o sinal de frequência vindo do encoder em sinal de tensão (para medir velocidade de alimentação).

Com finalidade de aquisição e processamento dos dados de soldagem (corrente, tensão e velocidade de alimentação) foi desenvolvido no ambiente LabView um programa que capturava os dados durante a soldagem e após termino da aquisição os apresentava em forma de gráficos. A Figura 3.9 apresenta a tela de interface do programa com o usuário. A taxa de aquisição utilizada para os sinais elétricos foi de 5000 Hz. A curva de calibração dos sinais é mostrada no Apêndice A.

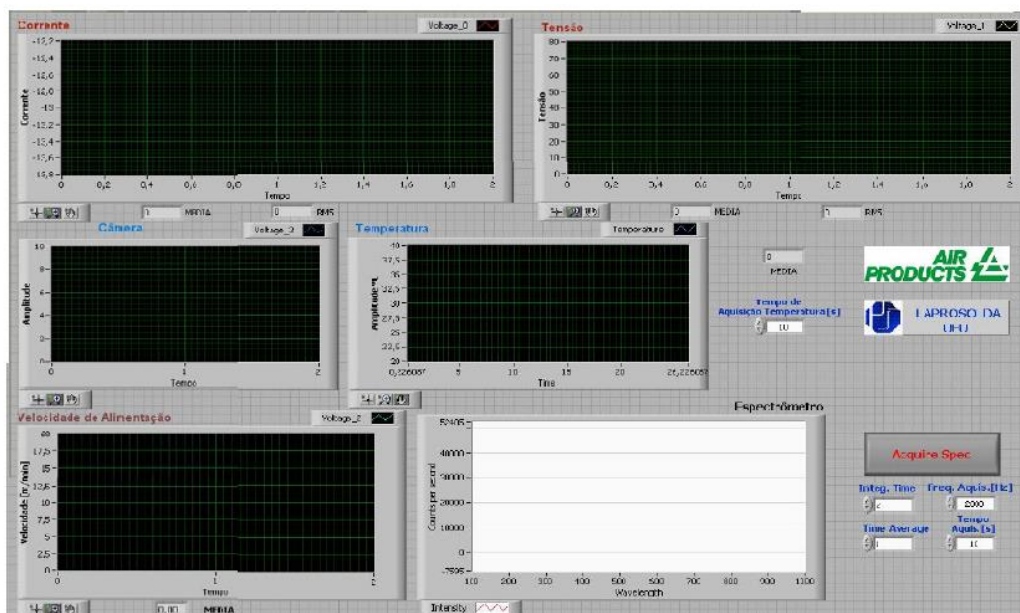


Figura 3.9 – Interface do programa de aquisição de dados com o usuário

e) Perfilografia sincronizada

Para a análise da influência do teor de CO_2 na regularidade da transferência metálica e estabilidade do processo de soldagem ser completa, foram aplicadas as filmagens a alta velocidade com objetivo de visualizar a região do arco (transferência metálica, comprimento do arco, poça de fusão, etc.). Para realização das filmagens, foi aplicada a técnica chamada *perfilografia*, que utiliza um laser de hélio - neônio como fonte de luz para formação de uma sombra projetada de vários elementos da região de soldagem (bico de contato, eletrodo, gotas, poça de fusão, etc.). Por causa de presença do filtro óptico passa-banda, é possível obter uma filmagem seletiva que permite passar somente a luz do laser e não a do arco. A Figura 3.10 ilustra a montagem da bancada experimental usada no presente trabalho.

Devido a uma grande dificuldade de movimentar a tocha e a sistema óptico ao mesmo tempo e com a mesma velocidade, foi decidido movimentar o corpo de prova com ajuda de um carrinho com possibilidade de regulação da velocidade de soldagem. A montagem desta pode-se observar na Fig. 3.10.

Também, durante de realização dos testes, foi aplicado um método de sincronização das filmagens com oscilogramas de tensão de arco e corrente de soldagem. Na hora de analisar os resultados estes dados fornecem muita informação sobre transferência metálica e comportamento do processo.

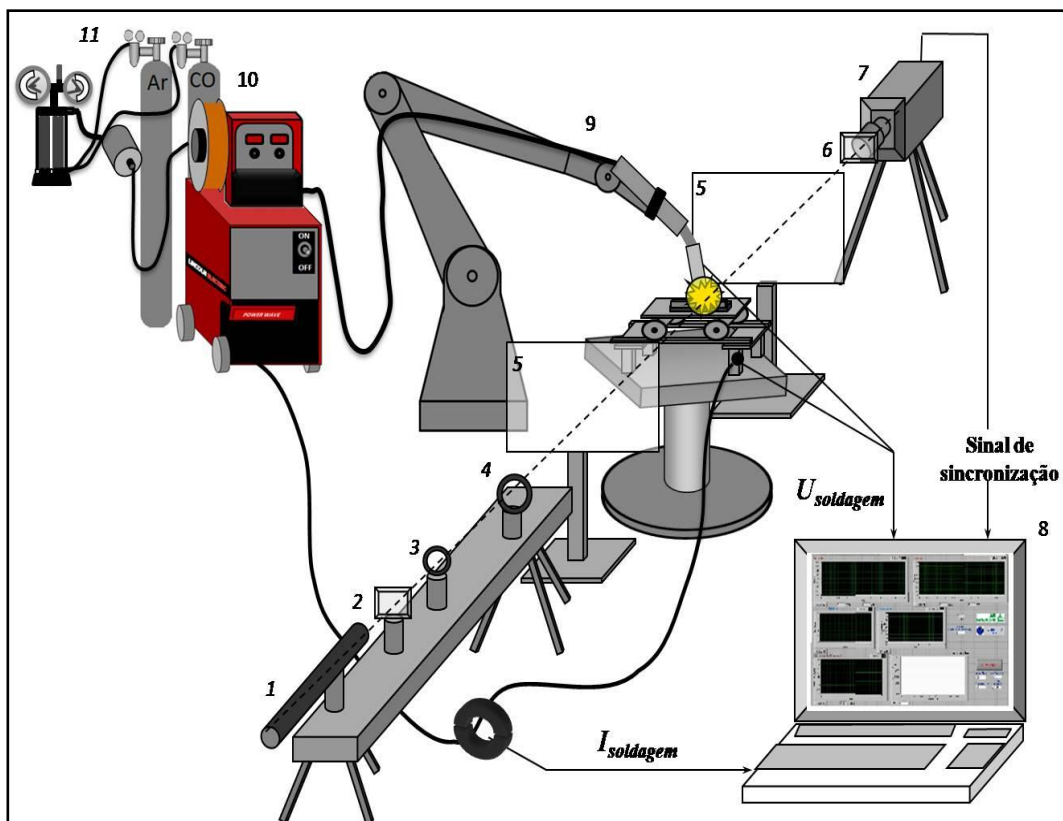


Figura 3.10 – Bancada experimental para confecção das filmagens (1-Laser; 2-Filtro neutro; 3-Lente divergente; 4-Lente convergente; 5-Vidro de proteção; 6-Filtro passa-banda e filtro neutro; 7-Câmera; 8-Microcomputador com uma placa de aquisição; 9-Robô e uma tocha fixada nele; 10-Fonte de soldagem e alimentador de arame; 11-Cilindros com gases e misturador de gases)

3.2.2. Consumíveis (gases de proteção e arame-eletrodo)

Os gases de proteção e arame-eletrodo foram escolhidos de acordo com material da chapa a ser soldada, ou seja, aço ao carbono. O arame-eletrodo utilizado foi o da classe AWS ER70S-6, embobinado capa a capa com 1,2 mm de diâmetro. Os gases utilizados para testes foram misturas de Ar e CO₂. As misturas na base de Ar com teores diferentes de CO₂ (2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50%, 90%) foram feitos na hora de soldar, usando-se um misturador dos gases para soldagem, a partir de cilindros de Ar e CO₂. Também foi usado o CO₂ puro como gás de proteção.

3.3. Condições básicas para realização dos testes

A elaboração da metodologia, para atender as premissas acima mencionadas, procurou seguir algumas condições, a saber:

- Usar as condições mais próximas das utilizadas na prática:
 1. Trabalhar com juntas em I com folga (ao invés de “bead-on-plate”);
 2. Trabalhar com material, espessura da chapa, consumíveis e técnicas de soldagem mais típicos na indústria para soldagem com modo de transferência metálica por curto-circuito;
 3. Trabalhar com o modo de operação da fonte em tensão constante;
- Realizar os ensaios utilizando faixa operacional da corrente mais baixa do que recomendada para dado tipo de transferência metálica (por volta de 125 A), para aumentar a sensibilidade do efeito tensão superficial frente ao da força eletromagnética;
- Determinar o comprimento de arco (ou seja, tensão de regulagem), que forneça a transferência metálica mais estável para cada teor de CO₂ na mistura;
- Usar mesma quantidade de metal depositado por unidade de comprimento para todas as misturas de gases;

3.3.1. Placas de teste

Na prática não se usa deposição simples de material sobre a chapa (“bead-on-plate”). Por isso, para os testes foram usadas juntas em I com folga. Outra configuração, como V, dificultaria a visualização da transferência metálica através da técnica de perfilografia com filmagem em alta velocidade. Desta forma, para preparação das chapas, foram usadas barras chatas de aço ao carbono de espessura de 3 mm. Este material foi escolhido tomando em conta, por um lado, o seu custo, e por outro, sua similaridade com materiais utilizados na indústria em estruturas soldadas. Além disto, aço ao carbono é muito adequado para soldagem com processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito, devido a sua baixa condutividade térmica (ao contrário, por exemplo, do alumínio, cuja condutividade térmica faz a poça de fusão resfriar muito rápido, dificultando a transferência por tensão superficial. Finalmente, o tipo de transferência metálica por curto-circuito, devido aos valores baixos de corrente e de tensão (baixo calor transferido para a peça) é adequado para soldagem das chapas finas (chapa de 3 mm de espessura é considerada como chapa fina).

a) Preparação das placas de teste

Testes preliminares e ensaios definitivos foram feitos em placas de teste iguais de aço carbono comum. Isso foi feito para fornecer a usabilidade dos parâmetros encontrados na hora dos testes preliminares para realização dos ensaios. A face da junta foi usinada e limpada. As dimensões e a geometria da junta utilizada são mostrados na Fig. 3.11.

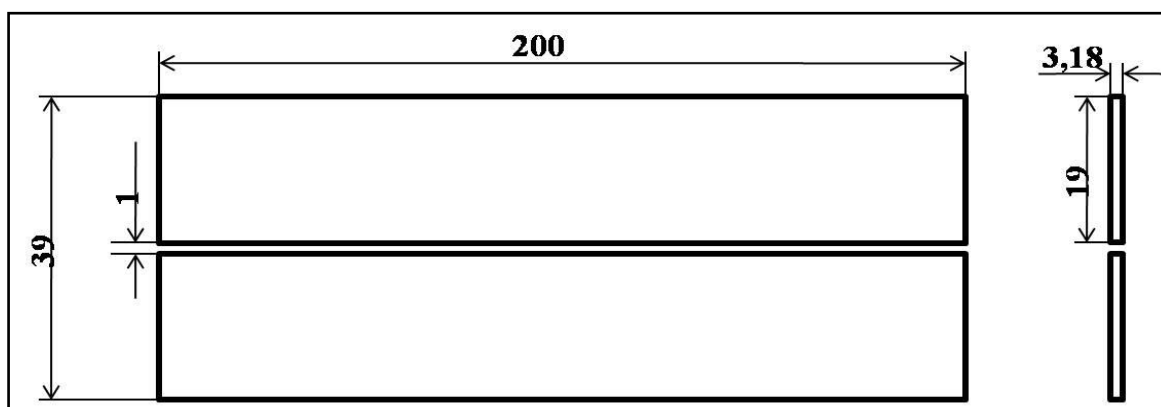


Figura 3.11 – Dimensões e geometria da junta utilizada para realização das soldagens

Para assegurar a folga, foram feitos três pontos de solda equidistantes entre as barras. Para evitar também o fechamento da folga durante o ponteamento, foram colocados pequenos pedaços de arame com diâmetro da folga (1 mm) nos extremos e no meio da junta. O ponteamento ocorria sobre estes pedaços de arame, que não eram retirados e serviam, assim, como espaçadores. Após o ponteamento, foram feitas as medidas de largura da folga para confirmar a adequação da dimensão (umas 10 medidas para cada chapa ao longo do comprimento).

b) Suporte de fixação das placas de teste

Na hora de soldar, as placas de teste foram fixados no suporte, mostrado na Fig. 3.12. O principal objetivo de usar este suporte foi de impedir as deformações das chapas durante a soldagem, evitando assim a variação dos parâmetros.



Figura 3.12 – Suporte para fixação das placas de teste

3.3.2. Técnicas de Soldagem

A distância bico de contato-peça (DBCP) de 12 mm foi escolhida de acordo com recomendações técnicas para o diâmetro de 1.2 mm e foi mantida constante para todos os testes.

Mais um parâmetro de técnica da soldagem muito importante é ângulo de inclinação da tocha. Normalmente na prática o soldador usa método puxando ou empurrando, dependendo das condições (posição de soldagem, espessura da chapa, etc.). Mas neste trabalho, com finalidade de excluir o fator humano, as soldas foram feitas na forma automática, apesar de processo MIG/MAG, normalmente, ser um processo semi-automático. E o ângulo de ataque, também para evitar a influencia desta variável na transferência metálica e formação do cordão, foi escolhido de 90°, ou seja, reto.

3.3.3. Dimensão dos Cordões

Para fornecer comparabilidade entre as soldagens com diferentes teores de CO₂, é necessário criar as condições para fornecer os mesmos volumes de metal

depositado. Assim, na hora de soldar a quantidade de material depositado por unidade de comprimento foi mantida constante para todos os testes, ou seja, a relação entre velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem (velocidade de movimento da tocha) foi mantida num mesmo valor. O intuito foi evitar o efeito do volume da poça sobre o próprio comprimento de arco, assim como sobre a geometria dos cordões (efeito de sobreposição da poça entre arco e metal de base) e sobre o rendimento de deposição (efeito do volume da poça na formação dos respingos).

3.3.4. Operação da fonte de soldagem

Para o processo de soldagem MIG/MAG convencional normalmente se usa modo de operação da fonte em tensão constante, onde o valor da tensão é regulado diretamente no equipamento e o valor da corrente é regulado indiretamente através da regulagem de velocidade de alimentação. Isso permite manter comprimento de arco, o que é variável muito essencial, de forma mais estável. Só os casos especiais, como as fontes para transferência metálica controlada, demandam uso de modo de operação da fonte em corrente constante. Mas como objetivo do trabalho foi minimizar as influências externas e deixar acontecer a transferência metálica de forma mais natural, usou-se a fonte do tipo tensão constante. No caso foi utilizada uma fonte Power Wave 455M/STT do Lincoln Elettric.

Quando à indutância, que é uma característica importante da fonte de soldagem, especialmente trabalhando com transferência metálica por curto-circuito, foi decidido fixá-la no valor médio da máquina para todos os testes com finalidade de diminuir influência dessa nos resultados.

a) Regulagem da Corrente

Se procurar nos manuais para soldagem MIG/MAG (por exemplo, AWS Welding Handbook, 1978), pode-se achar a faixa da corrente recomendada para modo de transferência por curto-circuito por volta de 170-200 A (para o dado gás de proteção e arame-eletrodo). Mas, no presente trabalho, a corrente de soldagem foi escolhida na faixa de 120-130 A, ou seja, procurou-se um valor próximo ao limite inferior da faixa útil de corrente para este modo de transferência. Isso se justifica pelo fato, que nas condições críticas até pequenas mudanças nas regulagens dos parâmetros (no caso, mudança do teor de CO₂ na mistura do gás de proteção) influenciam muito no comportamento do processo de soldagem, enquanto nas

condições favoráveis a estabilidade é bem menos sensível e o processo não sofre tanto as alterações. Então, o objetivo foi artificialmente aumentar o efeito, ou seja, fazer mais visível, a influência mudança do teor de CO₂ na estabilidade do processo e na regularidade da transferência metálica.

A corrente, por ter forte influência sobre a transferência e formação do cordão, foi mantida constante, mesmo á custa da possível necessidade de se alterar a velocidade de alimentação do arame para diferentes misturas para manter o valor desejado da corrente em torno de 125 A (uma tolerância aceitável foi ± 5 A).

b) Regulagem da Tensão

Durante a realização dos testes, aplicaram-se três tensões para cada teor de CO₂ na mistura, mantendo-se a velocidade de alimentação do arame constante (precisamente definida para alcançar a corrente desejada). A razão para as três tensões é dada pelo fato da regularidade da transferência metálica ser influenciada pelo comprimento do arco, para uma dada corrente. Por sua vez, o comprimento de arco é função da tensão de soldagem para as condições dadas. Entretanto, pode-se esperar, para os diferentes gases de proteção, tensões de regulagem diferenciadas para se obter um mesmo comprimento de arco. Por isso, foram buscadas três tensões, para cada gás de proteção determinadas experimentalmente, que aparentaram transferências por curto-circuito adequadas para cada gás de proteção e, entre elas, escolheu-se a que teria fornecido a melhor regularidade de transferência metálica. O resultado obtido na melhor condição de soldagem (ou seja, com comprimento de arco mais adequado) para cada mistura foi comparado com outros resultados melhores obtidos para outras mistura. A Figura 3.13 ilustra esta análise.

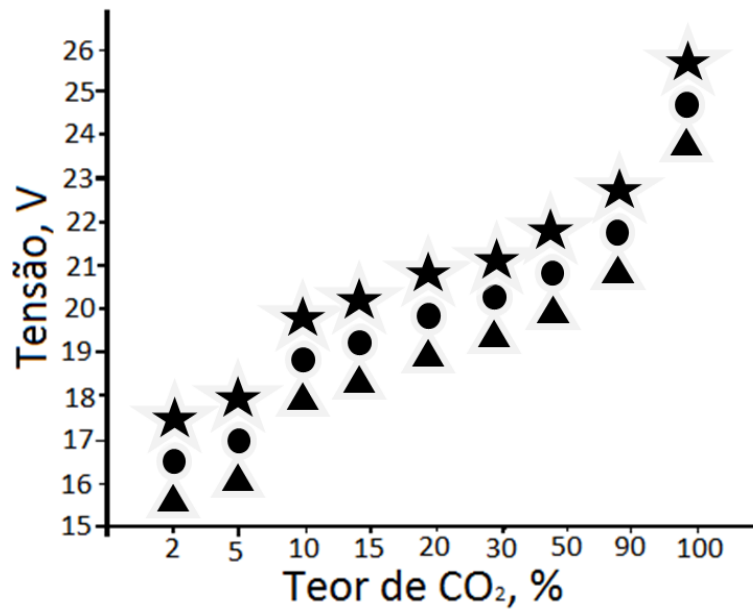


Figura 3.13 - Esquema hipotético da relação entre tensão de soldagem (em função da tensão de regulagem) e o teor de CO₂ no gás de proteção que oferece a melhor regularidade de transferência metálica (★ e ▲ - condições boas, ● - melhor condição)

Obs: O critério para se definir a condição otimizada é descrito no item 3.5

3.4. Etapas de desenvolvimento experimental

Com finalidade de realizar o objetivo do estudo, as seguintes etapas foram propostas e elaboradas:

- Preparação das placas de teste;
- Realização dos testes preliminares;
- Confecção dos testes definitivos;
- Análise dos resultados;

3.4.1. Testes Preliminares

Testes preliminares foram feitos para conseguir os seguintes objetivos:

- Encontrar o valor da velocidade de alimentação do arame, que resulte no valor desejado de corrente (ou seja, por volta de 130 A);

- Considerando o valor obtido da velocidade de alimentação do arame, para cada mistura gasosa, determinar a faixa operacional da tensão, a qual fornece transferência metálica por curto-circuito. Escolher 3 comprimentos de arco (ou seja, 3 tensões de regulação dentro da faixa operacional), as quais fornecem transferência metálica mais estável para cada teor de CO₂ na atmosfera protetora. Esta faixa de 3 tensões necessariamente deveria incluir a melhor condição e dois limites (superior e inferior);
- Procurar uma relação entre a velocidade de alimentação determinada e a velocidade de soldagem (o volume do metal depositado por comprimento de solda), a qual permite obter o cordão de solda com geometria (relação entre largura e reforço) adequada. Avaliação foi feita por aspecto visual.

É necessário ressaltar que com aumento do teor de CO₂ e mantendo a DBCP constante, a faixa de tensão adequada de trabalho tem que apresentar limites com maiores valores, pois, o CO₂, provavelmente pela maior capacidade de troca de calor, demanda uma maior tensão de arco (por isto denominado de arco “quente”, já que tem maior potência).

3.4.2. *Confecção dos Testes*

No presente trabalho foram consideradas duas variáveis, ou seja: misturas diferentes dos gases (2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50%, 90%, 100% de CO₂) e três níveis de tensão para cada mistura (para determinar melhor o comprimento do arco em cada caso). Ainda foi feita uma repetição para cada ensaio totalizando em 54 experimentos.

Após de determinar os parâmetros através dos testes preliminares, foram feitas 3 soldas (com tensão de regulação diferentes) para cada mistura Ar+CO₂ e foi escolhida uma melhor condição para comparação com os outros resultados e realização das filmagens. Os testes e filmagens foram feitos na forma aleatória (para diminuir um erro sistemático) usando equipamento descrito no Item 3.2.

3.5. **Análise dos Resultados**

A metodologia de análise dos resultados obtidos incluiu as formas objetivas (quantitativas) e subjetivas (qualificativas). Usou-se vários critérios para melhor

entendimento dos fenômenos e alterações que a mudança de teor de CO₂ na mistura do gás de proteção causou durante as soldagens (diretamente ou indiretamente). Os critérios de análise foram os seguintes:

- Aparência do cordão;
- Rendimento de deposição;
- Índice de regularidade da transferência metálica;
- Geometria do cordão;
- Avaliação da transferência metálica através das filmagens;

Vale á pena mencionar que todos os critérios são muito relacionados entre si. Por exemplo, quanto menos regular é a transferência metálica, com presença de curtos-circuitos incipientes, pior é o índice de regularidade, mais respingos são gerados, e conseqüentemente, menor é o rendimento de deposição e pior é a aparência do cordão. A seguir, os critérios de avaliação são apresentados mais detalhadamente.

3.5.1. Aparência do Cordão

A formação do cordão foi avaliada de forma subjetiva, do ponto de vista de uniformidade do acabamento.

3.5.2. Rendimento de Deposição

Para encontrar o rendimento de deposição, utilizou-se o valor da massa da chapa antes e depois da realização do cordão de solda. Da diferença das massas (levando-se em conta o cuidado na retirada de respingos que ficam na chapa), tem-se como resultado a massa real de material depositado na mesma, que é a própria massa do cordão de solda. Conhecendo-se a densidade, o diâmetro e o comprimento do arame utilizado (este último calculado a partir do tempo de soldagem e da velocidade de alimentação), foi possível obter a massa de arame que foi alimentado. Dividiu-se a massa do cordão pela massa de arame alimentado para, assim, determinar o rendimento de deposição (comumente expresso em porcentagem).

3.5.3. Índice de Regularidade da Transferência Metálica

A regularidade de transferência foi avaliada por um critério de regularidade de transferência, obtido inicialmente por um índice baseado na análise automatizada

dos oscilogramas de soldagem. Este índice, referenciado como IV_{cc} (criado no Laprosolda) quantifica a variância dos tempos de curtos-circuitos e de arco aberto através da Eq. 3.1:

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{t_{cc}}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}} \quad (3.1)$$

onde:

$\sigma_{t_{cc}}$ - desvio padrão da média dos tempos de curto-circuito; t_{cc} - duração média dos curtos circuitos; $\sigma_{t_{ab}}$ - desvio padrão da média dos tempos de arco aberto; t_{ab} - tempo médio de arco aberto.

Quanto maior for o desvio padrão relativo das durações de curto-circuito e de arco aberto (ou seja, quanto pior é a regularidade da transferência das gotas), maior será o valor do índice.

Além do índice, completa-se o referido critério com aplicação de um fator restrigente, baseado na faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito, cujo símbolo é ΔF_{cc} . Pode-se supor que uma gota não deva crescer muito antes de se destacar. Por outro lado, precisa ter um volume mínimo. Naturalmente esta faixa vai ser função do material do arame e do gás de proteção. Porém, medir tamanho médio de gota é uma tarefa laboriosa e requer equipamentos especiais. Mas pode-se estimar esta faixa de volume adequado pelo cálculo das frequências máximas (F_{ccmax}) e mínimas (F_{ccmin}) de destacamento esperadas, conforme a Eq. 3.2. Esta faixa de frequência define o volume de gota que deveria ser transferida a cada curto-circuito, de tal forma que permita um “sugamento” suave da mesma pela poça (tendo efeito da tensão superficial como principal mecanismo).

$$F_{cc} = \frac{V_a(d)^2}{(kd)^3} \quad (3.2)$$

onde: d - diâmetro do arame-eletrodo (mm); V_a - velocidade de alimentação de arame (mm/s); k - fator de multiplicação para estimar o diâmetro desejado da gota.

Para encontrar o IV_{cc} , utilizou-se um programa dedicado desenvolvido no ambiente MATLAB, o qual calcula os valores e respectivos desvios padrões

referidos na Eq. 3.1. Vale a ressaltar que os parâmetros foram calculados por uma média aritmética dos valores tomados em dois trechos da chapa, para que o ponto de solda central de fixação não influenciasse nos resultados. Este programa também calcula e fornece a frequência de curtos-circuitos (Fcc) durante o processo.

3.5.4. *Geometria do Cordão*

A geometria do cordão foi analisada através de macrografias de uma seção transversal obtida por corte em posição aleatória ao longo do cordão de solda. Essa seção foi devidamente preparada metalograficamente (lixada, polida e atacada com Nital 10%) para evidenciar a área fundida e área termicamente afetada. Sobre as macrografias de cada cordão calculou-se o valor médio da área fundida e da penetração. Os valores desses parâmetros geométricos foram obtidos com o uso de programas como Fotoshop e ImageJ, o primeiro usado para melhorar a imagem e separar as áreas e o segundo para calibração de distâncias e cálculo das áreas e comprimentos necessários. Para a análise das características geométricas do cordão de solda mediu-se também a altura do reforço e a largura do cordão (foram feitas 10 medidas para cada parâmetro e calculado o valor médio).

3.5.5. *Avaliação da Transferência Metálica através das Filmagens*

Avaliação da transferência metálica foi feita através das filmagens á alta velocidade sincronizadas com sinais de tensão de arco e corrente de soldagem. Através de análise dessas filmagens foi possível obter os dados quantitativos, tais como frequência de destacamento e tamanho das gotas, e qualificativos, tais como caráter da transferência metálica, comportamento da poça de fusão, deslocamento da gota, etc.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo o objetivo do presente trabalho, os experimentos foram feitos com finalidade de analisar a influência do teor de CO_2 na mistura com Ar sobre estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG operando em curto-circuito. Os resultados obtidos permitiram avaliar a regularidade da transferência do metal de adição, rendimentos de deposição para porcentagens diferentes de CO_2 no gás de proteção, assim como, comparar a aparência e geometria dos cordões feitos sob estas condições.

Dessa forma, para facilitar a descrição e justificativas dos resultados mencionados anteriormente, primeiramente nesse item serão apresentados os dados dos parâmetros de soldagem obtidos nos testes preliminares (que permitiram escolher as amostras para comparação) e testes definitivos. Depois, serão mostrados os quadros da transferência metálica obtidos através das filmagens, para, ao fim, apresentar os resultados de comparação da aparência dos cordões, rendimento de deposição, critério de regularidade da transferência metálica e parâmetros da geometria dos cordões.

4.1. Dados obtidos nos testes preliminares

Como já foi dito no procedimento experimental (Item 3.4), testes preliminares foram feitos primeiramente para encontrar o valor da velocidade de alimentação do arame com a qual foi possível atingir o valor requerido da corrente (ou seja, por volta de 130 A), para uma dada DBCP de 12 mm. Depois, procurou-se uma relação entre a velocidade de alimentação encontrada e a velocidade de soldagem, a qual permitiu obter um cordão de solda com geometria (relação entre largura e reforço) e volume adequados (avaliados subjetivamente). Em seguida, para cada mistura gasosa foi determinada uma faixa operacional da tensão que fornecesse a transferência metálica por curto-circuito

(mantendo o resto dos parâmetros de soldagem constantes). Dentro desta faixa operacional, foram escolhidos 3 comprimentos de arco (ou seja, 3 tensões de regulagem), os quais resultaram numa transferência metálica mais estável para cada teor de CO₂ na atmosfera protetora. Esta faixa de 3 tensões foi determinada com finalidade de necessariamente englobar a melhor condição de soldagem para cada mistura para as comparações futuras. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros encontrados nesta etapa preliminar, destacando-se que a tensão regulada variou-se de 16,5 a 24,5 V dependendo do gás de proteção.

Tabela 4.1 - Valores da tensão média de soldagem, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem para transferência estável e cordões adequados encontrados nos testes preliminares

Parâmetro	Teor de CO ₂ no gás de proteção (%)								
	2	5	10	15	20	30	50	90	100
V_{alim}, (m/min)	2,45							2,48	
V_{sold}, (cm/min)	32							32,4	
Tensão regulada (V)	16,5	17,0	18,0	18,5	19,0	19,5	20,0	21,5	22,5
	17,5	18,5	19,0	19,5	19,5	20,5	21,0	22,5	23,0
	18,0	19,0	20,0	20,5	21,0	22,5	22,0	23,0	24,5

Como foi esperado, com o aumento do teor de CO₂ na mistura do gás de proteção mantendo-se os demais parâmetros constantes, a faixa de tensão adequada de trabalho apresentou os limites com maiores valores. Isso se explica pelo fato que, devido à necessidade de se dissociar antes de ionização e por ter maior capacidade de troca de calor (comparando com Ar puro), as misturas com maiores quantidades de CO₂ demandam uma maior energia (tensão) para abertura e manutenção de arco.

Para casos de soldagem com 90 e 100% de CO₂ na mistura, devido à queda significativa da corrente de soldagem (de 130 para cerca de 120 A), foi necessário de aumentar a velocidade de alimentação de arame de 2,45 para 2,48 m/min. Respectiva velocidade de soldagem também foi alterada de 32 para 32,4 cm/min para garantir o mesmo volume do material depositado. As medidas tomadas ajudaram evitar o efeito das alterações da corrente de soldagem na geometria (especificamente, na penetração) do cordão, deixando assim analisar o efeito de gás de proteção com maior segurança.

Após de obtenção dos parâmetros apresentados anteriormente, foram feitos os testes definitivos. A Tabela 4.2 apresenta os dados monitorados e medidos da corrente e tensão de soldagem durante os experimentos definitivos.

Tabela 4.2 – Valores monitorados/medidos da corrente e tensão de soldagem nos testes definitivos feitos com teores diferentes de CO₂

Teor de CO₂ (%)	Corpo de prova	Tensão regulada (V)	Tensão medida média (V)	Tensão medida RMS (V)	Corrente média (A)	Corrente RMS (A)
2	1	16,5	15,6	16,3	127	131
	2	17,5	16,5	16,7	127	139
	3	18,0	17,1	17,5	127	136
5	4	17,0	15,7	16,5	124	129
	5	18,5	17,6	17,8	128	141
	6	19,0	18,0	18,5	126	135
10	7	16,0	15,2	16,5	130	140
	8	17,0	16,2	17,3	131	137
	9	18,0	17,1	17,9	131	135
	10	19,0	18,1	18,4	129	137
	11	20,0	19,0	19,6	129	135
	12	21,0	19,9	20,4	128	135
15	13	18,5	17,5	18,2	128	133
	14	19,5	18,5	18,7	128	136
	15	20,5	19,5	19,9	125	131
20	16	19,0	18,1	18,3	131	142
	17	19,5	18,7	18,9	129	140
	18	21,0	20,3	21,1	129	136
30	19	19,5	19,3	20,2	129	137
	20	20,5	19,5	19,6	129	139
	21	22,5	21,4	21,9	133	140
50	22	20,0	19,5	20,6	132	140
	23	21,0	20,5	20,7	130	137
	24	22,0	21,6	21,7	130	140
90	25	21,5	20,1	21,0	131	142
	26	22,5	21,5	21,8	131	142
	27	23,0	22,0	22,0	131	138
100	28	22,5	21,8	22,0	128	141
	29	23,0	22,0	22,2	130	140
	30	24,5	23,3	23,5	130	139

No caso da mistura com 10% de CO₂, foram feitos mais testes com a finalidade de comprovar que para cada gás de proteção existe um comprimento do arco que fornece a melhor estabilidade de transferência. O resultado de avaliação é descrito no Item a seguir.

4.1.1. Escolha das condições de regulagem dos parâmetros de soldagem para a comparação

A escolha da condição de regulagem dos parâmetros de soldagem para cada composição do gás de proteção toma como base a condição mais estável. Par isto, foi aplicado o critério de regularidade (IVcc e as frequências de corte Fcc, descritos no Item 3.5.3), comprovado pelo rendimento de deposição (pode-se supor que quanto mais estável é a transferência metálica menos respingos tem). A Tabela 4.3 demonstra os valores de cálculo do critério de regularidade, enquanto a Tabela 4.4 apresenta os valores de rendimento de deposição para todas as condições de proteção gasosa, nas 3 condições de regulagem da tensão de soldagem para cada mistura. Foram sombreadas as condições consideradas representativas para fins comparativos, ou seja, as soldas com melhores índices de regularidade de transferência e rendimento de deposição.

Tabela 4.3 – Parâmetros estatísticos e valores dos índices de regularidade da transferência metálica IVcc em função do teor de CO₂ e tensão de regulagem

Teor de CO ₂ (%)	Corpo de prova	Tensão regulada (V)	t _{cc} (s)	σ _{tcc} (s)	t _{ab} (s)	σ _{tab} (s)	IVcc	Fcc (Hz)
2	1	16,5	0,0036	0,0010	0,0246	0,0065	0,531	39
	2	17,5	0,0029	0,0006	0,0263	0,0079	0,512	35
	3	18,0	0,0038	0,0007	0,0475	0,0224	0,664	25
5	4	17,0	0,0029	0,0009	0,0160	0,0040	0,566	40
	5	18,5	0,0033	0,0005	0,0397	0,0147	0,523	36
	6	19,0	0,0036	0,0006	0,0393	0,0147	0,537	27
10	7	16,0	0,0040	0,0018	0,0138	0,0049	0,823	46
	8	17,0	0,0034	0,0012	0,0155	0,0044	0,632	44
	9	18,0	0,0032	0,0007	0,0214	0,0055	0,469	41
	10	19,0	0,0034	0,0006	0,0270	0,0074	0,406	32
	11	20,0	0,0042	0,0007	0,0326	0,0078	0,453	30
	12	21,0	0,0036	0,0007	0,0478	0,0245	0,718	22
15	13	18,5	0,0028	0,0009	0,0148	0,0054	0,703	45
	14	19,5	0,0026	0,0006	0,0220	0,0064	0,516	30
	15	20,5	0,0029	0,0012	0,0178	0,0066	0,767	24
20	16	19,0	0,0036	0,0022	0,0151	0,0084	1,172	29
	17	19,5	0,0027	0,0008	0,0256	0,0086	0,619	25
	18	21,0	0,0030	0,0010	0,0174	0,0052	0,629	17
30	19	19,5	0,0023	0,0012	0,0162	0,0083	1,037	25
	20	20,5	0,0026	0,0011	0,0264	0,0110	0,830	23
	21	22,5	0,0023	0,0011	0,0199	0,0088	0,919	19

50	22	20,0	0,0021	0,0012	0,0116	0,0063	1,102	22
	23	21,0	0,0022	0,0012	0,0128	0,0069	1,089	20
	24	22,0	0,0021	0,0012	0,0121	0,0066	1,104	16
90	25	21,5	0,0020	0,0016	0,0099	0,0040	1,202	23
	26	22,5	0,0021	0,0012	0,0106	0,0056	1,094	18
	27	23,0	0,0022	0,0012	0,0122	0,0071	1,137	15
100	28	22,5	0,0024	0,0013	0,0201	0,0124	1,200	20
	29	23,0	0,0026	0,0014	0,0307	0,0183	1,156	18
	30	24,5	0,0028	0,0016	0,0356	0,0290	1,213	16

Obs: t_{cc} – tempo médio dos curtos-circuitos, t_{ab} – tempo médio dos arcos abertos, σ_{tcc} e σ_{tab} – desvios padrão dos tempos médios dos curtos-circuitos e arcos abertos respectivamente, IV_{cc} – índice de regularidade de transferência metálica, F_{cc} – frequência dos curtos-circuitos.

Tabela 4.4 – Os valores obtidos de quantidade dos respingos gerados e rendimento de deposição (em função do teor de CO₂ e tensão de regulação)

Teor de CO ₂ (%)	Corpo de prova	Massa de metal depositado (g)	Massa de metal fundido (g)	Respingos (%)	Rendimento de deposição (%)
2%	1	11,60	11,84	2,04	97,96
	2	11,72	11,95	1,90	98,10
	3	12,24	12,37	1,05	98,95
5%	4	11,42	11,49	0,60	99,40
	5	11,76	12,09	2,71	97,29
	6	11,43	12,33	7,33	92,67
10%	7	11,51	12,30	6,42	93,58
	8	11,38	11,88	4,18	95,82
	9	10,86	11,31	4,02	96,00
	10	10,86	11,31	4,00	96,00
	11	11,22	11,70	4,11	95,89
	12	10,32	11,20	7,92	92,08
15%	13	11,17	11,77	5,11	94,89
	14	10,06	10,57	4,85	95,15
	15	11,23	11,81	4,88	95,12
20%	16	10,31	11,14	7,42	92,58
	17	11,34	11,98	5,36	94,64
	18	11,66	12,33	5,47	94,53
30%	19	10,95	11,74	6,69	93,31
	20	10,97	11,70	6,24	93,76
	21	10,43	11,17	6,64	93,36
50%	22	11,07	11,91	7,07	92,93
	23	10,48	11,28	7,07	92,93
	24	10,88	11,81	7,84	92,16

90%	25	11,62	12,83	9,42	90,58
	26	11,94	13,18	9,41	90,59
	27	12,17	13,46	9,60	90,40
100%	28	10,07	11,38	11,54	88,46
	29	10,35	11,67	11,27	88,73
	30	10,17	11,45	11,21	88,79

Como foi mencionado no Item 3.5.3, o índice de regularidade da transferência metálica IVcc é considerado junto com Fcc, ou seja, para o índice poder ser aplicado, a frequência dos curtos-circuitos deve ser na faixa da frequência aceitável. Para velocidade de alimentação e diâmetro do arame utilizados, a frequência deveria apresentar os valores entre 20 e 60 Hz. Para a faixa de frequência mínima, impôs-se como base uma gota fundida com diâmetro aproximadamente 1,5 vezes maior que o diâmetro do arame, enquanto para a faixa de frequência máxima impôs-se, de forma análoga, uma gota fundida com o diâmetro 1,0 vezes maior que o diâmetro do arame (Eq. 3.2). Estes valores de alargamento do valor mínimo e máximo foram atribuídos de forma arbitrária pela experiência e expectativas do grupo de soldagem Laprosolda. Pode-se perceber que nem todos os valores obtidos da frequência correspondem à faixa estabelecida. Entretanto, entre as amostras com melhores índices, todas possuem a frequência dos curtos-circuitos adequada.

De acordo com as Tabelas 4.3 e 4.4, pode-se perceber que no caso de presença de 2, 5, 10 e 100% de CO₂ na mistura com Ar, os melhores índices de regularidade não correspondem aos maiores rendimentos de deposição. Nestes casos, a preferência foi dada para o índice de regularidade, pois, dentro da faixa das tensões de trabalho para as misturas, os valores de rendimento de deposição são muito próximos e, também, devido às condições cálculos deste foram feitos com menor precisão quando comparado com o índice.

No caso de 10% de CO₂, foram feitos 6 soldagens variando-se a tensão de regulagem de 16 até 21 V. A Figura 4.1 ilustra que apesar dos rendimentos de deposição foram altos neste caso, ainda há uma tendência de valores máximos no centro da faixa. Também se observa que o índice para medir a regularidade da transferência (IVcc) parece mostrar uma tendência de mínimo (quanto menor, melhor) no centro da faixa. Assim, observa-se uma correlação no comportamento entre o rendimento de deposição e IVcc; há um ponto de máximo para o rendimento coincidente com o de mínimo para o IVcc, no que seria a melhor tensão para a soldagem (20 V no caso). Nas tensões mais afastadas

deste ponto, é clara a percepção de um comportamento da transferência com menor rendimento e pior regularidade, o que confirma em parte o postulado proposto. Assim, existe um motivo de supor que a mesma tendência será observada para todos os testes.

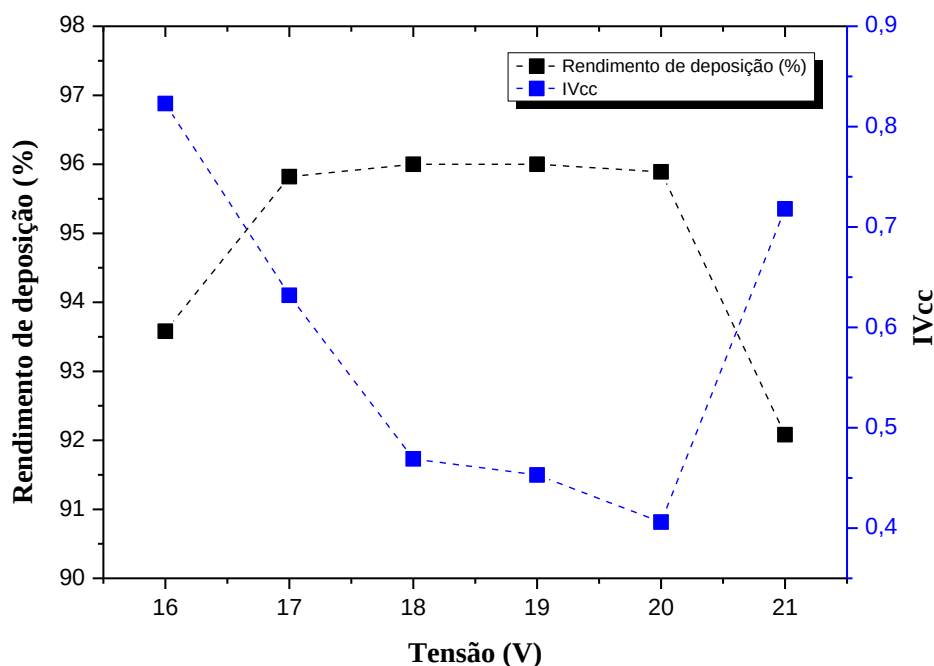


Figura 4.1 – Geração de respingos e índice de regularidade em função da tensão de regulagem para mistura 10%CO₂+90%Ar

(Obs: quanto menor é o índice melhor é a regularidade da transferência e estabilidade do processo)

Desta maneira, para uma análise final da influência do teor de CO₂ sobre a estabilidade do processo de soldagem e transferência metálica foram escolhidos as condições de regulagem para cada teor de CO₂ no gás de proteção. A Tabela 4.5 indica essas condições.

Tabela 4.5 – Condições de regulagem escolhidos para análise final dos resultados para cada mistura gasosa

Teor de CO ₂ (%)	2	5	10	15	20	30	50	90	100
Corpo de prova	2	5	11	14	17	20	23	26	29

4.2. Análise dos resultados

4.2.1. Filmagens da transferência metálica

As filmagens para cada composição da atmosfera protetora foram feitas mantendo os parâmetros de soldagem obtidos nos testes preliminares e definitivos. Cada filmagem foi feita de acordo com procedimento descrito no Item 3.2.1 (e) e durou 10 segundos. Para apresentação da amostra sequencial escolheu-se os quadros de 1 ou 2 curtos-circuitos que apresentam o comportamento típico da transferência metálica para dado gás de proteção. Tempo entre os quadros não é necessariamente constante. Além das imagens, através das filmagens também foram conseguidos os dados de frequência de destacamento das gotas.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram as amostras sequenciais das transferências metálicas típicas para as misturas 2%CO₂+98%Ar e 5%CO₂+95%Ar, respectivamente. Nas imagens pode-se observar que as gotas se transferem sem quaisquer obstáculos, ou seja, a gota cresce até determinado tamanho, encosta na poça de fusão, forma o menisco e se transfere suavemente sem formação dos respingos.

Já no caso de 10% e 15% de CO₂ no gás de proteção (Fig. 4.5 e 4.6, respectivamente), podem ser observados os fenômenos de deslocamento da gota em formação na ponta de eletrodo (quadros b e c da Fig. 4.5 e b da Fig. 4.6) e geração dos respingos devido o rompimento mais violento de menisco de metal líquido durante a transferência (quadros i da Fig. 4.5 e i e j da Fig. 4.6).

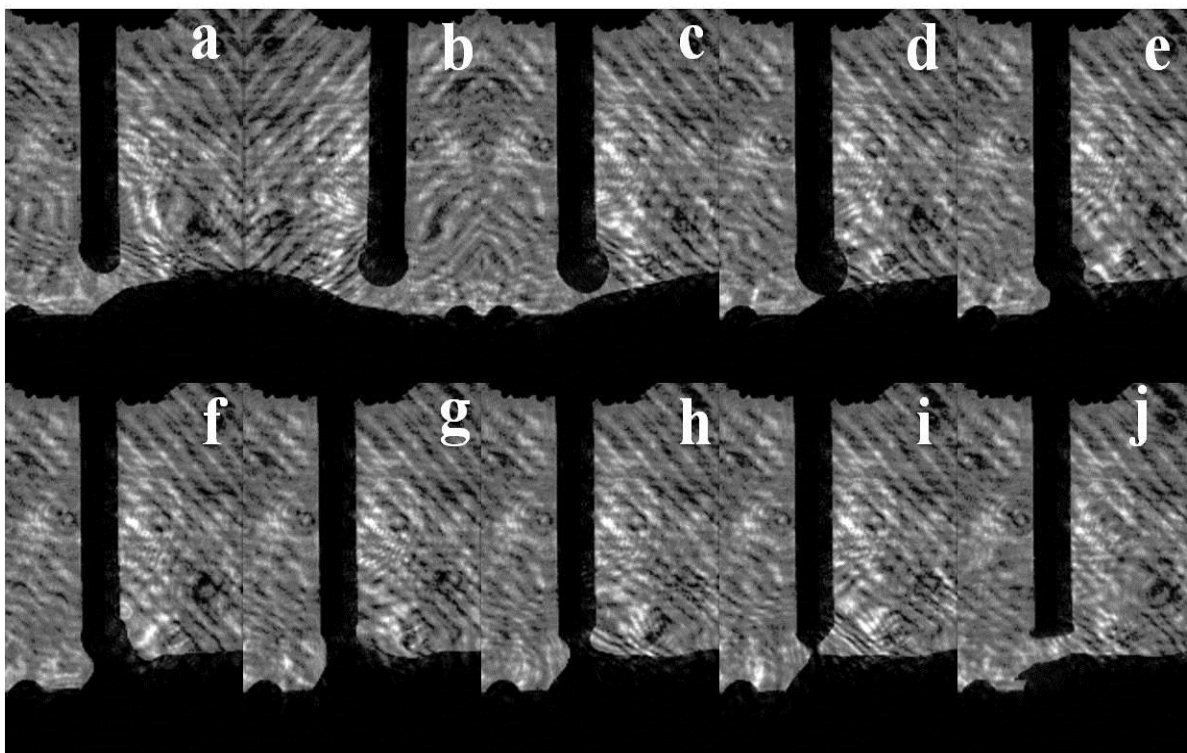


Figura 4.3 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica típica para a mistura 2%CO₂+98%Ar

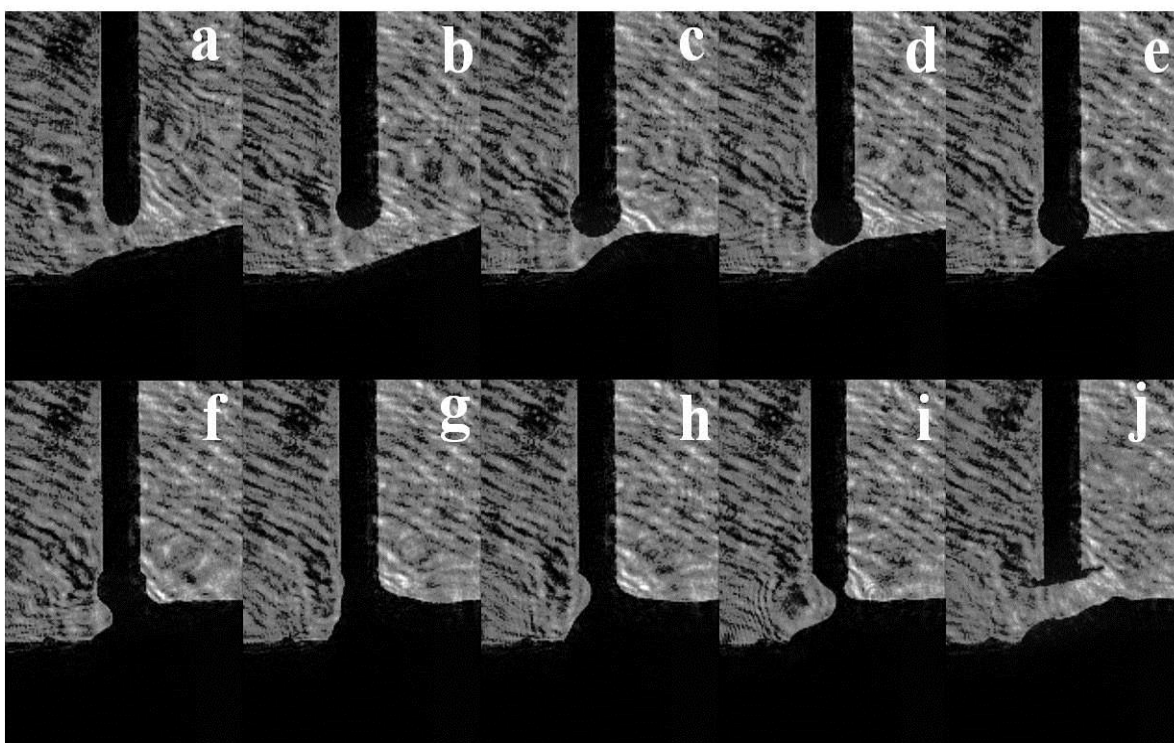


Figura 4.4 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 5%CO₂+95%Ar

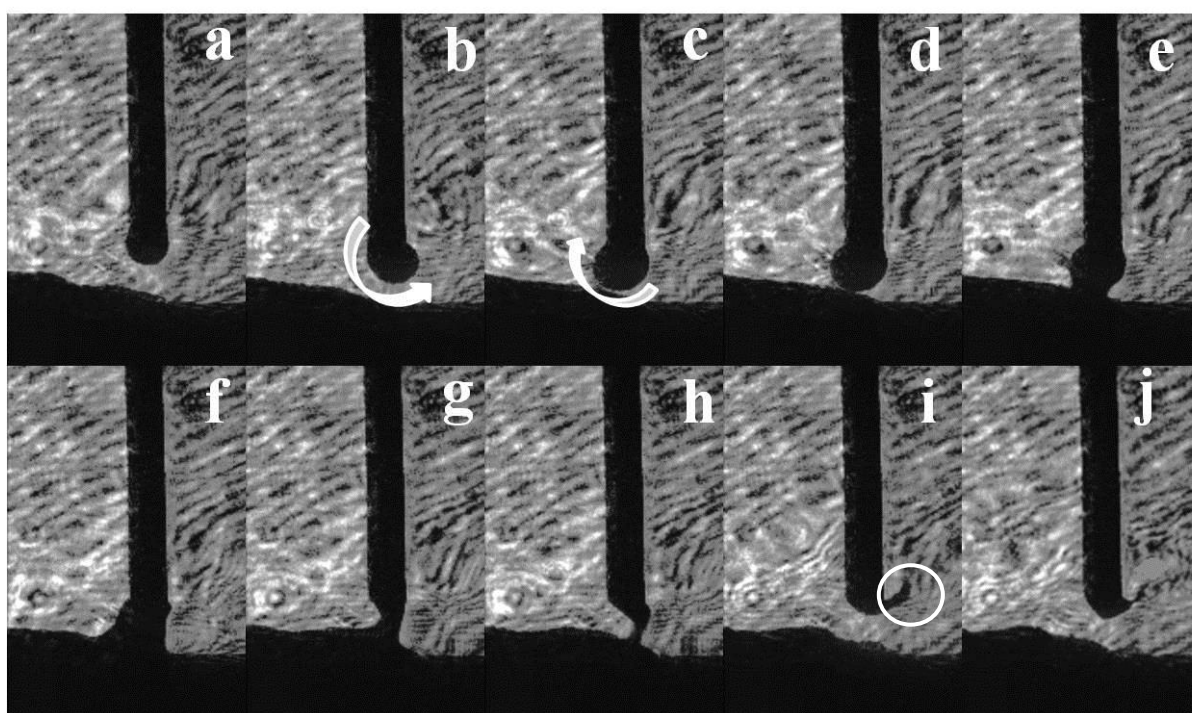


Figura 4.5 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 10%CO₂+90%Ar

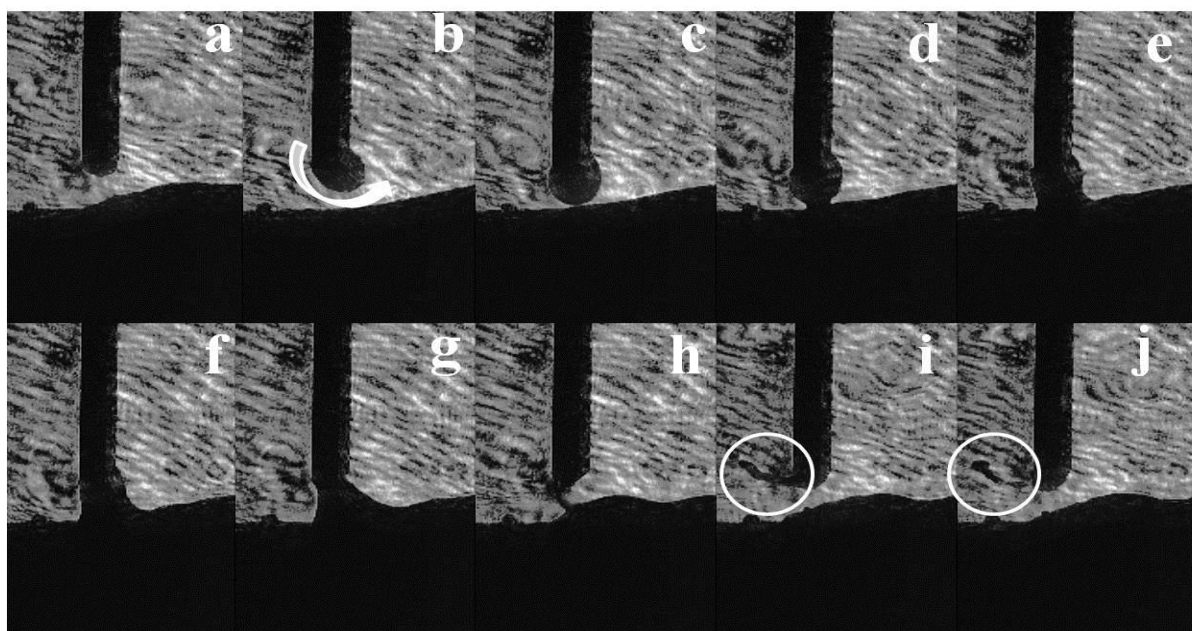


Figura 4.6 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 15%CO₂+85%Ar

Pela Figura 4.7, pode-se observar a amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 20%CO₂+80%Ar. Neste caso, a estabilidade da transferência de metal de adição é prejudicada pelo aparecimento dos curtos-circuitos instantâneos, quando a gota toca na poça de fusão, mas não se transfere (quadros f e g). Na segunda tentativa a transferência metálica ocorre sem obstáculos (quadros j - o).

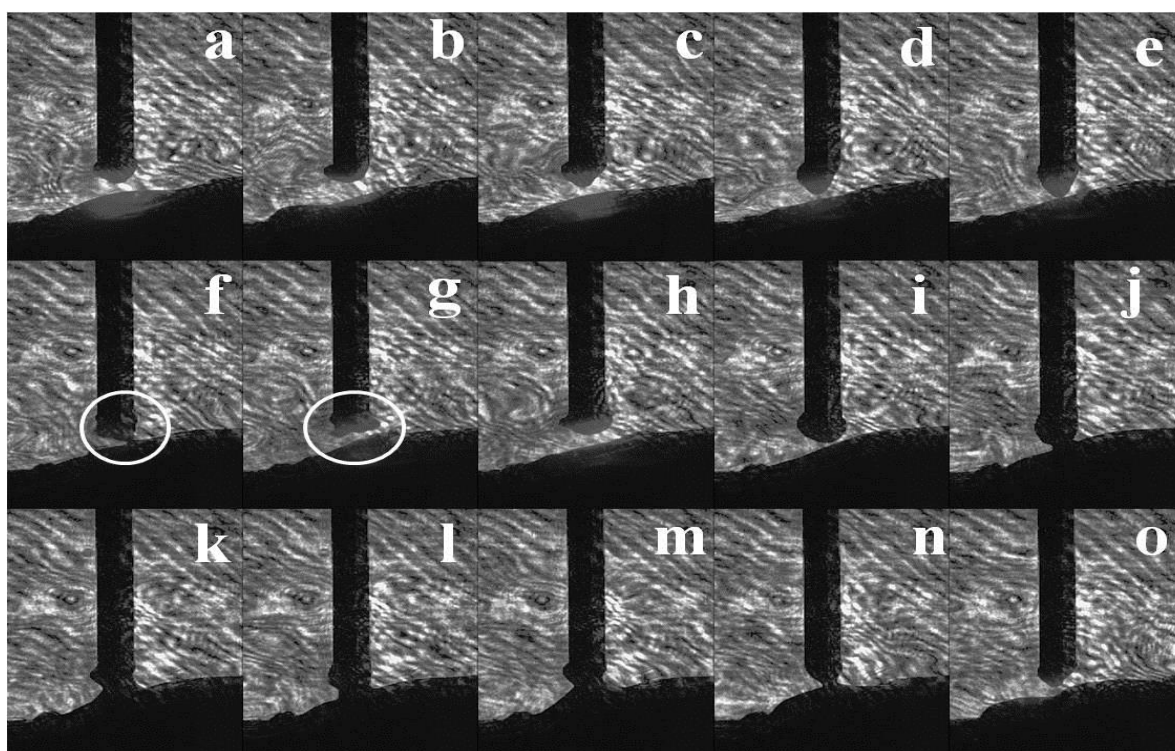


Figura 4.7 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 20%CO₂+80%Ar

A transferência metálica com adição de 30% de CO₂ (Fig. 4.8), além de fatores descritos anteriormente, ou seja, deslocamento da gota na ponta de eletrodo (quadros c e d) e curtos-circuitos instantâneos (quadro e), a transferência é também prejudicada por oscilações da poça de fusão de maior amplitude (quadros n e o). Conforme Nikolaev (1978), este fenômeno é um dos fatores que mais provocam a geração dos respingos.

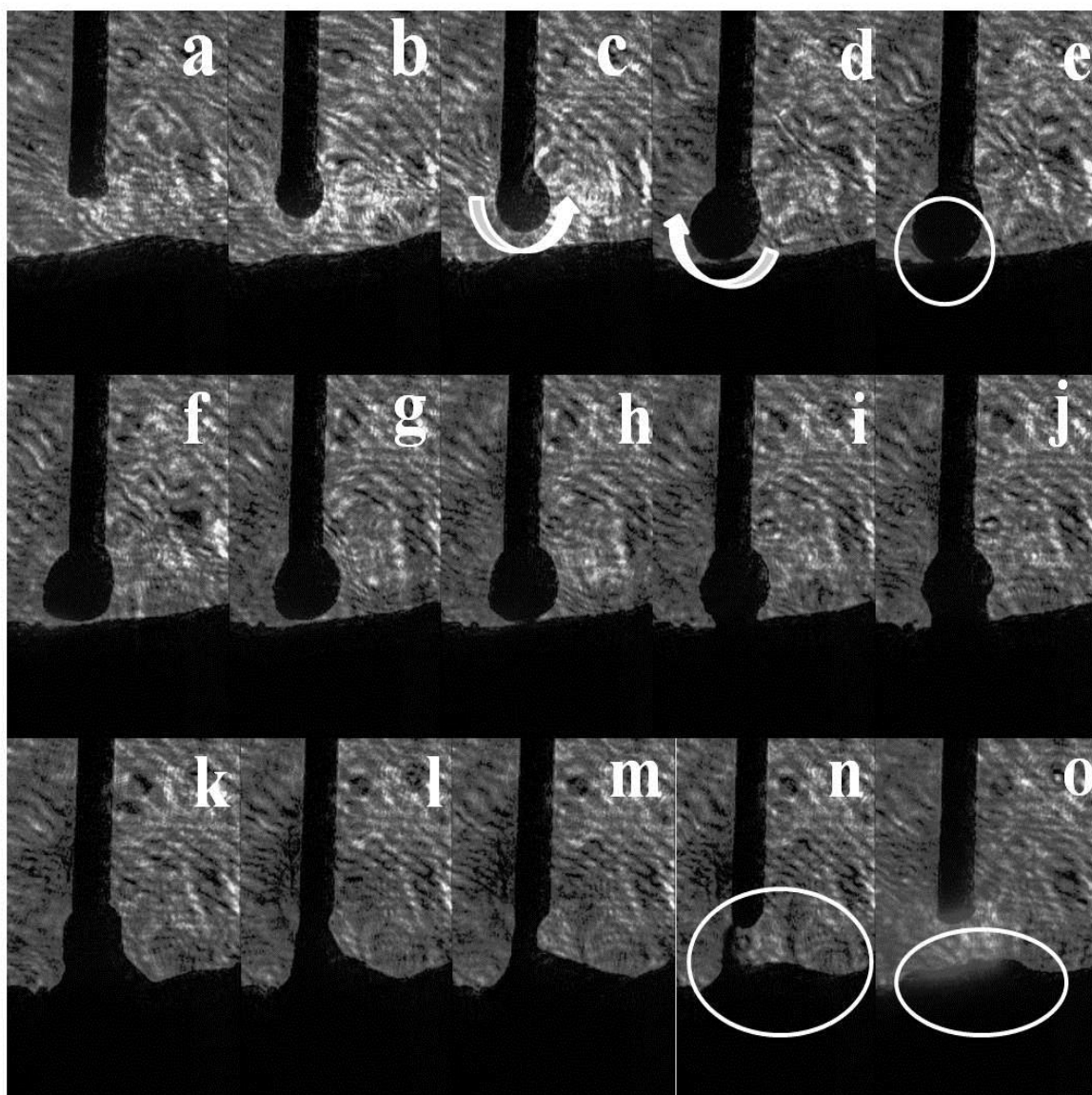


Figura 4.8 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 30%CO₂+70%Ar

As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram o comportamento da transferência metálica típica para as misturas 50%CO₂+50%Ar e 90%CO₂+10%Ar, respectivamente. Os quadros mostram que os fenômenos que pioram a transferência da gota tornam-se ainda mais pronunciados. Por exemplo, comparando-se com as amostras anteriores, a gota tem maior deslocamento (quadros c-f da Fig. 4.9 e quadro i da Fig. 4.10), o tempo dos curtos-circuitos instantâneos aumenta, o que, por sua vez, provoca alterações na forma da gota (quadros j – l da Fig. 4.9 e quadro g da Fig. 4.10), oscilações da poça de fusão ficam mais pronunciados gerando ainda mais respingos (quadro o da Fig. 4.9 e quadro o da Fig. 4.10).

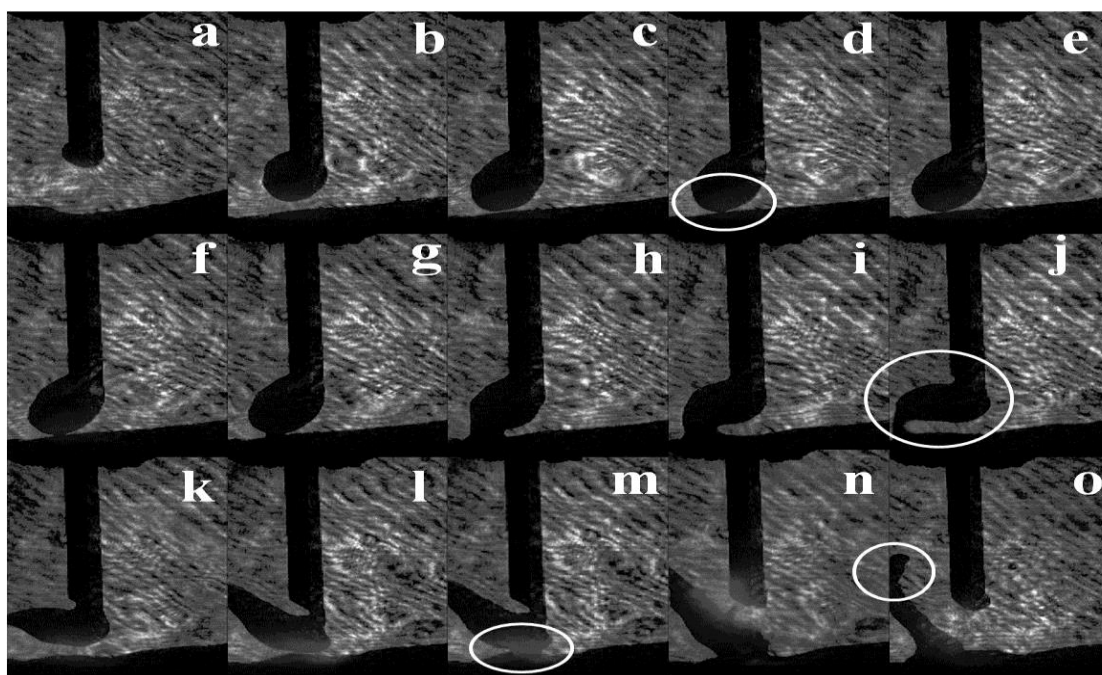


Figura 4.9 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 50%CO₂+50%Ar

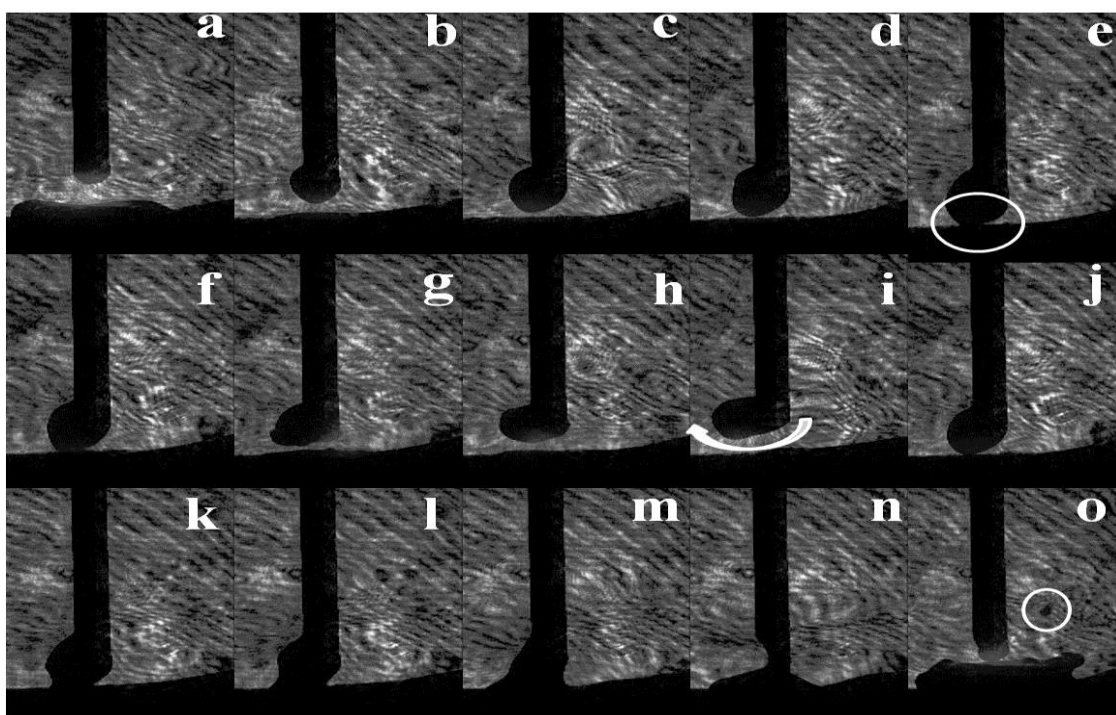


Figura 4.10 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para a mistura 90%CO₂+10%Ar

Nas filmagens feitas durante soldagens com CO_2 puro pode-se observar a transferência metálica bem instável e irregular. Além dos fenômenos observados nas filmagens feitos utilizando as misturas de Ar e CO_2 , no caso de CO_2 puro foi registrado que a gota pode encostar-se a poça de fusão várias vezes antes de destacar (quadros g, l, m da Fig. 4.11), mudando sua forma e gerando os respingos. Também foi percebido que o rompimento de menisco do metal líquido ocorre de forma mais violenta, que aumenta a quantidade dos respingos gerados (quadro t da Fig. 4.11).

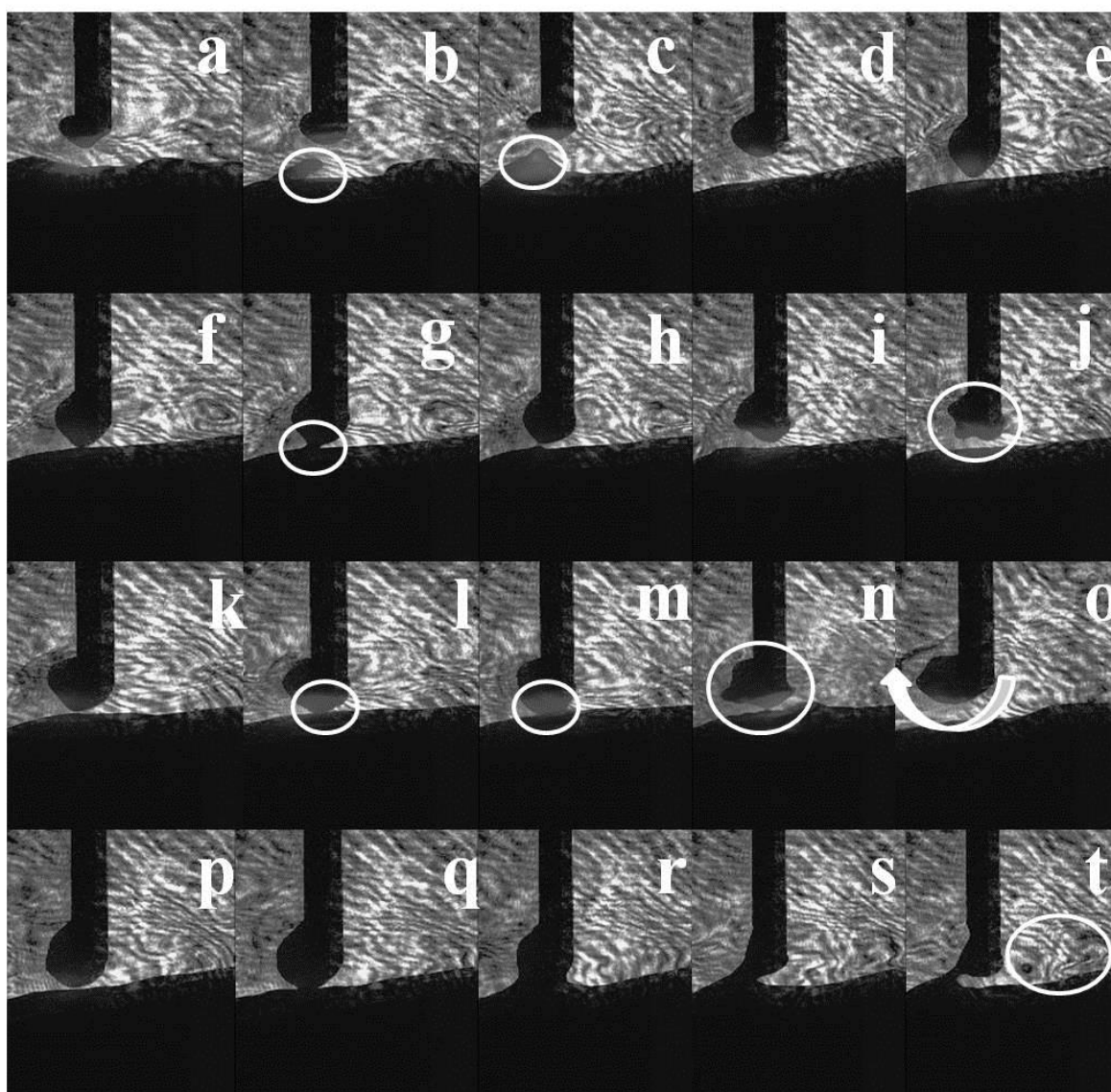


Figura 4.11 – Amostra sequencial que ilustra melhor a transferência metálica para CO_2 puro

Além disto, varias vezes nas filmagens foi observado o fenômeno de repulsão da gota por algum motivo tão forte que a gota subiu o eletrodo sem se transferir (Fig. 4.12).

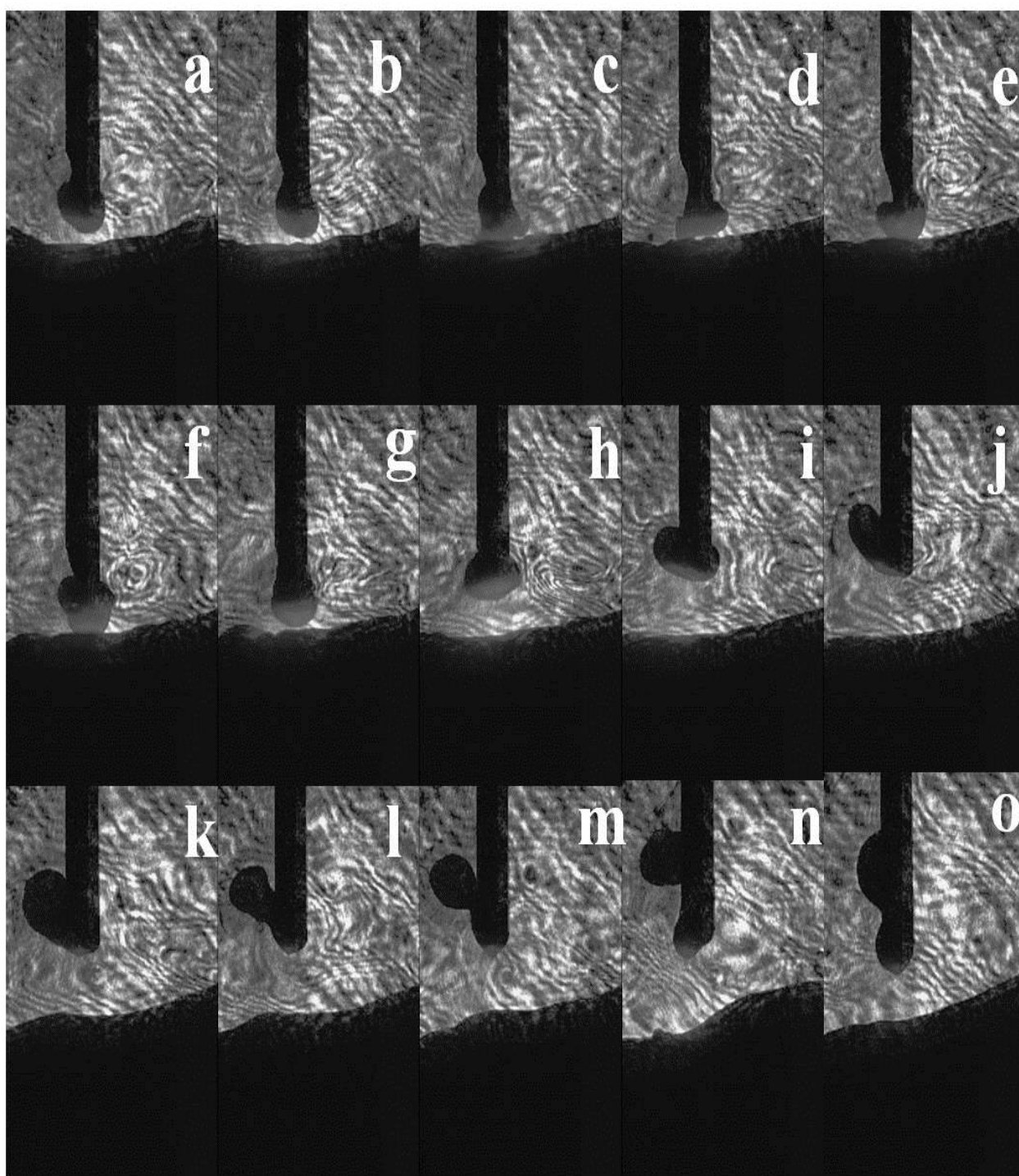


Figura 4.12 – O fenômeno de subida da gota em transferência ao longo de eletrodo observado nas soldagens feitas com CO_2 puro

A partir das imagens capturadas também foi possível avaliar o tamanho (volume) das gotas na hora de transferência para cada gás de proteção. Observa-se que com aumento do teor de CO_2 no gás de proteção a área da gota no momento de encostar-se à poça de fusão para a transferência se aumenta também. Este fenômeno de crescimento da

gota com aumento de teor de CO₂ na mistura já foi observado em vários trabalhos, mas normalmente não é explicado claramente.

Desta maneira, as filmagens realizadas com câmera de alta velocidade ajudaram a visualizar o comportamento da transferência metálica para varias misturas de CO₂ e Ar e concluir que com aumento de teor de CO₂ a regularidade da transferência metálica piora acompanhada pelos tais fenômenos, como curtos-circuitos incipientes, rompimento de menisco violento, aumento de geração dos respingos, deslocamento da gota na ponta de eletrodo etc.

4.2.2. *Rendimento de deposição*

A Tabela 4.6 mostra os valores da quantidade de respingos gerados e rendimento de deposição em função do teor de CO₂ no gás de proteção.

Tabela 4.6 – Quantidade dos respingos gerados e rendimento de deposição em função do teor de CO₂

Teor de CO₂ (%)	Corpo de prova	Massa de metal depositado (g)	Massa de metal fundido (g)	Respingos (%)	Rendimento de deposição (%)
2	2	11,72	11,95	1,90	98,10
5	5	11,76	12,09	2,71	97,29
10	11	11,22	11,70	4,11	95,89
15	14	10,06	10,57	4,85	95,15
20	17	11,34	11,98	5,36	94,64
30	20	10,97	11,70	6,24	93,76
50	23	10,48	11,28	7,07	92,93
90	26	11,94	13,18	9,41	90,59
100	29	10,35	11,67	11,27	88,73

As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram a influência do teor de CO₂ na mistura com Ar sobre a geração de respingos e rendimento de deposição respectivamente. Os gráficos mostram a tendência quase linear de aumento da geração dos respingos e, conseqüentemente, diminuição do rendimento de deposição, com aumento do teor de CO₂ no gás de proteção, o que confirma numericamente os resultados observados nas filmagens (a quantidade de respingos aumenta devido o rompimento mais violento do menisco líquido e oscilações da poça de fusão mais pronunciadas).

Também, vale à pena mencionar que com aumento do teor de CO_2 no gás de proteção foi mais difícil de tirar os respingos colados no corpo de prova. Isso pode ser explicado com o fato de que quanto mais CO_2 têm na atmosfera protetora, tanto mais volumosa torna – se a gota e também mais calor ela carrega em si. Assim, as partículas da gota, ou seja, respingos mais quentes caem na chapa e aderem mais nela, o que dificulta a limpeza posterior.

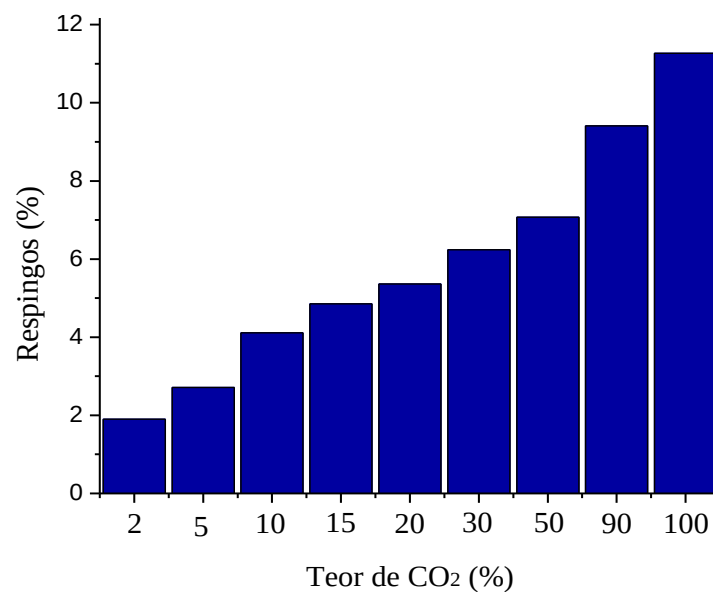


Figura 4.13 – Geração de respingos em função do teor de CO_2 no gás de proteção

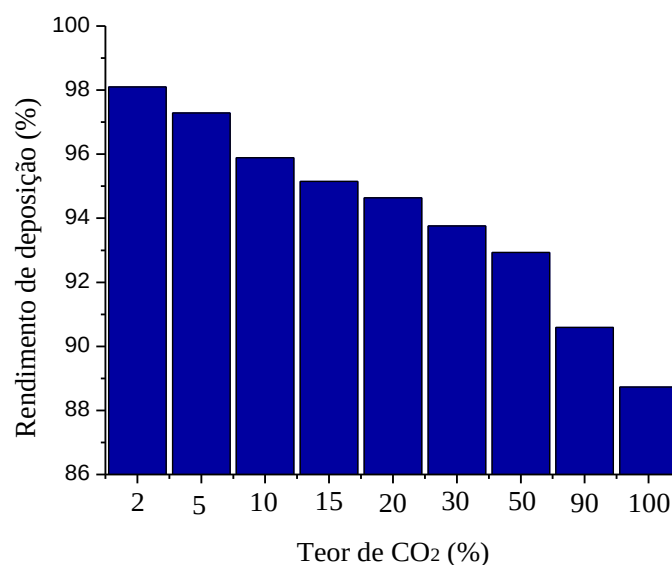


Figura 4.14 – Rendimento de deposição em função do teor de CO_2 no gás de proteção

4.2.3. Índice de regularidade da transferência metálica IVcc

A Tabela 4.7 mostra os parâmetros estatísticos (a saber, t_{cc} - tempo médio dos curtos-circuitos, t_{ab} - tempo médio dos arcos abertos, σ_{tcc} e σ_{tab} - desvios padrão dos tempos médios dos curtos-circuitos e arcos abertos respectivamente, Fcc – frequência dos curtos-circuitos) e valores dos índices de regularidade da transferência metálica IVcc em função do teor de CO₂ no gás de proteção.

Tabela 4.7 – Parâmetros estatísticos e valores dos índices de regularidade da transferência metálica I_V em função do teor de CO₂

Teor de CO₂ (%)	Corpo de prova	t_{cc} (s)	σ_{tcc} (s)	t_{ab} (s)	σ_{tab} (s)	IVcc	Fcc (Hz)
2	2	0,0029	0,0006	0,0263	0,0079	0,512	36
5	5	0,0033	0,0005	0,0397	0,0147	0,523	36
10	11	0,0042	0,0007	0,0326	0,0078	0,406	32
15	14	0,0026	0,0006	0,0220	0,0064	0,516	30
20	17	0,0027	0,0008	0,0256	0,0086	0,619	25
30	20	0,0026	0,0011	0,0264	0,0110	0,830	23
50	23	0,0022	0,0012	0,0128	0,0069	1,089	20
90	26	0,0021	0,0012	0,0106	0,0056	1,094	18
100	29	0,0026	0,0014	0,0307	0,0183	1,156	18

Obs: quanto menor é o índice melhor é a regularidade da transferência e estabilidade do processo

Conforme a Figura 4.15, numa forma geral, o índice IVcc cresce com aumento de porcentagem de CO₂ na mistura, ou seja, a regularidade de transferência metálica e estabilidade do processo pioram. Parece que os teores de CO₂ podem ser divididos em 2 faixas. A primeira, de 2% até 20% de CO₂, quando o índice apesar de piorar ainda continua bem e segunda, de 30% até 100% de CO₂, quando o índice já aumenta muito comparando com a primeira faixa. Porém, existe uma “queda” do índice na região de 10% de CO₂, quando a regularidade da transferência metálica e estabilidade do processo voltam a melhorar. É pouco provável que a razão disto seja um erro, pois o teste com 10% de CO₂ foi repetido mais 2 vezes e os resultados apresentaram divergências insignificantes.

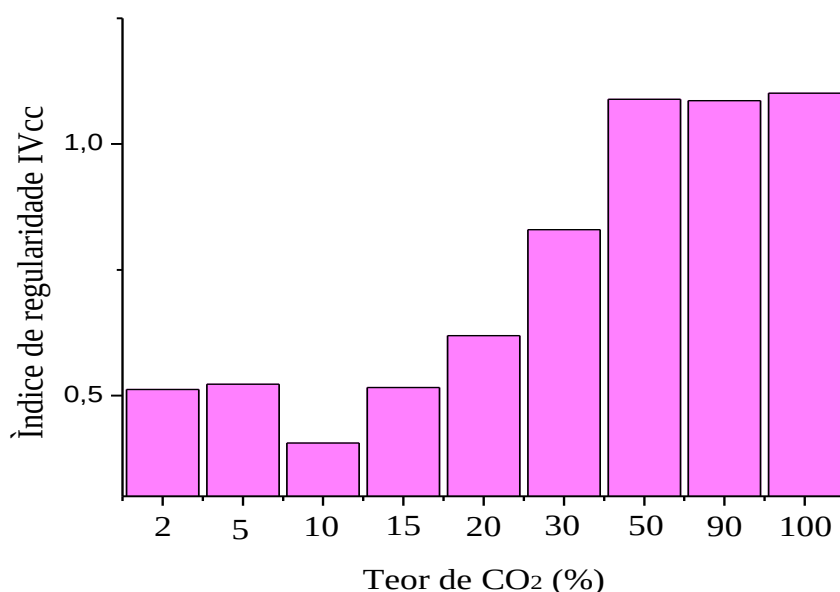


Figura 4.15 – Índice de regularidade da transferência metálica I_V em função do teor de CO_2 no gás de proteção (quanto menor é o índice melhor é a regularidade da transferência e estabilidade do processo)

Como se esperava, numa forma geral, com aumento de CO_2 a frequência de destacamento das gotas diminui. Isso se explica com o fato observado nas filmagens que a gota torna-se mais volumosa e requer mais tempo para crescer e se transferir. Também, comparando-se as filmagens (Fig. 4.3 - 4.12), pode-se perceber que, apesar da frequência de destacamento das gotas diminuir, a frequência dos curtos-circuitos aumenta. Isto sugere que não seria só o aumento da gota que estaria prejudicando a estabilidade de transferência, mas também a incidência maior de curtos-circuitos incipientes, causados provavelmente pela repulsão da gota para maiores teores de CO_2 .

4.2.4. Aparência dos cordões

Como foi dito no Item 3.5.1, a aparência dos cordões obtidos usando misturas com diferentes teores de CO_2 foi avaliada de forma subjetiva, do ponto de vista de aspecto visual e uniformidade de formação. A Figura 4.16 mostra os cordões obtidos (vista de cima e do lado de raiz).

Pelas imagens pode-se perceber que com aumento do teor de CO_2 o aspecto e a uniformidade dos cordões pioram (começando com cordões lisos no caso de 2% CO_2 +98%Ar e 5% CO_2 +95%Ar e terminando com cordões desiguais com mordeduras no caso de 90% CO_2 +10%Ar e CO_2 puro). Isso pode ser explicado voltando-se a observar as

filmagens da transferência metálica (Item 4.2.1) com deterioração da regularidade desta, alterações na forma da gota e aumento de geração dos respingos.

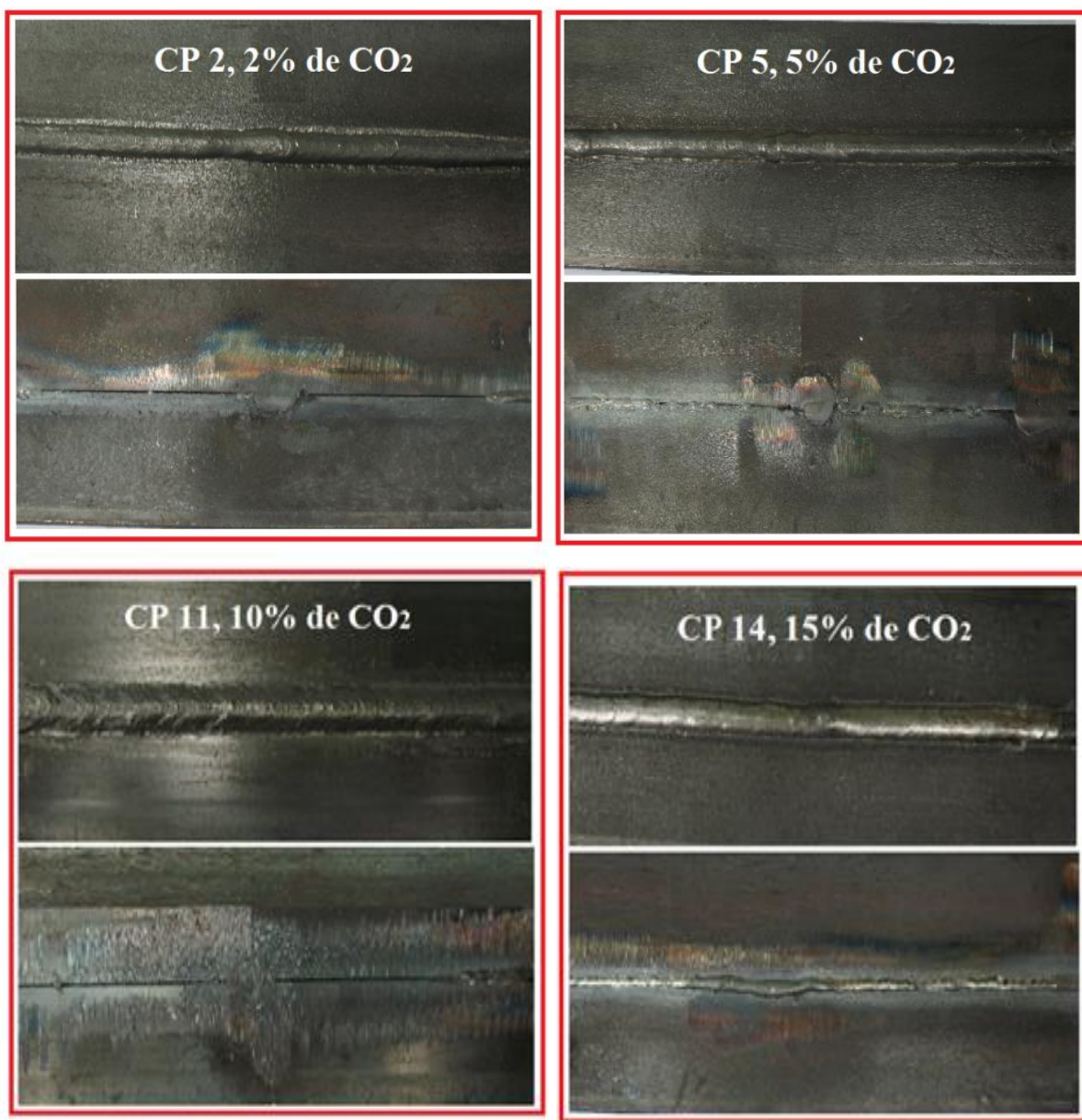




Figura 4.16 – Cordões de solda e suas raízes obtidos usando misturas com diferentes teores de CO₂

4.2.5. Geometria dos cordões

Segundo o Item 3.5.4, a análise de geometria do cordão é uma das etapas fundamentais, pois normalmente a qualidade da soldagem é avaliada por formação do

cordão mesmo. Analisando superficialmente a geometria dos cordões, ainda pela Figura 4.16 (aparência dos cordões), é possível observar que as larguras dos cordões tendem a aumentar com o aumento de porcentagem de CO₂ na mistura e, também, que a partir de 15% de CO₂ as raízes começam apresentar a penetração total da solda. Para avaliar melhor a geometria dos cordões produzidos, a Figura 4.17 apresenta 9 seções transversais dos cordões obtidos usando misturas diferentes de Ar+CO₂.

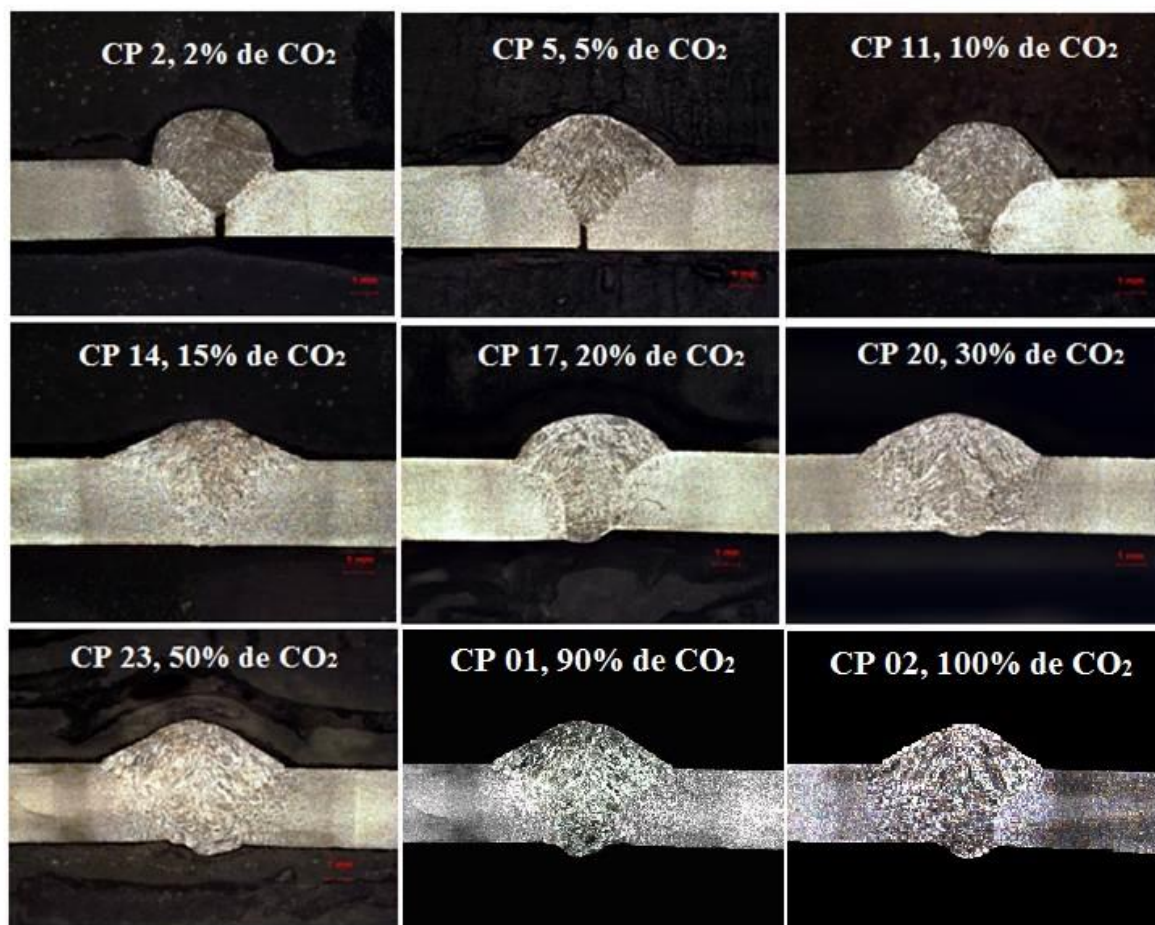


Figura 4.17 – Seções transversais dos cordões obtidos usando as misturas diferentes de CO₂ e Ar

A Tabela 4.8 apresenta numericamente e as Figuras 4.18 e 4.19 visualizam as medidas geométricas dos cordões de solda e a mudança destas dependendo do teor de CO₂ na atmosfera protetora.

Tabela 4.8 – Geometria do cordão em função do teor de CO₂ no gás de proteção

Teor de CO ₂	Área Fundida	σ	Penetração (mm)	σ	Largura (mm)	σ	Reforço (mm)	σ	Índice de convexi
-------------------------	--------------	----------	-----------------	----------	--------------	----------	--------------	----------	-------------------

(%)	(mm ²)								dade
2	3.12	0.1	1.47	0.18	4.3	0.1	2.1	0.08	0.49
5	5.18	0.1	2.08	0.12	5.6	0.1	1.8	0.07	0.32
10	5.13	0.0	2.65	0.09	5.5	0.2	1.8	0.05	0.33
15	7.09	0.1	2.97	0.20	6.2	0.1	1.6	0.04	0.26
20	7.18	0.0	3.12	0.05	6.5	0.0	1.6	0.02	0.25
30	8.52	0.1	3.14	0.04	7.0	0.1	1.5	0.02	0.21
50	9.09	0.1	3.22	0.10	7.2	0.0	1.4	0.04	0.19
90	9.18	0.1	3.22	0.06	7.1	0.1	1.2	0.05	0.17
100	9.23	0.0	3.24	0.05	7.3	0.0	1.2	0.02	0.16

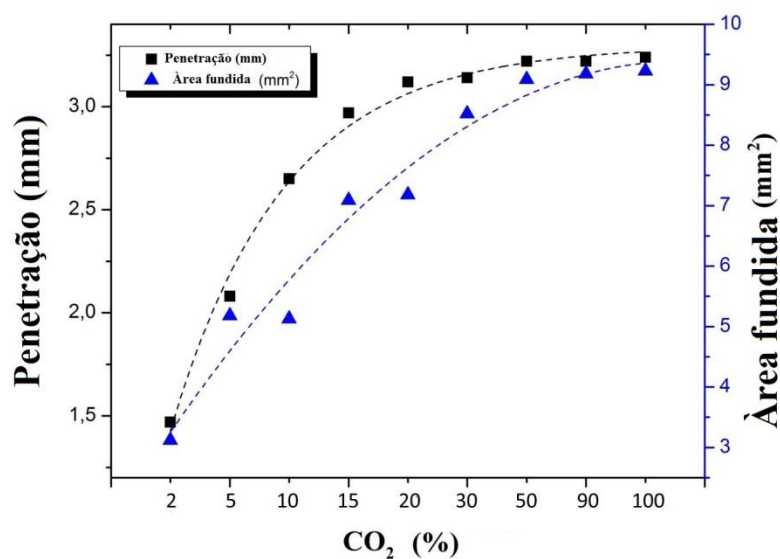


Figura 4.18 – Penetração e área fundida do cordão em função do teor de CO₂ no gás de proteção

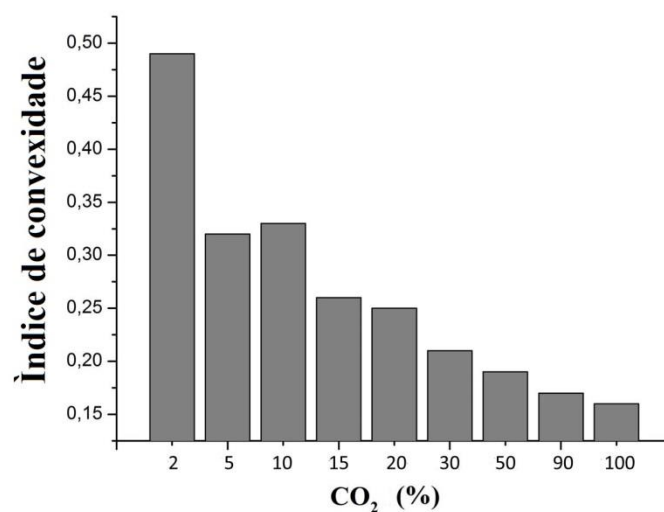


Figura 4.19 – Índice de convexidade do cordão em função do teor de CO₂ no gás de proteção

Os dados obtidos e visualizados nas figuras anteriores mostram que com aumento do teor de CO_2 no gás de proteção a penetração dos cordões aumenta. Provavelmente, responsável por esse fenômeno é o aumento da tensão acompanhando o crescimento de percentagem de CO_2 , o que, por sua vez, aumenta a potência do arco (lembrando, que a corrente e velocidade de soldagem permaneceram constantes para todos os testes). Além disso, aumento da capacidade de troca de calor do gás de proteção por conta de CO_2 e o crescimento do tamanho das gotas observado anteriormente (que intensifica o momentum da gota em transferência), também poderiam ser as justificativas do aumento de penetração.

Além disso, pode-se observar, que com aumento de CO_2 na mistura do gás de proteção, a área fundida apresenta tendência de crescimento, acompanhando o comportamento da penetração. As explicações disto são dadas anteriormente.

Por sua vez, o reforço e largura, de uma forma geral, apresentam as tendências de comportamento correspondentes, ou seja, quando a quantidade de CO_2 na mistura com Ar aumenta, a largura aumenta e reforço diminui, refletindo assim na diminuição do índice de convexidade. Isso pode ser explicado de maneira seguinte: como o consumo foi mantido constante devido à velocidade de alimentação e a corrente constantes, a largura do cordão para aumentar teria de fazer o reforço diminuir, resultando assim o melhor espalhamento do metal líquido no material de base. Melhor espalhamento ocorre devido o aumento de molhabilidade do metal líquido com adição de maiores teores de CO_2 .

CAPÍTULO V

ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

No análise geral dos resultados obtidos no presente trabalho procurou-se determinar a melhor faixa do teor de CO₂ no gás de proteção à base de Ar para soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito considerando todos os critérios de avaliação e tentar explicar a correlação entre a mudança desta variável e os fenômenos observados nas filmagens. Com essa finalidade, para cada critério de avaliação (índice de regularidade da transferência metálica, rendimento de deposição, aparência e geometria dos cordões) foram indicadas as melhores porcentagens de CO₂.

Os resultados do índice e rendimento podem ser considerados junto, pois um corresponde o outro. Os dados destes critérios, ilustrados na Fig. 5.1, mostram que a faixa aceitável da quantidade de respingos e índice de regularidade da transferência metálica é atingida nas soldagens com 2-20% de CO₂ no gás de proteção. Pior regularidade da transferência metálica foi observada no caso da presença de 50, 90 e 100% de CO₂ na mistura e maior geração dos respingos no caso de 90% e 100%.

Quando a aparência (Fig. 4.16) pode dizer que as melhores soldas do ponto de vista estético são feitas com 10-20% de CO₂ na mistura. Esta faixa foi determinada com justificativa que os cordões feitos com 2 e 5 % de CO₂ parecem a ser muito finos, e a partir de 30% de CO₂ os cordões saíram muito desiguais.

Os resultados de análise da geometria mostram que a melhor relação entre penetração, largura e reforço também foi conseguida no caso de soldagem com teor de CO₂ na faixa de 10-20%. Como pode ser observado na Fig. 4.17, as menores porcentagens resultaram em maior convexidade e falta de penetração e as maiores em cordões muito largos com excesso de penetração.

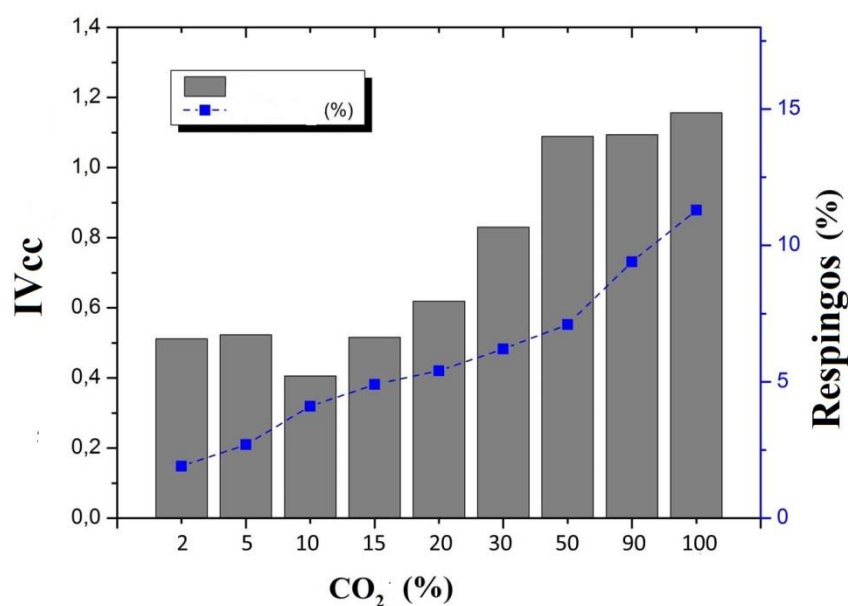


Figura 5.1 – Geração de respingos e índice de regularidade da transferência metálica em função do teor de CO_2 no gás de proteção (quanto menor é o índice melhor é a regularidade da transferência e estabilidade do processo)

Dessa forma, considerado todos os critérios de avaliação e tomando em conta os requerimentos para um produto final é possível determinar a mistura de $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ adequada para uma dada aplicação. Por exemplo, se penetração total e aparência boa da solda final são requeridos, dentro da faixa aceitável do teor de CO_2 no gás de proteção do ponto de vista de geração dos respingos e regularidade da transferência metálica podem ser escolhidos as misturas 10% $\text{CO}_2 + 90\%\text{Ar}$, 15% $\text{CO}_2 + 85\%\text{Ar}$, 20% $\text{CO}_2 + 80\%\text{Ar}$. Se a penetração total não é necessário e cordão mais fino é requerido as misturas 2% $\text{CO}_2 + 98\%\text{Ar}$ e 5% $\text{CO}_2 + 95\%\text{Ar}$ podem ser usada para soldagem.

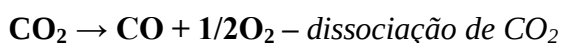
Agora voltando aos resultados obtidos e tomando em conta aspecto econômico uma explicação pode ser dada para um fato que a mistura $\text{Ar} + \text{CO}_2$ mais usada para soldar o aço carbônico é com CO_2 por volta de 20%. Pode ser que utilização desta mistura no mesmo tempo possui o limite aceitável da estabilidade do processo e geração dos respingos, assim como resulta em parâmetros geométricos adequados, e apresenta o custo reduzido de consumíveis e, conseqüentemente, do procedimento de soldagem.

Então, como no ambiente industrial o produto final além da qualidade é avaliado por custo de sua fabricação um balanço deve ser procurado entre aspectos econômicos (melhor rendimento de deposição que também envolve gastos de limpeza posterior das

peças soldadas para tirar os respingos, mistura de CO₂ e Ar menos cara) e parâmetros geométricos e aspecto visual da solda adequados.

Deterioração do índice de estabilidade, incremento de quantidade de respingos, formação do cordão desigual com aumento de CO₂ no gás de proteção são relacionados, como mostram as filmagens, com alterações na regularidade e estabilidade da transferência metálica. A transferência metálica piora principalmente por a causa dos curtos circuitos instantâneos e desvio da gota do eixo de eletrodo. Estes fenômenos podem ter uma origem ou um ser o resultado do outro, pois como foi observado, normalmente o curto-circuito instantâneo ocorre quando a gota desviada tem a área de contato com a poça de fusão não suficiente para formar o menisco e fornecer a transferência por força de tensão superficial. O desvio da gota na ponta do eletrodo pode ser explicado com algumas hipóteses a seguir:

- a pressão dos gases na gota aumenta devido o aumento de seu volume molar. Ou seja:



$$22,26 \text{ l/mol} \rightarrow 22,40 \text{ l/mol} + 1/2 \cdot 22,39 \text{ l/mol}$$

- a força de vaporização que age na gota aumenta devido os vapores metálicos e/ou reações químicas;
- a tensão superficial do metal líquido da gota aumenta devido o aumento do teor de CO₂ no gás de proteção, conforme Scotti e Ponomarev (2008). Esta hipótese é confirmada com os resultados obtidos nesse trabalho em relação de aumento do tamanho da gota com aumento de porcentagem de CO₂ na mistura com Ar. E para segurar este volume de metal líquido em forma de esfera, a força de tensão superficial conduz o movimento para a gota, que faz a desviar;
- por a causa das altas temperaturas e, conseqüentemente, dissociação de CO₂ ocorre segregação dos gases devido a sua densidade, ou seja, em torno da gota em formação há três gases CO, O₂ e Ar e mais perto dela ficará o gás com menor densidade, ou seja, o CO. De acordo com isso pode supor que a gota não tem contato com O₂, que segundo muitas fontes diminui a tensão superficial do metal líquido. Então realmente pode supor que a tensão superficial da gota pode se aumentar.

As hipóteses propostas ainda precisam confirmação que pode fazer uma parte dos trabalhos futuros.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

Nas condições deste trabalho, usando o processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito, considerando a soldagem na posição plana de junta em I com folga, com corpo de prova e arames de aço carbono, fonte de tensão constante, indutância fixa, mantendo dada velocidade de soldagem e velocidade de alimentação, e tomando sempre como base a condição de soldagem com comprimento de arco (tensão) que fornece a transferência metálica mais estável, pode-se concluir que o aumento do teor de CO₂, na faixa de 2 até 100%, na mistura com Ar:

- Piora a regularidade da transferência metálica e estabilidade do processo de soldagem;
- Aumenta a quantidade dos curtos-circuitos instantâneos, ou seja, curtos-circuitos sem transferência da gota (ou com transferência parcial) para a poça de fusão;
- Aumenta a quantidade de respingos e, como consequência, diminui o rendimento de deposição e, além disto, dificulta a limpeza dos respingos colados no corpo de prova;
- Piora a igualdade e regularidade de acabamento do cordão de solda o que resulta em deterioração da aparência do produto final de soldagem;
- Aumenta o volume da gota no momento de transferência, o que resulta em diminuição da frequência de seu destacamento;
- Aumenta a penetração do cordão de solda (exceto o caso de soldagem com CO₂ puro quando a penetração diminuiu até o nível de 5% de CO₂);
- Aumenta a largura do cordão de solda;
- Diminui reforço e convexidade do cordão de solda;

- Aumenta a área fundida e diminui área adicionada do cordão de solda (exceto o caso de soldagem com CO_2 puro quando a área fundida diminuiu e área adicionada aumenta);

CAPÍTULO VII

TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho de mestrado foram conseguidos dados quantificados da influência do teor de CO_2 na mistura com Ar sobre a regularidade da transferência metálica do processo MIG/MAG operando em curtos-circuitos e também foi determinada uma faixa de percentagem de CO_2 que fornece o melhor efeito sobre a regularidade da transferência, aparência e geometria do cordão e geração de respingos. Portanto, alguns assuntos ainda ficaram sem esclarecimentos. Trabalhos futuros poderiam ser feitos com intuito de entender melhor e explicar alguns fenômenos observados em relação a influencia do teor de CO_2 na estabilidade do processo de soldagem. Entre esses novos trabalhos, estariam os seguintes:

- Elaborar uma técnica de medição da tensão superficial na qual ajudará verificar se aumento do teor de CO_2 na mistura com Ar aumentará ou diminuirá a tensão superficial do material líquido na região de soldagem (da gota e da poça de fusão);
- Investigar a fundo o fenômeno de deslocamento da gota do eixo do eletrodo e procurar as técnicas para diminuir-lo;
- Realizar uma análise de aspecto econômico dos resultados obtidos no trabalho presente de mestrado, ou seja, verificar se a utilização das misturas das quais foram aplicadas durante as soldagens com melhores indicadores de estabilidade (transferência metálica regular, igual formação de cordão, geração reduzida dos respingos, etc.) é adequada para a soldagem no meio industrial do ponto de vista econômico;
- Estudar as propriedades dos gases (Ar, CO_2 , He, O_2) sob as condições de soldagem com finalidade de confirmar ou desmentir as hipóteses propostas;

- Investigar as alterações das quais a mudança de gás altera na tensão superficial da gota em formação e na poça de fusão;
- Realizar o mesmo estudo para a faixa da corrente de soldagem mais adequada com finalidade de verificar se o efeito da mudança de porcentagem de CO₂ na atmosfera protetora será o mesmo;
- Verificar se a variação da vazão de gás dará quaisquer alterações nos resultados obtidos;

Dessa forma, espera-se que os conhecimentos mais profundos dos assuntos descritos pudessem ajudar não só a entender melhor a física do processo MIG/MAG e a influência dos gases de proteção nela, mas também a resolver tecnologicamente muitos problemas, tais como a falta de fusão, excesso de respingos, formação irregular de cordão, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, D.J., & DENGAN, G., “An investigation of fusion quality in conventional MIG, Synergic pulsed MIG, Flux cored arc and Manual metal arc welding”, Conf. Proceedings of EUROJOIN 2, May 1994, p. 191-202.

ALUM, C.J., & QUINTINO L., “Control of fusion characteristics in pulsed current GMAW”, IIW Doc. 212-582-84.

ASM, *ASM Handbook: Welding, Brazing and Soldering*, vol. 6, ASM International USA, 1993.

AWS, *Standard Welding: terms and Definitions*, Standard AWS A3.0:2001, Jul 2001.

AWS, *Welding Handbook - Volume 1: Welding Technology*, American Welding Society, USA, pp. 50-53, 1981.

BAIXO, C.E.I. & DUTRA, J.C., *Effect of shielding gas and transfer mode on the application of 625 alloy in carbon steel*, Soldagem & Inspeção, vol. 14 (4), Oct/Dec 2009, pp.21-24

BLESS, S.J., “Drop transfer in short-circuit welding”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 7, 1974, p. 526-539.

BOO, K.S. & CHO, H.S., “Determination of a Temperature Sensor Location for Monitoring Weld Pool Sizes in GMAW”, *Welding Journal*, vol. 73(11), November 1994, p. 265-271.

CHEN, Y.W., DUNNE, D., NORRISH, J., & SZALLA, J., “Microstructure and mechanical properties of GMA welded Zinalume G550 sheet steel”, *Australasian Welding Journal*, vol. 45, Fourth Quarter 2000, p. 39-47.

DEAM, R., “Weld pool frequency: A new way to define a weld procedure”, Conference Proceedings, 2nd International Conference on Trends in Welding Research, May 1989, Gatlinburg USA, ASM International, p. 967-971.

DEAN., G., NORRISH, J., & COOK, C., “Fusion Control in Dip Transfer GMAW”, Proc. WTIA 48th Annual & IIW Asian pacific International Conference, paper 28, Melbourne Australia, october 2000.

ESSERS, W.G. & WALTER, R., “Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA

and Plasma-GMA Welding”, *Welding Journal*, vol. 60 (2), Feb. 1981, p. 37s-42s.

GARY, D., “Optimization of Metal Transfer and Fusion using Current Control in Dip Transfer GMAW”, PhD thesis, University of Wollongong, 2003.

GUPTA, S.R., GUPTA, P.C., & REHFELDT, D. “Process Stability and Spatter Generation during Dip Transfer in MAG Welding”, *Welding Review*, November 1988, p. 232-241.

HAIDAR, J.; LOWKE, J.J., “Effect of CO₂ Shielding Gas on Metal Droplet Formation in Arc Welding”. *Appl. Phys.*, vol. 25, October 1997.

HERMANS, M.J.M. & den OUDEN, G., Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, vol.78 (4), April, 1999, pp. 137-141.

HERNANS, M.J.M., SPIKES, M.P., & DEN OUDEN, G. “Characteristic features of the short circuiting arc welding process”, *Welding Review International*, May, 1993, pp. 80-86.

JACOBSEN, N., *Monopulse investigation of drop detachment in pulsed gas metal arc welding*, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 25 (5), 1992, p. 783, doi:10.1088/0022-3727/25/5/007

JEFFUS, L., *Welding: Principles and Applications*, 5th edition, Thomson Delmar Learning, NY, 2004, pp. 253-255.

JONSSON, P.G., MURPHY, A.B. & SZEKELY, J., A. “Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Processes”, *Welding Research Supplement – Welding Journal*, fevereiro de 1995, pp. 48-58.

KAHOVSKY, N., *Electrodugovaya svarka staley*. Kiev, 1975.

KANG, M.J. & RHEE, S., “The statistical models for estimating the amount of spatter in the short-circuiting transfer mode of GMAW”, *Welding Journal*, vol. 80 (1), January 2001, p. 1-8s.

KIM Y-S.& EAGAR T. W., *Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding*, *Welding Journal*, vol. 72 (1), June, 1993, pp. 269-278.

KIYOHARA, M., OKADA. T, & YAMAMOTO, H., “On the Stability of Metal Transfer in Short-circuiting Arc Welding and the New Control Systems”, IIW Doc. 212-276-73.

KLARIC, S., SAMARDZIC, I., KLADARIC, I, *MAG Welding Process – Analysis of Welding Parameter Influence on Joint Geometry*, 12th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", Istanbul, Turkey, University of Zenica, 26-30 August, 2008, pp. 185-188

LANCASTER, J. F., “The Physics of spatter formation during dip transfer GMAW”, IIW Doc. 212-738-89.

- LANCASTER, J. F., *Metallurgy of Welding*, 5th ed., Chapman & Hall, London 1993.
- LEBEDEV, V.K., ZARUBA, I.I., & ANDREEV V.V., “Conditions of the formation of a liquid bridge in the droplet transfer of metal with short-circuiting of the arc gap”, *Automatic Welding*, vol. 28(9), 1975, p.1-3.
- MARQUES, P. V., MODENESI, P. J. e BRACARENSE, A. Q. *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007. 2 ed. 263p.
- MENESES, V.A., GOMES, J.F.P., SCOTTI, A., *The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in Short-Circuit MAG Welding*, *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (2014), pp. 1388-1397, doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.02.012
- MENESES, V.A., SCOTTI, A., *Governing Parameters Affecting Fume Generation in Short-Circuit MAG Welding*, *Welding in the World*, 58 (3), 2014, pp. 367-376, ISSN 0043-2288, DOI: 10.1007/s40194-014-0122-2
- MODENESI, P., *Introdução á Física do arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. BH, 2009.
- MURRAY, P.E. & SCOTTI, A., “Depth of penetration in GMAW”, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 4, November 1999.
- MURRAY, P.E. & SCOTTI, A., *Depth of penetration in GMAW*, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 4 (2), March, 1999, pp. 112-117.
- NIKOLAEV, G., *Svarka v Mashinostrojenii*. Mashinostrojenie, Moscow, 1978, p.165.
- NORRISH, J., *Advanced Welding Processes*, IOP Publishing Ltd., Londres, 1992, p. 325.
- PONOMAREV, V., MIRANDA, H. C., FERRARESI, V.A. & SCOTTI A., “Optimisation of MAG-CO₂ Welding Metal Short-circuiting Metal Transfer”, *Journal for the Joining of Materials*, vol. 16, no. 2, Jun 2004, Institute for Joining Materials (JOM), Denmark, pp. 43-48.
- RENWICK, R.J., & RICHARDSON, R.W., “Experimental Investigation of GTA Weld Pool Oscillation”, *Welding Journal*, vol. 62(2), February 1983, p. 29s-35s.
- REZENDE G.M. C., LISKEVYCH, O., VILARINHO O, L. O., and SCOTTI, A., *A criterion to determine voltage setting in short-circuit GMAW*, *Soldagem & Inspeção*, vol. 16 (2), Apr/Jun 2011, pp. 98-103 (in Portuguese).
- RHEE, S. & KANNATEY-ASIBU, E., *Observation of metal transfer during gas metal arc-welding*, *Welding Journal*, vol. 71 (3), 1992, p. 381.
- ROSENTHAL, D. “Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting”, *Welding Journal*, vol. 20 (5), May 1941, p. 220s-234s.

SCOTTI, A. & PONOMAREV, V., *MIG/MAG Welding: better understanding, higher performance*, Artliber Editora Ltda, SP, 2008, pp.153-155.

SCOTTI, A. & RODRIGUES, C.E.A.L., *Determination of momentum as a mean of quantifying the mechanical energy delivered by droplets during MIG/MAG welding*", Eur. Phys. J. AP, vol.45(1), Jan 2009, p. 11201, DOI: 10.1051/epjap:2008196.

SCOTTI, A., Mapping the Transfer Modes for Stainless Steel GMAW, *J. of Science and Technology of Welding and Joining*, Institute of Materials Publ, UK, Vol.5, No.4, 2000, pp. 227-234 (ISSN 1362-1718).

SODERSTROM, E. & MENDEZ, P.F., "Metal Transfer during GMAW with thin electrodes". *Welding Journal*, vol. 87 (5), May, 2008, pp. 124s-133.

STAPPON, G.W.F. & LYTTLE, K.A., *7 effects of shielding gas*, Practical Welding Today, 9 Jan., 2007, <http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/7-effects-of-shielding-gas>.

STENBACKA, N.; PERSSON, K. A. "Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding". *Welding Journal*. Volume 68, nº 11, p. 41-47, Nov. 1989.

XIAO., Y.H. & DEN OUDEN, G., "Weld Pool Oscillation during GTA Welding of Mild Steel", *Welding Journal*, vol. 72(8), August 1993, p. 428-434s.

ZIELINSKA, S., PELLERIN, K., DZIERZEGA, K., MUSIOL, F., VALENSIA, Ch. de IZARRA and BRIAND, F., *Gas influence on the arc shape in MIG–MAG welding*, Eur. Phys. J. AP, vol. 43 (1), July, 2008, pp. 111–122.

APÊNDICE A

CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Tensão de referência	Corrente de referência	Corrente Programa	Tensão Programa
10,05	118,8	1,67	0,93
9,96	118,7	1,69	0,93
21,7	117,8	1,68	2,03
35,75	195,3	2,73	3,33
26,73	145,7	2,05	2,49
23,51	127,7	1,81	2,19
14,75	78,6	1,15	1,37
31,8	173,9	2,43	2,97
51,5	157	2,4	4,83
40,15	193,8	2,72	3,75
44,1	212,4	2,97	4
48,3	233,3	3,26	4,52
48,1	230,7	3,24	4,5
46,4	253,5	3,52	4,31
47,1	257,2	3,6	4,41
40,86	273,4	3,82	3,8
44	293,3	4,1	4,1
-3,43	-21,8	-0,4	-0,31
-6	-48	-0,47	-0,56
-8,78	-59,7	-0,71	-0,84
-11,75	-79,4	-1	-1,11
-14,73	-98,4	-1,26	-1,39
-17,76	-118,5	-1,54	-1,68
-20,6	-137,8	-1,8	-1,95
-23,43	-157,3	-2,07	-2,21
-26,22	-176,5	-2,33	-2,47
-28,85	-194	-2,59	-2,73
-31,9	-213,9	-2,86	-3
-34,93	-233,9	-3,14	-3,29
-37,78	-252,6	-3,39	-3,56
-40,85	-272,5	-3,67	-3,85
-44	-293,8	-3,96	-4,15

