

DANIEL SOUZA

LEVANTAMENTO DE MAPAS OPERACIONAIS DE
TRANSFERÊNCIA METÁLICA PARA SOLDAGEM
MIG/MAG DE AÇO AO CARBONO NA POSIÇÃO PLANA



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2010

DANIEL SOUZA

LEVANTAMENTO DE MAPAS OPERACIONAIS DE TRANSFERÊNCIA
METÁLICA PARA SOLDAGEM MIG/MAG DE AÇO AO CARBONO NA
POSIÇÃO PLANA

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

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

- S729L Souza, Daniel, 1978-
Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana [manuscrito] / Daniel Souza. - 2010.
169 f. : il.
- Orientador: Américo Scotti.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Soldagem - Teses. I. Scotti, Américo, 1955- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.791

“... não são as respostas que movem o mundo, são as perguntas...”

*Campanha publicitária do Canal Futura
criada pela agência F/Nazca.*

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade da realização deste curso e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa Air Products do Brasil, nas pessoas de Flávio Keocheguerians e Vinicius Castanheira, pela colaboração no projeto e fornecimento de consumíveis, possibilitando um trabalho com parceria entre empresa e universidade.

Ao Prof. Américo Scotti pela orientação, ensinamentos, discussões e pela confiança depositada, ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho pelo auxílio em todo trabalho, em particular pela ajuda no desenvolvimento do índice de regularidade utilizado e ao Prof. Valtair Antonio Ferraresi pelas sugestões dadas ao trabalho e pela ajuda.

Aos alunos de engenharia elétrica Ricardo Lucas, pelo esforço empregado na construção da interface de aquisição de sinais e Thiago Larquer pela pronta ajuda na manutenção dos equipamentos eletrônicos quando necessário.

Ao amigo Marcelo Lemos Rossi pela indispensável parte de implementação dos programas para o cálculo do índice de estabilidade e de aquisição de dados, além da ajuda em toda parte experimental para levantamento dos mapas.

À Verônica de Lis Borges e Freitas pela grande ajuda empregada nos experimentos finais, tratamento dos dados e preparação metalográfica.

Ao Lazineiro pela confecção das placas de teste e ajuda dispensada em tudo em que foi solicitado.

E a todos os colegas de laboratório e em especial à Thonson Ferreira, Ruham Pablo Reis e Regina Paula Garcia pela disponibilidade em auxiliar nos experimentos.

SOUZA, D. **Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana.** 2010. 269 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

O processo de soldagem MIG/MAG é dos mais importantes processos de união de metais na atualidade. Isto se deve à sua alta capacidade de produção, característica constantemente cobijada pelas indústrias em seus processos de fabricação. Assim, devido à relevância desse processo, torna-se necessária a construção de ferramentas que auxiliem no entendimento do funcionamento do mesmo, principalmente no que se refere à correta regulagem dos parâmetros de soldagem. Uma ferramenta utilizada para isto são os mapas de transferência metálica, que a partir dos parâmetros de regulagem, prevêm como resposta o tipo de transferência metálica. Porém, estes mapas, da forma que são normalmente confeccionados, são de caráter mais científico do que prático. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi a confecção de mapas de transferência práticos que venham auxiliar os usuários de soldagem (soldadores, supervisores e engenheiros) na escolha da melhor regulagem em função de suas necessidades. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia que proporcionasse mais do que a informação sobre o tipo de transferência a partir da regulagem dos parâmetros. Nestes mapas propostos, objetivou-se obter uma região de transferência com característica operacional (transferência estável com condições de soldagem apropriadas) e também informações sobre o acabamento e perfil do cordão, rendimento de deposição, ciclo térmico e radiação emitida pelo arco. E para cada modo de transferência se procurou trabalhar apenas em condições típicas, o que fez com que a DBCP fosse diferenciada para dois modos principais de transferência (curto-circuito e goticular). Uma grande quantidade de experimentos foi realizada para mapear as transferências, com objetivo de delimitar uma região de estabilidade operacional de transferências por curto-circuito e outra goticular, utilizando o arame ER70S-6 e três gases de proteção para cada tipo de transferência. Após o levantamento, foram realizadas soldagens em pontos específicos dos mapas utilizando juntas ao invés de soldagem de cordão sobre chapa. Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta foi eficiente na determinação das regiões de estabilidade operacional. Mostraram também que o acabamento e a geometria do cordão, em geral, ficam melhores para regulagens dentro da região de estabilidade operacional, mas com resultados também dependentes do gás de proteção e tipo de transferência utilizada. Para regulagens fora da região de estabilidade operacional o acabamento piora, exceto para transferência goticular em regulagens abaixo da região. O rendimento de deposição é menor fora da região e com gases de proteção com maior teor de CO₂, exceto para transferência por curto-circuito, onde, regulagens acima desta região não causam prejuízo. A intensidade de radiação emitida pelo arco é menor abaixo da região e maior acima desta, sendo dependente principalmente do comprimento de arco. A mudança da DBCP e da indutância da fonte não mostraram influência sobre a região de estabilidade operacional, exceto para transferência por curto-circuito, onde a DBCP promove a diminuição da regulagem das tensões desta região.

Palavras Chave: MIG/MAG. Mapas Operacionais; Transferência Metálica. Radiação. Ciclo Térmico.

SOUZA, D. **Operational Mapping of Metal Transfers for Carbon Steel Gas Metal Arc Welding in Flat Position**. 2010. 269 f. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia.

Abstract

The MIG/MAG process is nowadays the most important welding process. This is due to its high production capacity, characteristic searched by industries to improve their manufacturing processes. Thus, due to this process relevance, development of tools that helps to understanding how it works comes out as necessary, especially in relation to proper welding setting up. One tool for this task is the transfer mode map, which predicts the type of metal transfer according to the welding setting up. However, these maps, normally, are more scientific oriented rather than for practical purposes. In this context, the objective of this work was to map the transfer modes in such a way that welders, supervisors and engineers could be helped in the choice of the best setting up needed. For this purpose, a methodology was developed to provide more information than transfer modes according to the parameter setting up. The proposed mapping had the intention of obtaining transfer regions with proper operating characteristics (stable transfer resulting of appropriate welding conditions) and also information about weld bead conditions, production, thermal cycle and arc radiation. For each transfer mode looked for working at typical welding conditions, which mean that the contact tip-to-work distance was different for the two main transfer modes (short-circuit and spray). A large number of experiments was performed to map the transfers, with the objective to determine a stable operating regions of short-circuit and spray transfer mode using the ER70S-6 welding wire with three different shielding gases. After mapping, single-welded butt joint were carried-out using specific points of the maps instead of bead-on-plate. The proposed methodology was efficient in exterminating regions of operational stability, according to the experiments. It was also possible to have better welding geometries, in general, for setting ups within the map region of operational stability, but the results also depend on the shielding gas and the transfer mode. For setting ups outside the map region of operational stability the bead finish gets worse, except for spray transfer mode when working below the region of operational stability. The deposition efficiency is lower for setting ups outside the region and with gases containing higher levels of CO₂, except for short-circuit transfer. The arc radiation intensity is lower in regions below the operational stability and higher above this position, but it is highly dependent of the arc length. Changes in the contact tip-to-work distance and/or in the power source inductance have no influence on the region of operational stability, except for short-circuit transfer, in which the contact tip-to-work distance is able to reduce the set voltage for this region.

Key Words: MIG/MAG. Operational Maps. Metal Transfer Modes. Radiation. Thermal Cycle.

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área da seção transversal do arame

a = comprimento de arco

Ar = Argônio

CCD = charge coupled device

CO_2 = Dióxido de Carbono

DBCP = Distância Bico de Contato Peça

d_e = diâmetro do eletrodo

d_g = diâmetro da gota

di/dt = taxa de variação da corrente

E = energia de soldagem

F_{cc} = frequência de curto-circuito medida

F_{cc}^* = Frequência de curto-circuito excluindo-se os curtos incipientes

F_{corte} = Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota para Transferência por Curto-Circuito

I = corrente de soldagem

I_m = corrente média

IV_{cc} = Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito

l = comprimento energizado do eletrodo

m_d = massa depositada

m_f = massa de arame fundido

n = número de amostras da aquisição

n_d = rendimento de deposição

O_2 = Oxigênio

P = potência de soldagem

$P_{instRMS}$ = Potência Instantânea RMS

t = tempo

$T_{8/5}$ = taxa de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500 °C

t_{ab} = média do tempo de arco aberto

t_{cc} = média do tempo de curto-circuito

U = tensão de soldagem

U_m = tensão média

UV = Ultravioleta

UV-A = Ultravioleta próximo ou luz negra

UV-B = Ultravioleta intermediário

UV-C = Ultravioleta remoto ou germicida

V_{lim} = velocidade de alimentação

V_{sold} = velocidade de soldagem

ρ = densidade

σ_{tab} = desvio padrão da média do tempo de arco aberto

σ_{tcc} = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	001
------------------	-----

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	005
-----------------------------	-----

2.1. Modos de Transferência Metálica	005
--	-----

2.1.1. Transferência por Curto-Circuito	006
---	-----

2.1.2. Transferência Globular	010
-------------------------------------	-----

2.1.3. Transferência Goticular	011
--------------------------------------	-----

2.1.4. Transferência Rotacional	017
---------------------------------------	-----

2.2. Avaliação Quantitativa da Estabilidade da Transferência por Curto-Circuito	017
---	-----

2.3. Mapas de Transferência Metálica	019
--	-----

2.3. Consumo	024
--------------------	-----

2.3.1. Calor Gerado no Eletrodo por Efeito Joule	025
--	-----

2.3.2. Calor Gerado na Conexão Arco-Eletrodo	028
--	-----

2.3.3. Calor Proveniente da Coluna de Plasma e da Poça de Fusão	035
---	-----

2.3.4. A Equação do Consumo	037
-----------------------------------	-----

2.4. Gases de Proteção	038
------------------------------	-----

2.4.1. Propriedades dos Gases	039
-------------------------------------	-----

2.4.2. Argônio (Ar)	042
---------------------------	-----

2.4.3. Dióxido de Carbono (CO ₂)	042
--	-----

2.4.4. Hélio (He)	043
-------------------------	-----

2.4.5. Argônio-Oxigênio	043
-------------------------------	-----

2.4.6. Argônio-Dióxido de Carbono	043
---	-----

2.5. Espectroscopia de Emissão	047
2.5.1. <i>Plasma</i>	047
2.5.2. <i>Princípio da Espectroscopia de Emissão</i>	048
2.5.3. <i>Espectroscopia na Soldagem</i>	049
2.5.4. <i>Efeito da Radiação no Corpo Humano</i>	052
2.6. Ciclo Térmico	053
 CAPÍTULO III	
METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	057
3.1. Descrição do Mapa Operacional de Transferência Metálica como Proposto	057
3.2. Premissas para Desenvolvimento dos Mapas	057
3.3. Estabelecimento e Procedimentos para Viabilização das Premissas do Trabalho	058
3.3.1. <i>Modo de Operação da Fonte em Tensão Constante</i>	058
3.3.2. <i>Juntas ao invés de Soldas de Simples Deposição sobre Chapa e Seleção de Espessura de Chapas Adequadas para Cada Tipo de Transferência</i>	059
3.3.3. <i>Gases de Proteção Utilizados na Prática e Adequado ao Tipo de Transferência</i>	059
3.3.4. <i>Ângulo da Tocha Usado na Prática para cada Espessura de Chapa</i>	059
3.3.5. <i>Criação de Mapas Específicos para Transferências por Curto-Circuito e Goticular</i>	060
3.3.6. <i>Utilização da Mesma Quantidade de Material Depositado por Unidade de Comprimento para um Dado Modo de Transferência</i>	060
3.4. Etapas para Confecção dos Mapas Operacionais de Transferência	061
3.4.1. <i>Etapas de Confecção do Mapa Operacional de Transferência por Curto-Circuito</i>	061

3.4.2. Etapas de Confecção de Mecanismos Complementares do Mapa Operacional de Transferência por Curto-Circuito	065
3.4.3. Etapas de Confecção do Mapa Operacional de Transferência Goticular	066
3.4.4. Etapas de Confecção de Mapas Complementares de Transferência Goticular	068
3.5. Bancada Experimental	069
3.5.1. Fonte de Soldagem e Alimentador de Arames	070
3.5.2. Sistema de Translação da Tocha (Robô)	070
3.5.3. Tocha	070
3.5.4. Placas de Teste	071
3.5.5. Suporte de Fixação das Placas de Teste	073
3.5.6. Gases de Proteção e Arame-Eletrodo	074
3.6. Caracterização do Sistema de Medição	075
3.6.1. Placas de Aquisição	075
3.6.2. Espectrômetro	077
3.6.3. Termopar	078
3.6.4. Transdutores/Condicionadores de Sinal	078
3.6.5. Calibração dos Transdutores/Condicionadores de Sinais	084
3.6.6. Programa de Aquisição de Dados	087
CAPÍTULO IV	
LEVANTAMENTO DA REGIÃO DE TRANSFERÊNCIA DOS MAPAS OPERACIONAIS	089
4.1. Mapeamento do Modo de Transferência por Curto-Circuito	089
4.1.1. Determinação dos Valores de Velocidade de Alimentação para as Correntes Desejadas	090
4.1.2. Determinação das Tensões Mínimas e Máximas de Soldagem para cada Velocidade de Alimentação Determinada	090

4.1.3. Refino do Mapa Global	093
4.1.4. Levantamento da Região Estabilidade Operacional para Soldagem por Curto-Circuito	099
4.2. Mapeamento do Modo de Transferência Goticular	100
4.2.1. Determinação da Corrente de Transição	100
4.2.2. Determinação da Velocidade de Alimentação para Proporcionar a Corrente de 400 A	103
4.2.3. Escolha das Outras Velocidades de Alimentação para Completar o Mapa	103
4.2.4. Determinação das Tensões Mínimas e Máximas de Soldagem para cada Valor de Velocidade de Alimentação Determinado	104
4.2.5. Levantamento da Região Estabilidade Operacional para Soldagem no Modo Goticular	107
4.2.6. Determinação do Efeito da Tensão de Soldagem sobre o Valor da Corrente, para Mesma Velocidade de Alimentação, no Modo de Transferência Goticular	108
 CAPÍTULO V	
INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA BICO DE CONTATO-PEÇA (DBCP)	
SOBRE A REGIÃO DE ESTABILIDADE OPERACIONAL DOS MAPAS	
TRANSFERÊNCIA	112
5.1. Influência do Aumento da DBCP no Modo de Transferência por Curto-Circuito	112
5.2. Influência da Variação da DBCP no Modo de Transferência Goticular	117
 CAPÍTULO VI	
INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA INDUTÂNCIA SOBRE A REGIÃO DE	
ESTABILIDADE OPERACIONAL DO MAPA TRANSFERÊNCIA POR	
CURTO-CIRCUITO	121

6.1. Caracterização da Indutância do Equipamento de Soldagem	121
6.2. Influência da Variação das Taxas de Crescimento e Decrescimento da Corrente na Região de Estabilidade Operacional do Mapa de Transferência	128

CAPÍTULO VII

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS SOBRE A REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO NA REGIÃO OPERACIONAL	131
7.1. Influência da Tensão e Velocidade de Alimentação na Regularidade da Transferência por Curto-Circuito	132
7.2. Influência do Gás de Proteção na Regularidade da Transferência por Curto-Circuito	133
7.3. Influência da Indutância na Regularidade da Transferência por Curto-Circuito	135
7.3.1. <i>Correlação entre as Taxas de Crescimento e Decrescimento da Corrente e a Regularidade do Processo</i>	136
7.3.2. <i>Influência do Gás de Proteção na Correlação entre as Taxas de Crescimento e Decrescimento da Corrente e a Regularidade do Processo</i>	139

CAPÍTULO VIII

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE O ACABAMENTO E GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA APLICANDO OS MAPAS OPERACIONAIS	143
8.1. Influência da Regulagem da Tensão e Velocidade de Alimentação e do Tipo de Gás no Modo de Transferência por Curto-Circuito	145

8.2. Influência da Regulagem da Tensão e Velocidade de Alimentação e do Tipo de Gás no Modo de Transferência Goticular	157
--	-----

CAPÍTULO IX

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE O RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO APLICANDO OS MAPAS OPERACIONAIS	169
---	-----

9.1. Influência dos Parâmetros sobre o Rendimento de Deposição para o Modo de Transferência por Curto-Circuito	170
--	-----

9.2. Influência dos Parâmetros sobre o Rendimento de Deposição para o Modo de Transferência Goticular	173
---	-----

CAPÍTULO X

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE A INTENSIDADE DE RADIAÇÃO EMITIDA APLICANDO OS MAPAS OPERACIONAIS	177
---	-----

10.1. Influência dos Parâmetros sobre a Intensidade de Radiação Emitida para o Modo de Transferência por Curto-Circuito	180
---	-----

10.2. Influência dos Parâmetros sobre a Intensidade de Radiação Emitida para o Modo de Transferência Goticular	185
--	-----

CAPÍTULO XI

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE O CICLO TÉRMICO DE SOLDAGEM APLICANDO O MAPA OPERACIONAL DE TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO	191
--	-----

11.1. Influência dos Parâmetros sobre o Ciclo Térmico de Soldagem	193
---	-----

CAPÍTULO XII

DISCUSSÃO GERAL	201
-----------------------	-----

CAPÍTULO XIII

CONCLUSÕES	207
------------------	-----

CAPÍTULO XIV

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	211
--	-----

CAPÍTULO XV

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	213
----------------------------------	-----

ANEXO I	223
---------------	-----

APÊNDICE I	233
------------------	-----

APÊNDICE II	239
-------------------	-----

APÊNDICE III	247
--------------------	-----

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O processo de soldagem conhecido por MIG/MAG¹ pode ser descrito como um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um eletrodo nu consumível (continuamente adicionado) e proteção gasosa, para promover a união de metais através da fusão localizada e introdução de um metal de adição fundido, proveniente do eletrodo consumível. É um dos processos mais utilizados na indústria devido à sua alta capacidade de produção, a qual está associada principalmente a duas características do processo, a alimentação contínua de arame, que permite alto fator de trabalho, e o uso de uma alta densidade de corrente, que proporciona alta taxa de fusão. Devido à relevância deste processo, é de grande importância o pleno entendimento do seu funcionamento para proporcionar a sua correta utilização, que passa, indubitavelmente, pela compreensão de como a regulação dos parâmetros promove os diferentes modos de transferência metálica e modificam a estabilidade do arco que, por sua vez, determinam a aplicação do processo (no que diz respeito ao tipo de junta, espessura, posição de soldagem etc.) e afetam geometricamente e superficialmente o cordão de solda.

Existem no mercado várias soluções de equipamentos que diminuem a influência do soldador/operador na regulação das variáveis, operando a partir de controles eletrônicos, de forma a regular/ajustar os parâmetros automaticamente. Estes equipamentos, normalmente denominados sinérgicos, alcançam a estabilidade operacional da transferência metálica. Porém, tal facilidade tem um custo (estes equipamentos são mais onerosos do que os

¹ - MIG é o acrônimo oriundo da Inglaterra quando se utiliza gás inerte (Metal Inert Gas), enquanto MAG se refere ao processo quando se utiliza gás ativo (Metal Active Gas). Nos EUA este processo é referenciado como GMAW (Gas Metal Arc Welding).

2 Introdução

equipamentos ditos convencionais - fontes convencionais ou eletrônicas sem monitoramento e controle do arco). E é nesta característica que reside à importância da disseminação de metodologias que auxiliem os operadores na correta regulação manual do processo.

Uma das maneiras de se apresentar o efeito da regulação dos parâmetros sobre a estabilidade neste processo é através de mapas de transferência metálica, geralmente confeccionados e utilizados com fins didáticos e pesquisa. Nestes mapas, são mostradas as regiões em que acontece um determinado modo de transferência metálica para uma dada condição (material e diâmetro do arame, tipo de gás de proteção, DBCP, etc), em função de dois parâmetros de regulação mais comuns, como corrente e tensão ou velocidade de alimentação e tensão.

Estudos para mapeamento dos modos de transferência já foram realizados e seu número vem crescendo atualmente com o advento de técnicas de fotografia de alta velocidade. Um dos motivos para a relativa escassez destes mapas é justamente a necessidade da utilização de câmeras de alta velocidade para visualização da transferência metálica, que é uma técnica restrita devido ao alto custo dos equipamentos envolvidos.

Porém, estes mapas têm limitações, principalmente para serem usados no meio industrial. Por exemplo, estes mapas normalmente têm em comum a característica de varrer, em uma só representação gráfica, todas as regiões dos modos de transferência. Para isto, utilizam uma única condição de soldagem (como DBCP, gás de proteção e faixa de corrente), apesar de que na prática se usar condições diferentes para cada tipo de transferência almejada (esta característica, na verdade, deveria limitar o uso até para fins didáticos). Além disso, apresentam os modos de transferência normalmente em função da tensão e corrente. No entanto, ao usar fontes de soldagem operando em tensão constante (modo mais utilizado na prática), o operador regula a tensão e a velocidade de alimentação. Finalmente, mesmo existindo um tipo de transferência, não quer dizer que ela acontece em condições operacionalmente estáveis para o processo. Assim, estes mapas não representam um plano do envelope operacional do processo para a dada condição.

Complementando, a regulação dos parâmetros que determina as regiões de transferência afeta outros fatores importantes para a operacionalidade da soldagem. Por exemplo, a escolha do gás de proteção, entre outras coisas, afeta o ciclo térmico de soldagem. Outro parâmetro também afetado pela regulação e condições de soldagem é a emissão luminosa proveniente do arco, que está relacionada à segurança e saúde do operador/soldador.

Por isso, para se usar na prática os mapas de transferência, acredita-se que estes deveriam ser confeccionados individualmente por modo de transferência e ser apresentados em função da velocidade de alimentação e tensão de soldagem, sempre respeitando as condições de soldagem particulares de cada modo de transferência mapeado. Além disto, suas regiões delimitadas deveriam mostrar apenas regiões em que o processo é operacionalmente estável.

Desta forma, neste estudo foi proposta a confecção, de forma metodológica, de vários mapas para soldagem de aço comum ao carbono, cobrindo os gases de proteção e o arame mais utilizados na prática. Tais mapas visarão a aplicação prática, onde o operador (ou o técnico e o engenheiro de soldagem), a partir da escolha da regulagem de tensão e velocidade de alimentação, obtenha previamente como resposta, a melhor combinação de parâmetros regulados para o modo de transferência metálica desejado, mas usando-se condições de soldagem próprias para cada modo de transferência. Tais mapas devem suprir outras deficiências dos mapas tradicionais, como possibilitar ao usuário também verificar as modificações do ciclo térmico, geometria do cordão e intensidade e comprimento de onda emitido pelo arco em função da região do mapa. Por isto, os mapas gerados serão doravante denominados de **Mapas Operacionais de Transferência Metálica**. Objetiva-se, ao final, um atlas para auxiliar a regulagem de parâmetros pelos usuários de soldagem.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Modos de Transferência Metálica

Os modos de transferência metálica são, basicamente, os diferentes modos pelos quais a transferência de metal fundido ocorre da ponta do eletrodo para a poça de fusão. Segundo Kim e Eagar (1993), muitas variáveis operacionais afetam o modo de como o metal é transferido para a poça de fusão, como a corrente de soldagem, a composição do gás de proteção, a extensão energizada do eletrodo e a polaridade. Este grande número de variáveis operacionais afetando a transferência é responsável pela existência das variadas formas de transferência da gota. Deste modo, existem várias classificações para os modos de transferência. Por exemplo, Scotti (2000) cita e descreve os modos básicos de transferência, a saber, globular, curto-circuito, goticular, goticular com alongamento e rotacional. Mas descreve e demonstra, ainda, 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. Outros autores, como Ushio et al (1995) e Stenbacka e Person (1989) estudaram, além dos modos básicos, modos como globular repulsiva e explosiva. Ponomarev et al (2009) propuseram como forma de sistematizar todos estes modos uma classificação dos tipos de transferência em modos, grupos e classes (Fig. 2.1). De acordo com estes autores, “modos de transferência” seriam todas as maneiras pela qual a gota é transferida para a poça. São caracterizados pela repetição do processo no tempo. As “classes” englobariam os grupos e seriam divididas em natural, controlada e combinada. As classes natural e combinada se caracterizam pela ocorrência sem controle da fonte, enquanto a controlada pela imposição de controle feita pela fonte. A classe combinada se caracteriza pela

ocorrência de dois tipos de transferência periodicamente, ou seja, ocorre um tipo de transferência depois outro e volta ao primeiro tipo.

Assim, devido às diferentes classificações e propostas de alteração dos modos de transferência, se dará enfoque nesta revisão a quatro modos básicos de transferência metálica, sendo eles o modo por curto-circuito, globular, goticular e rotacional.

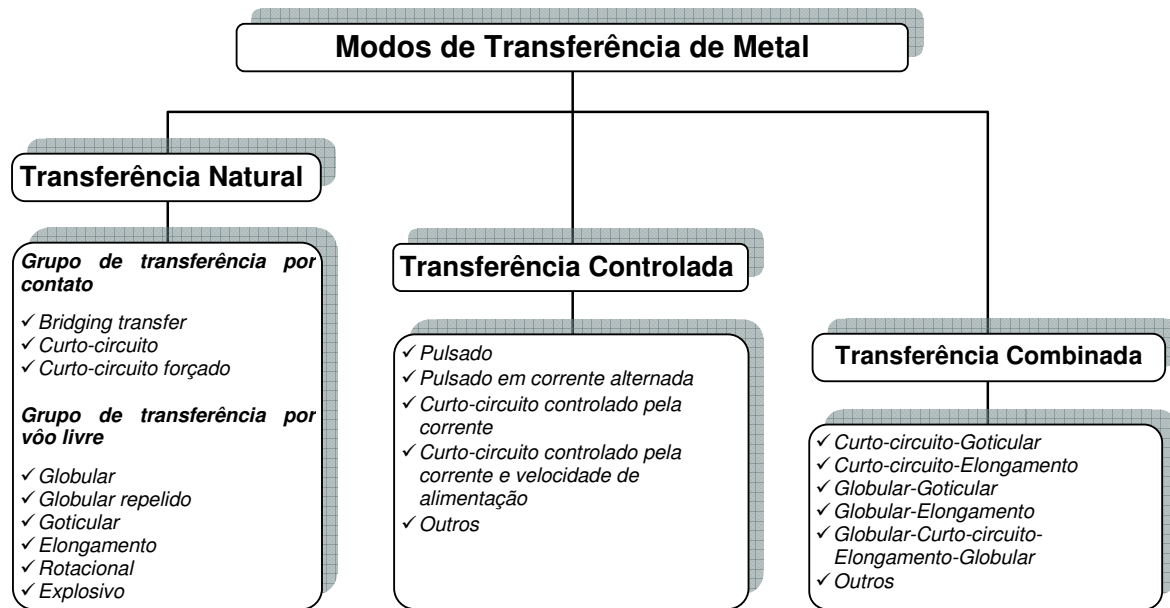


Figura 2.1 - Classificação dos modos de transferência metálica proposta por Ponomarev et al (2009)

2.1.1.1. *Transferência por Curto-Circuito*

Modo de transferência que tem sido descrito por muitos, que ocorre quando a velocidade de alimentação excede a velocidade de fusão do arame. Neste caso, as gotas tocam a poça de fusão antes de se destacar e a cada toque ocorre à extinção do arco e a gota é transferida por tensão superficial. Segundo Machado (1996), este modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação, sendo indicado para soldagem de seções finas em todas as posições. Segundo Gomes (2006), um ciclo completo de uma transferência por curto-circuito, mostrado na Fig. 2.2, passa pelas seguintes etapas:

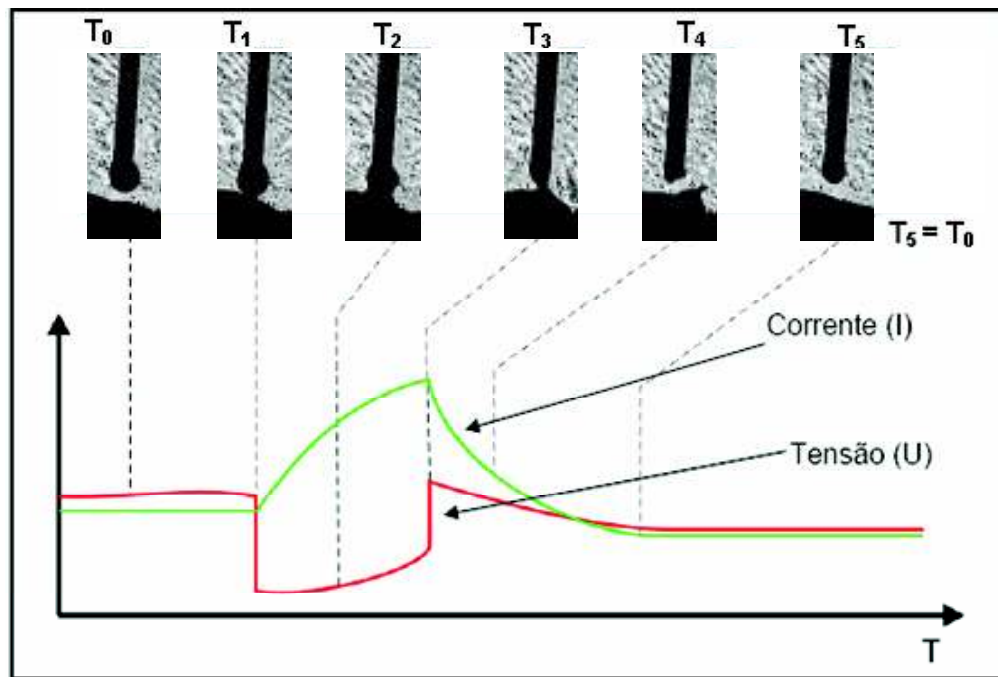


Figura 2.2 - Ciclo completo da transferência por curto-circuito (modificado GOMES, 2006)

- T_0 é a fase de formação e crescimento da gota na ponta do arame eletrodo. À medida que a gota é formada, o comprimento do arco diminui;
- Em T_1 , a gota formada toca a poça de fusão, a tensão cai bruscamente e a corrente aumenta a taxas elevadas;
- Em T_2 , parte da gota já foi transferida para a poça de fusão e uma ponte formada entre o eletrodo e a poça de fusão começa a se romper;
- Em T_3 ocorre o rompimento da ponte metálica e a tensão sobe caracterizando um pico de reignição. A corrente neste mesmo instante começa a cair para valores de regime;
- Em T_4 , a tensão e corrente decrescem para valores de regime e começa a formar uma nova gota na ponta do eletrodo;
- Em T_5 reinicia o ciclo de transferência metálica, ocorrendo o mesmo que em T_0 .

Em T_1 e T_2 , onde a corrente aumenta acentuadamente, ocorre o aumento da força eletromagnética sobre a gota (efeito “pinch”) e um maior aquecimento do eletrodo. Pela ação das forças “pinch” e tensão superficial, a gota é transferida para a poça de fusão. Se a corrente sobe a uma taxa muito elevada para um dado intervalo de tempo, a gota é transferida de forma brusca, gerando excessivos respingos, instabilidade do arco e aumento do custo da soldagem.

Outro tipo de transferência por curto-circuito é o chamado curto-circuito controlado (CCC). Neste, a transferência é eletronicamente controlada a partir de fontes de soldagem especiais que podem impor um controle de um ou mais parâmetros de soldagem com objetivo de amenizar os problemas causados pela transferência por curto-circuito. Como exemplo de um sistema que impõe tal controle, dentre tantos existentes, pode se citar o STT[®] (Surface Tension Transfer[®]) desenvolvido pela Lincoln Eletrics Company. A Fig. 2.3 apresenta a curva característica de corrente para este sistema. Resumidamente, tem-se em A a corrente de base para manter o arco aberto; em B a corrente é forçada cair rapidamente para provocar o curto-circuito; em C é aplicado um aumento de corrente denominado corrente de “pinch”, com a função de formar o pescoço na gota, que cresce até a iminência do rompimento; em D a corrente é levada a cair abruptamente, para que a transferência se dê em valores baixos de corrente e aconteça principalmente devido a força de tensão superficial entre a poça e a gota; e, em E, é aplicada a corrente de pico, que provoca a reignição do arco e depois ocorre à passagem da corrente de pico para a corrente de base, iniciando-se novamente o ciclo, através de um controle de descida da corrente chamado pelo fabricante de “tail-out”.

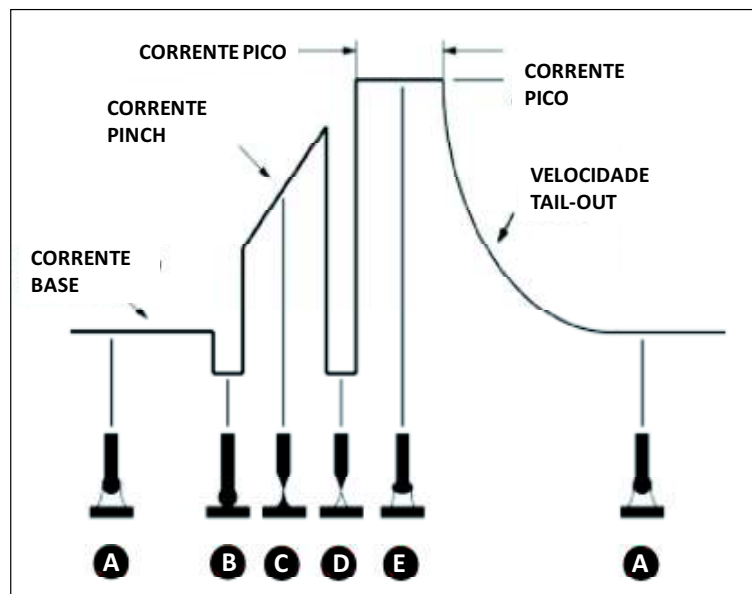


Figura 2.3 – Curva de corrente característica do processo STT[®] (adaptado de LINCOLN ELECTRIC, 2007)

O modo de transferência por curto-circuito é fortemente influenciado por algumas características do equipamento. A principal delas é a indutância. Indutância é uma

propriedade que o circuito elétrico possui de resistir à variação da corrente. Esta propriedade é de extrema importância para o processo MIG/MAG quando operando em curto-circuito, pois o efeito da indutância, que é a taxa de variação da corrente, afeta diretamente o efeito “pinch”. No processo por curto-circuito, a regularidade do processo de soldagem, bem como a formação de respingos estão fortemente relacionados à indutância de subida.

A indutância é uma propriedade de circuitos que possuem um indutor (ou qualquer outro elemento que atue da mesma forma). A variação da corrente no indutor provoca uma variação do campo magnético que é combatida com o aparecimento de uma corrente induzida no sentido de evitar a variação deste campo. Esta corrente induzida faz oposição à corrente do circuito e age no sentido de amortecer sua variação. Quanto maior o campo magnético gerado para uma dada variação da corrente, função do número de bobinas do indutor, maior a indutância e menor a taxa de variação da corrente.

Fontes convencionais de soldagem realizam o controle da indutância por meio de um indutor ligado em série com o arco. A variação na regulagem da indutância altera a quantidade de bobinas deste indutor. Com isto, modifica-se a quantidade de campo magnético que o indutor pode gerar e, conseqüentemente, sua capacidade de resistir mais ou menos à variação da corrente. Em fontes eletrônicas existe um circuito que simula o efeito do indutor, ou seja, age de forma a variar a taxa de subida e descida da corrente.

Em soldagem, não é possível regular o valor de indutância desejado na fonte, pois a indutância do sistema não depende só do circuito da fonte, mas também das condições de soldagem. Por este motivo, as fontes possuem regulagens de posições de indutância ou porcentagens de indutância máxima e não valores de indutância, por exemplo, em Henry. Então, a melhor forma de se fazer referência à indutância de um equipamento é pelo termo “efeito indutivo”, ou seja, pelas taxas de crescimento e decrescimento da corrente e não pela regulagem. A Fig. 2.4 e a Tab. 2.1 ilustram o efeito indutivo (di/dt) em função da posição regulagem da indutância para duas fontes diferentes, que possuem escalas díspares de regulagem. Observa-se que não só o valor de di/dt se torna diferente para uma mesma regulagem, mas também o gradiente de variação de di/dt . Isto suporta a idéia do uso do efeito indutivo e não do valor de indutância fornecido por diferentes equipamentos quando se quer comparar regulagens de parâmetros.

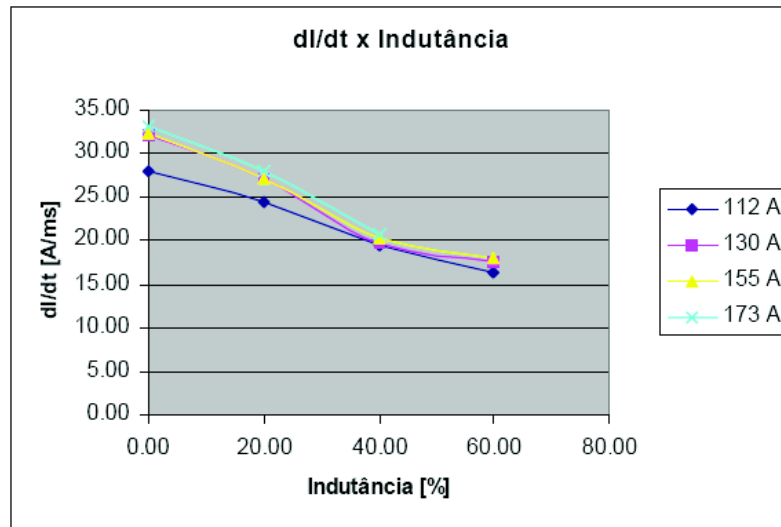


Figura 2.4 - Efeito da regulagem de indutância nas taxas de variação da corrente em função da corrente de soldagem, para uma fonte microprocessada multiprocesso da marca Miller, modelo MAXTRON 450, utilizando arame tubular E70C-6M de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Ar + 25%CO₂ (KOBAYASHI; ANASTÁCIO; NARDI, 2005)

Tabela 2.1 - Efeito da regulagem de indutância nas taxas de variação da corrente para uma fonte eletrônica multiprocesso (fabricante IMC, modelo Inversal 300), utilizando o arame-eletrodo ER 4043 de diâmetro de 1,0 mm e gás de proteção Ar puro (SILVA; FERRARESI, 2003)

Posição de regulagem da indutância	di/dt (A/ms)
0	136,08
2,5	34,34
5	26,49
7,5	18,68
10	14,52

2.1.2. Transferência Globular

Modo de transferência tradicionalmente caracterizado pela ausência de curtos-circuitos e pelo tamanho da gota exceder o diâmetro do arame antes do destacamento. Este tipo de transferência é limitado à posição plana de soldagem e esta limitação, somada à instabilidade e à geração excessiva de respingos, faz com que a transferência tipo globular seja pouco

desejada na soldagem. A Fig. 2.5 mostra uma seqüência de fotografias em alta velocidade ilustrando uma transferência do tipo globular.

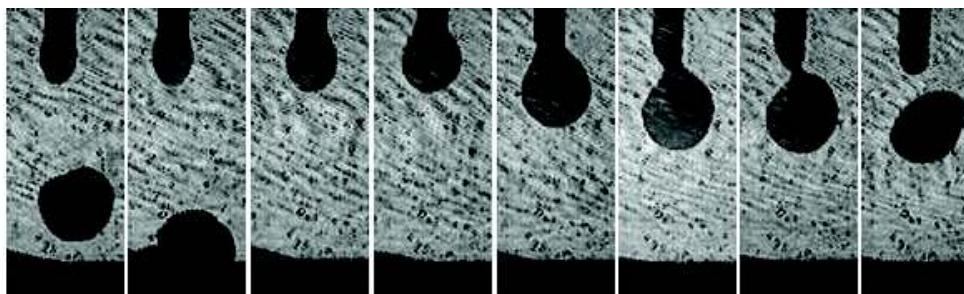


Figura 2.5 – Gotas durante a transferência no modo globular

Uma variante da transferência globular, também por outros autores classificada como outro modo de transferência metálica, é a transferência globular repulsiva. A Fig. 2.6 mostra uma seqüência de fotografias em alta velocidade de uma transferência repulsiva. Muito parecida com a transferência globular, difere pelo desvio da gota devido a forças de repulsão na mesma que podem ocorrer em função da polaridade ou gás de proteção utilizado. Segundo Ushio et al (1995) a utilização gases de proteção com mais de 10% de CO_2 na mistura causa repulsão nas gotas, criando tal modo de transferência. Ainda segundo Ushio et al (1995), resultados indicam que a introdução de CO_2 no gás de proteção aumenta a força no arco que age sobre a gota, no sentido de dificultar o destacamento da mesma.

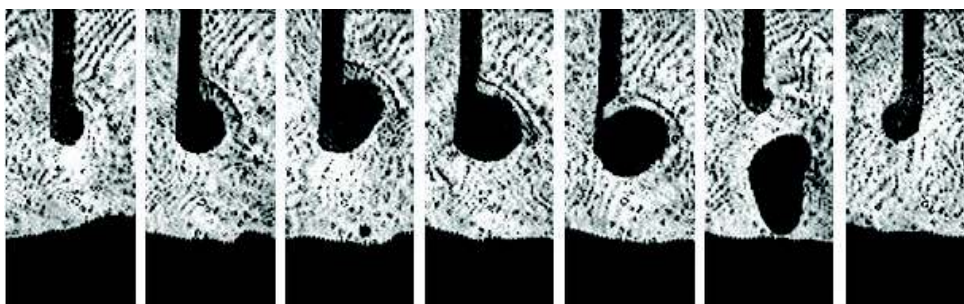


Figura 2.6 – Gotas durante a transferência no modo globular repulsivo

2.1.3. Transferência Goticular

Modo de transferência caracterizado pela ausência de respingos e gotas pequenas (com diâmetro próximo ao do arame-eletrodo) sendo transferidas a uma alta taxa. Apresenta alto aporte térmico e taxa de fusão, sendo utilizado para soldagem de chapas grossas na posição

plana. A Fig. 2.7 mostra uma seqüência de fotografias em alta velocidade de uma transferência goticular.

Um fator importante para transferência goticular é a chamada corrente de transição. Na realidade, a dita corrente de transição é uma faixa de corrente onde, acima desta, a transferência torna-se goticular. Esta faixa é importante, pois, abaixo da corrente de transição a transferência não ocorre de forma goticular. Ela depende do gás de proteção, extensão energizada, diâmetro, composição química e revestimento do arame-eletrodo, ou seja, seu valor é influenciado por diversos fatores. Por exemplo, segundo Leneswich (1958a) a corrente de transição diminui quando se aumenta a concentração de Césio na superfície do eletrodo, pois facilita a emissão e pode fazer a corrente de transição na polaridade CC- ficar menor do que na polaridade CC+ (Fig. 2.8). Ainda segundo este autor, o aumento do comprimento livre e a diminuição do diâmetro do eletrodo abaixam o valor para a corrente de transição (Fig. 2.9).

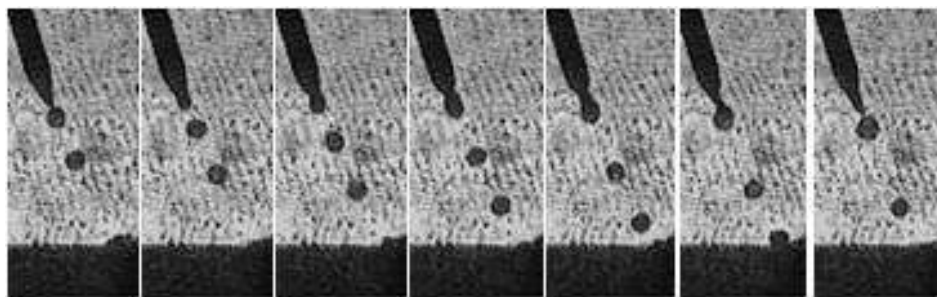


Figura 2.7 – Seqüência Gotas durante a transferência no modo goticular

Um fator importante para transferência goticular é a chamada corrente de transição. Na realidade, a dita corrente de transição é uma faixa de corrente onde, acima desta, a transferência torna-se goticular. Esta faixa é importante, pois, abaixo da corrente de transição a transferência não ocorre de forma goticular. Ela depende do gás de proteção, extensão energizada, diâmetro, composição química e revestimento do arame-eletrodo, ou seja, seu valor é influenciado por diversos fatores. Por exemplo, segundo Leneswich (1958a) a corrente de transição diminui quando se aumenta a concentração de Césio na superfície do eletrodo, pois facilita a emissão e pode fazer a corrente de transição na polaridade CC- ficar menor do que na polaridade CC+ (Fig. 2.8). Ainda segundo este autor, o aumento do comprimento livre e a diminuição do diâmetro do eletrodo abaixam o valor para a corrente de transição (Fig. 2.9).

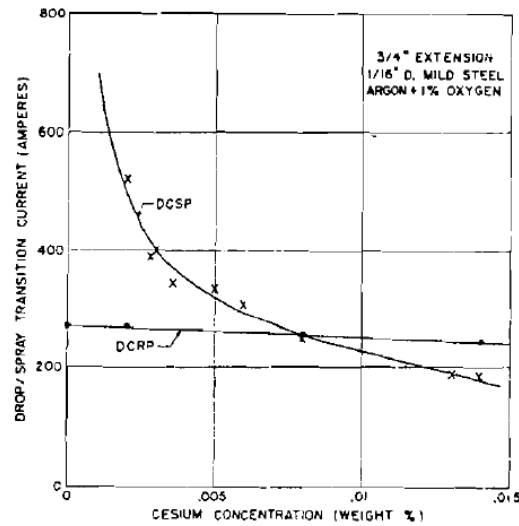
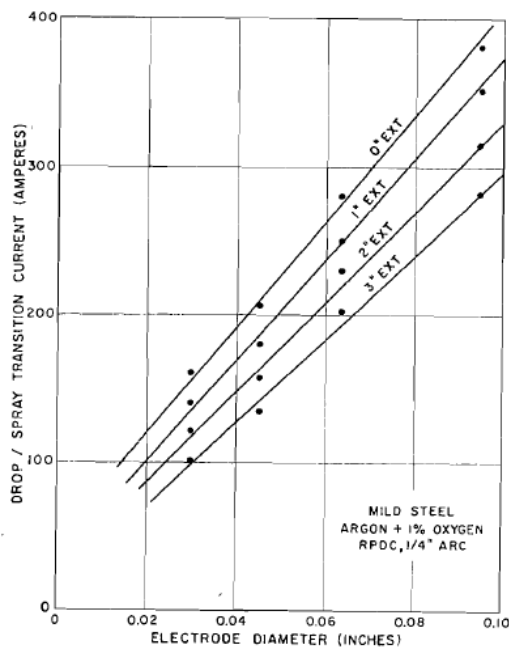
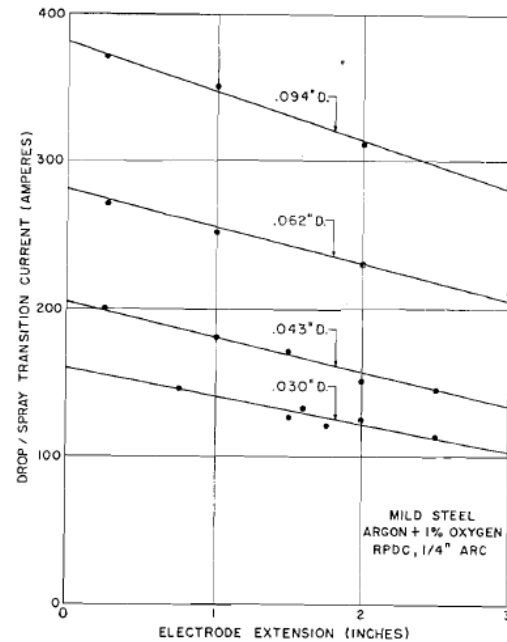


Figura 2.8 – Corrente de transição em função da concentração de Césio na superfície do eletrodo nas polaridades CC+ (DCRP) e CC- (DCSP) utilizando arame-eletrodo de médio carbono de 1,6 mm de diâmetro, extensão energizada de eletrodo de 19 mm e gás de proteção Ar + 1%O₂ (Lesnewich, 1958a)



(a)



(b)

Figura 2.9 – Corrente de transição em função do diâmetro do eletrodo (a) e extensão do eletrodo (b) utilizado arame-eletrodo de médio carbono, comprimento de arco de 6,3 mm na polaridade CC+ e gás de proteção Ar + 1%O₂ (Lesnewich, 1958a)

A identificação da corrente de transição pode ser realizada por técnicas de fotografia em alta velocidade. Esta é identificada pelo repentino aumento na frequência de destacamento e diminuição do diâmetro das gotas. Lin e Simpson (2001) mostram gráficos destes comportamentos reproduzidos na Fig. 2.10.

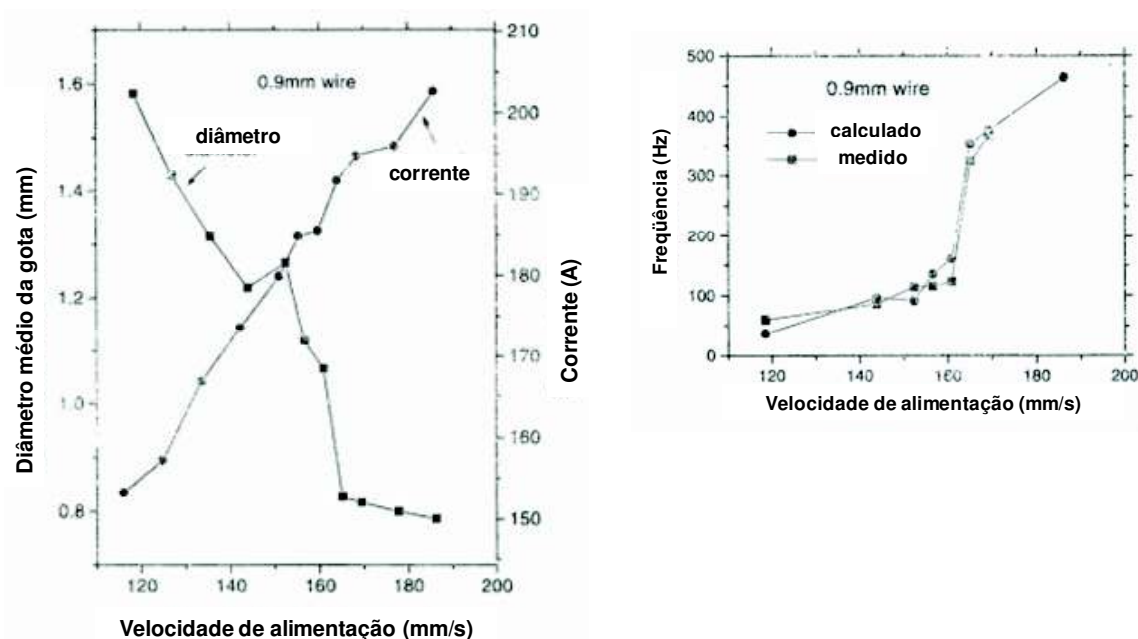


Figura 2.10 – Influência da velocidade de alimentação (corrente) no diâmetro da gota (à esquerda) e na frequência de destacamento (à direita), para eletrodo de 0,9 mm de diâmetro e gás de proteção Ar + 3%O₂ + 5%CO₂ (adaptado LIN e SIMPSON, 2001)

Vários estudos foram realizados com objetivo de investigar a influência do gás de proteção na corrente de transição. Tais estudos são importantes para determinar a composição correta dos gases para cada tipo de transferência desejada. Por exemplo, quando o desejado é transferência goticular, devem-se utilizar gases que abaixam a corrente de transição. Rhee e Kannatey-Asibu Jr. (1992) determinaram a corrente de transição para vários gases de proteção (Fig. 2.11). Pode-se observar, pela rápida mudança na frequência de destacamento da gota, que Ar puro e Ar + 5%CO₂ tem correntes de transição muito próximas e menores do que dos outros gases. Pelo menos até 5%, o teor de CO₂ não apresentou influência considerável e quando o teor de CO₂ aumenta (15 e 25%) também aumenta a corrente de transição. É interessante também realçar que com CO₂ e He puros, não foi possível alcançar a corrente de transição. Haidar e Lowke (1997) afirmam que a adição de até 5%CO₂ diminui a tensão

superficial da gota e, conseqüentemente, diminui a corrente de transição, pois a gota precisa crescer menos antes de se destacar.

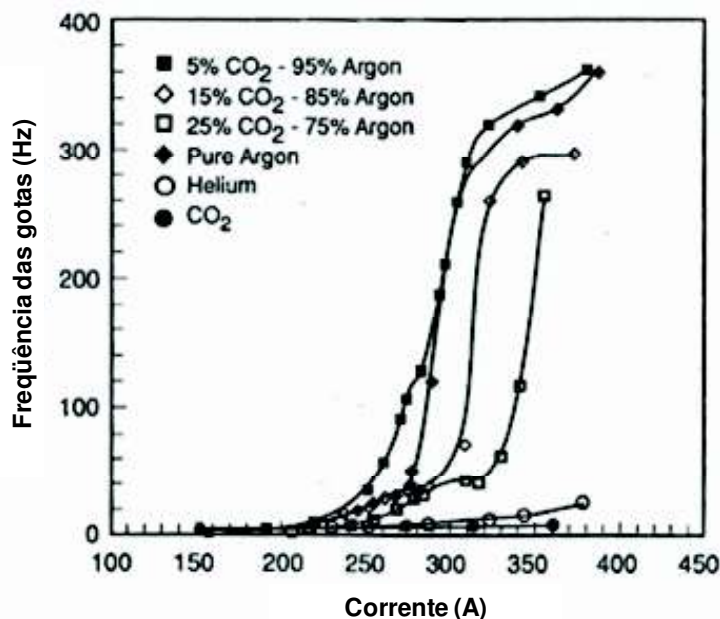


Figura 2.11 – Efeito do gás de proteção na frequência de destacamento da gota em função da corrente de soldagem utilizando um eletrodo de 1,6 mm de diâmetro (adaptado RHEE e KANNATEY-ASIBU JR, 1992)

Pellerin et al (2006) encontraram uma corrente de transição de 240 A utilizando Ar puro e 410 A quando usaram Ar + 15%CO₂, para eletrodo de 1,2 mm e DBCP de 20 mm. Haidar e Lowke (1997) utilizaram um modelo bidimensional para prever a corrente de transição de um eletrodo de 1,6 mm e encontram para Ar puro 290 A, para Ar + 25%CO₂ 325 A e para CO₂ puro mais de 400 A. Zielinska et al (2008) afirmam que no caso de CO₂ a tensão superficial do metal fundido muda sob a influência de gases ativos (ambos oxigênio e carbono diminuiriam a tensão superficial para o aço). Então, seria mais fácil obter transferência goticular quando se aumenta o teor de CO₂ na mistura. Porém, sabe-se que isto só ocorre para pequenas quantidades de CO₂. Em geral, o aumento da quantidade de CO₂ aumenta a corrente de transição. Algumas teorias tentam explicar este fenômeno, por exemplo:

- Jacobsen (1992) cita que como resultado do aumento da concentração de O_2 , e assim maior oxidação da superfície do eletrodo que quando sob argônio puro, ocorre o aumento da quantidade de elementos vaporizados o que diminui a razão de formação das gotas e perturba o destacamento pelo aumento dado na força de vaporização;
- Jacobsen (1992) também cita que a influência da força eletromagnética é reforçada pela adição de gases moleculares como O_2 , H_2 ou CO_2 e aumentaria com a concentração e energia de dissociação dos destes gases. Rhee e Kannatey-Asibu Jr. (1992) observaram uma transferência de metal similar para o hélio e o dióxido de carbono. A coluna de arco não fica completamente acoplada à gota, provavelmente como resultado de uma relativamente alta energia de ionização do hélio e energia adicional requerida para dissociação no caso do dióxido de carbono;
- Kim e Eagar (1993) postularam que o jato catódico seria o responsável pela força repelida (proporcional ao quadrado da corrente, usando o processo TIG para estimar) e observaram modo de transferência repelido com hélio e dióxido de carbono como gases de proteção.

Uma variante do modo goticular é um modo de transferência goticular com alongamento (Fig. 2.12). Esse modo é caracterizado principalmente pelo alongamento da ponta do eletrodo, o qual é causado pela escalada do arco no mesmo, acarretando o aquecimento do eletrodo e levando-o a uma condição pastosa. Também se caracteriza pela ausência de respingos e gotas pequenas sendo transferidas a uma alta taxa. Quando comparado à transferência goticular, as gotas são menores e transferidas a altíssimas taxas. Também apresenta alto aporte térmico e taxa de fusão, sendo utilizado para soldagem de chapas grossas na posição plana.

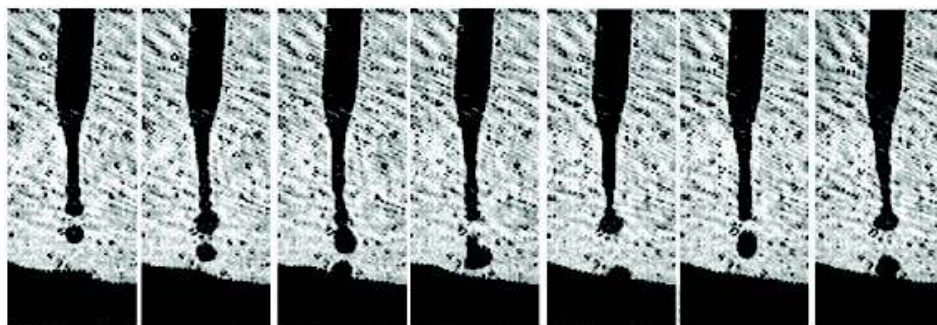


Figura 2.12 – Gotas durante a transferência no modo goticular com alongamento

2.1.4. Transferência Rotacional

Modo de transferência caracterizado principalmente pelo uso de altas densidades de corrente que provocam um grande alongamento do eletrodo que começa rotacionar (Fig. 2.13). Também se caracteriza pela formação de respingos e gotas pequenas sendo arremessadas a uma alta taxa. Devido à instabilidade ocasionada pela rotação, não é um tipo de transferência desejável para soldagem.

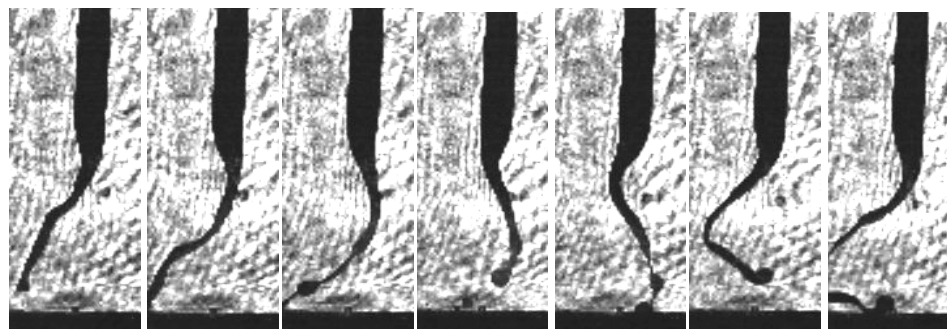


Figura 2.13 – Gotas durante a transferência no modo rotacional

2.2. Avaliação Quantitativa da Estabilidade da Transferência por Curto-Circuito

Devido à importância da aplicação desse tipo de transferência na soldagem pelo processo MIG/MAG, inúmeros estudos foram realizados com objetivo de entender e aperfeiçoar este tipo de transferência. O principal problema da transferência por curto-circuito é a geração de respingos, que diminui a capacidade de produção, seja devido à perda de material de adição ou à necessidade de gasto de recursos para sua retirada. Muitos destes estudos, voltados para a redução da geração de respingos, baseiam-se na melhoria da estabilidade de curtos-circuitos através da correta regulagem dos parâmetros de soldagem. Segundo Dutra et al (1995), a estabilidade deste modo de operação pode ser traduzida como a regularidade na formação e na separação das gotas metálicas, podendo ser avaliada com base na repetibilidade temporal dos valores instantâneos de tensão e corrente. Dos denominados oscilogramas, pode-se extrair indicativos da regularidade da transferência e, com isso, comparar, quantitativamente, soldagens realizadas sob diferentes combinações de parâmetros e variáveis de processo.

Em sua revisão da literatura, Hermans e Den Ouden (1999) citam que podem ser distinguidas três causas para instabilidade em transferência por curto-circuito:

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

Para poder avaliar o desempenho do processo, muitos autores propuseram índices que mensurassem a estabilidade do processo quando operando em curto-circuito. Norrish (1992) cita vários índices de estabilidade propostos por outros autores, todos baseados na análise estatística dos sinais dos parâmetros de soldagem. Baixo e Dutra (1995) utilizaram como indicativos de estabilidade o desvio padrão dos picos de corrente, do período de transferência e de tempo de curto-circuito. Segundo estes autores, o desvio padrão dos picos de corrente foi, entre os índices analisados, o que apresentou maior sensibilidade à ocorrência de irregularidades na transferência. Porém, esta grande sensibilidade pode resultar em problemas de repetibilidade do indicativo, uma vez que em situações de transferência realizada sob o mesmo procedimento de soldagem, e resultando em depósitos aparentemente de mesmas características, o desvio padrão dos picos de corrente pode apresentar variações da ordem de 50%. Já Fonseca; Avelar; Modenesi (1996) utilizaram como indicativos de estabilidade a variação do período de transferência (T), o tempo médio de duração de um curto-circuito (tcc), o fator de curto-circuito ($F_{cc} = tcc/T$) e um fator de respingos (R), que foi definido pelos autores como a razão entre o peso dos respingos e o peso do metal de adição (metal depositado + respingos). Segundo estes, como forma de agregar o período de transferência (T) e o fator de respingos (R), definiu-se um índice de estabilidade do processo como mostrado na Eq. (2.1).

$$IE = \frac{100}{T \times R} \quad (2.1)$$

Em outro trabalho sobre estabilidade do processo operando em curto-circuito, Silva; Marques; Modenesi (1994) utilizam histogramas de períodos de transferência para diferentes valores de tensão. Neste trabalho, os autores relacionam o tipo de distribuição do histograma com a estabilidade do processo, medida pela quantidade de respingos gerada, concluindo que em condições mais favoráveis de operação a distribuição de períodos de transferência tende a ser multimodal. Suban e Tusek (2003) utilizam índices de estabilidade baseados em parâmetros estatísticos, parecidos com os dos autores anteriormente citados, mas utilizaram

também um índice baseado em gráficos com aspecto de laços, que são gerados a partir dos valores instantâneos dos pares de coordenada da corrente e da tensão. Nestes gráficos, quanto maior a uniformidade dos laços, mais estável está o processo. Já Roca et al (2005) também apresentam um índice de estabilidade de curto-circuito baseado nos laços gerados por gráficos de tensão em função da corrente. Porém, em seu estudo, os autores propuseram um algoritmo para o cálculo da área de cada laço gerado no gráfico e usaram como índice de estabilidade o desvio padrão da média destas áreas calculadas. 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. Kang and Rhee (2001) capturaram os respingos gerados durante a soldagem e relacionaram com os sinais elétricos adquiridos. Eles propuseram um índice baseado em regressões lineares e não lineares para estimar a quantidade de respingos, tomando como fatores de entrada o período de curto-circuito, os tempos de arco aberto, curto-circuito, pico de corrente de curto, corrente instantânea de curto-circuito, corrente média pelo período de curto-circuito e os respectivos desvios padrões destes parâmetros. Dentre os resultados, foi verificado que entre o período de curto-circuito e o tempo de arco aberto (assim como entre seus desvios padrões) havia uma grande correlação e, por isso, deveria se escolher um dos dois (o período ou o tempo de arco aberto) para análise, sob pena de causar um erro na mesma.

2.3. Mapas de Transferência Metálica

Mapas de transferência metálica são diagramas que apresentam regiões onde diferentes modos de transferência metálica passam a ocorrer em função da corrente de soldagem (ou velocidade de alimentação) e tensão de soldagem (ou comprimento de arco). Muitos estudos para mapeamento dos modos de transferência para MIG/MAG já foram realizados, utilizando-se diferentes condições de soldagem e diferentes materiais. Porém, a grande maioria desses estudos tem em comum a utilização de uma única condição de soldagem (como DBCP e faixa de corrente) para o mapeamento de diferentes modos de transferência metálica. Por exemplo, Figueiredo (2000) confeccionou mapas de transferência de tensão em função da velocidade de alimentação (Fig. 2.14) e de comprimento de arco em função da corrente de soldagem (Fig. 2.15) para determinar campos operacionais para o processo, obtendo diferentes modos de transferência utilizando uma DBCP fixa. Scotti (2000) confeccionou mapas de transferência utilizando também a DBCP fixa, independente do modo

de transferência resultante, para mostrar a influência de pequenas mudanças na composição do gás de proteção (Figs. 2.16 e 2.17). Chama-se a atenção que os autores citados limitam as regiões de transição entre um modo e outro e apresentam modos combinados de transferência.

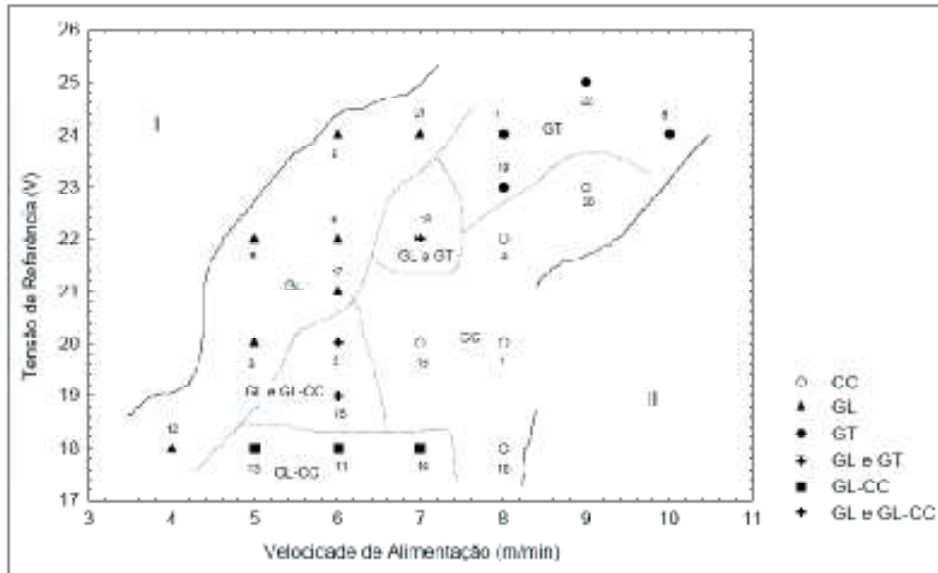


Figura 2.14 - Mapa de transferência para soldagem de alumínio, utilizando eletrodo de 1,2 mm, DBCP de 15 mm e gás argônio comercialmente puro. CC = Curto-circuito, GL = Globular, GT = Goticular (FIGUEIREDO, 2000)

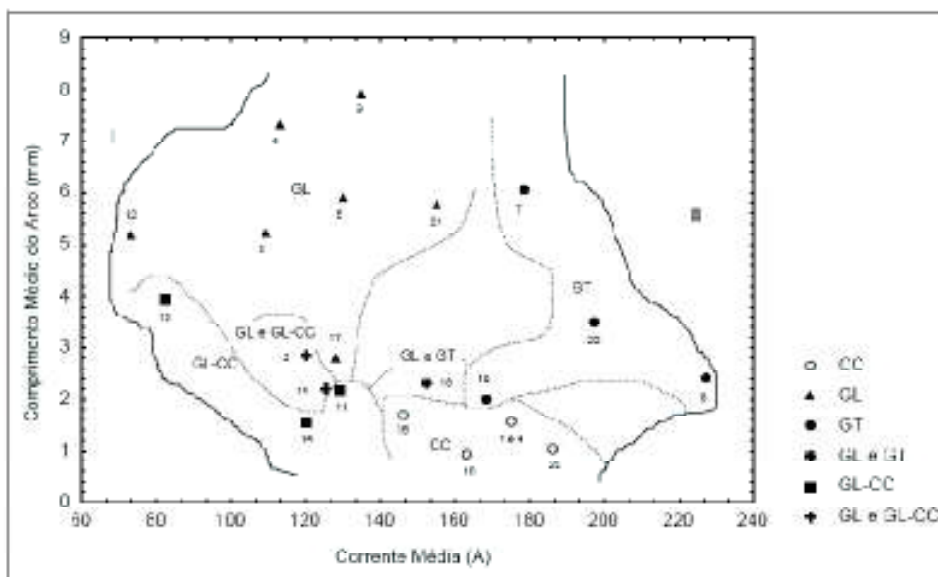


Figura 2.15 - Mapa de transferência para soldagem de alumínio, utilizando eletrodo de 1,2 mm, DBCP de 15 mm e gás argônio comercialmente puro. CC = Curto-circuito, GL = Globular, GT = Goticular (FIGUEIREDO, 2000)

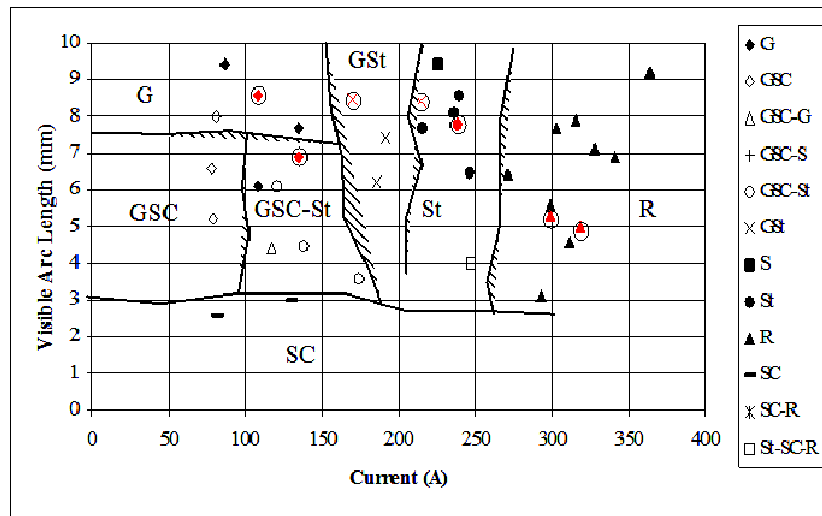


Figura 2.16 - Mapa de transferência (comprimento visível do arco versus corrente) para soldagem de aço inoxidável, utilizando eletrodo AWS ER308L de 0,889 mm de diâmetro, DBCP de 13 mm, gás argônio comercialmente puro e argônio ultra puro identificado pelo círculo em torno do símbolo. G = Globular, GSC = Globular-Curto-circuito, St = Gotico com alongamento, S = Gotico, SC = Curto-circuito, R = rotacional (SCOTTI, 2000)

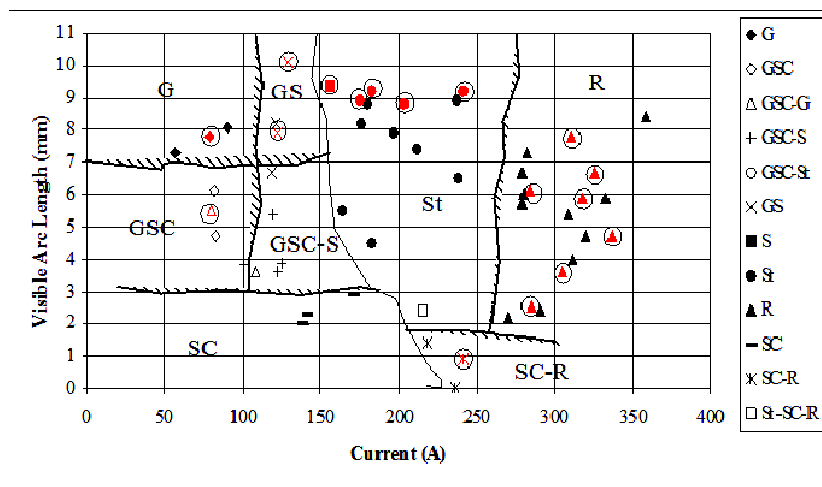


Figura 2.17 - Mapa de transferência (comprimento visível do arco versus corrente) para soldagem de aço inoxidável, utilizando eletrodo AWS ER308L de 0,889 mm de diâmetro, DBCP de 13 mm, gás Ar + 1%O₂ e Ar + 2%O₂ identificados pelo círculo em torno do símbolo. G = Globular, GSC = Globular-Curto-circuito, GS = Globular-Gotico, St = Gotico com alongamento, S = Gotico, SC = Curto-circuito, R = rotacional (SCOTTI, 2000)

Liu; Siewert; Lan (1989) desenvolveram, a partir da observação de fotografias em alta velocidade e dos sinais elétricos, um critério para determinação dos modos de transferência baseado na flutuação dos sinais de tensão. O critério desenvolvido, segundo os autores, é o seguinte:

Ruído: $\Delta V < 0,5 \text{ V}$

Goticular: $0,5 \text{ V} < \Delta V < 1 \text{ V}$

Globular: $1 \text{ V} < \Delta V < 8 \text{ V}$

Curto-circuito: $8 \text{ V} > \Delta V$

Ainda utilizando o critério para determinar o modo de transferência, os autores construíram um mapa de transferência (Fig. 2.18). Vale a pena comentar que dependendo da regulagem os três modos de transferência ocorrem simultaneamente.

Heald et al (1994) construíram mapas de transferência em função da tensão de soldagem e corrente de soldagem (Fig. 2.19) e em função da tensão de soldagem e velocidade de alimentação (Fig. 2.20) para diferentes DBCPs. É interessante observar que na utilização da DBCP de 13 mm não ocorreram todos os modos de transferência metálica, ficando restritos apenas aos modos de curto-circuito, goticular e goticular com alongamento, mostrando a importância da DBCP na obtenção dos modos de transferência.

Em geral utiliza-se DBCPs curtas quando operando no modo de transferência por curto-circuito, pois, utilizando uma DBCP longa, no momento do curto-circuito o comprimento energizado de arame será excessivamente longo, produzindo um grande aquecimento por efeito Joule e desestabilizando mecanicamente o arame-eletrodo. Contudo, com o processo operando no modo goticular é preferível utilizar DBCPs longas. Isto por que, nesse modo de operação é desejável uma maior taxa de fusão possível (produção) e sabe-se que maiores comprimentos energizados de arame promovem maiores taxas de fusão.

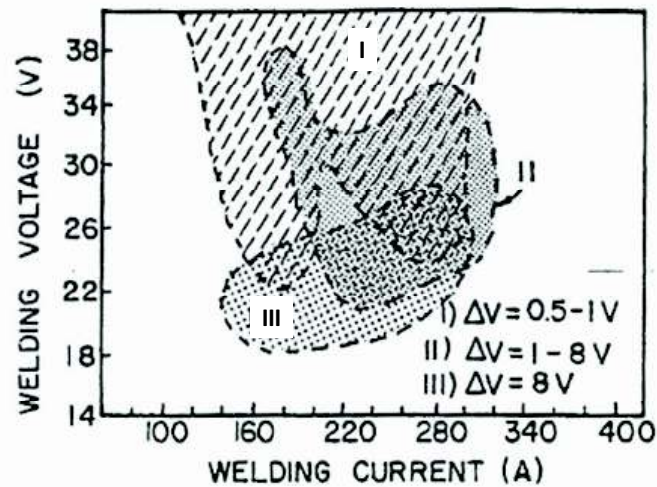


Figura 2.18 – Mapa de transferência (tensão versus corrente) para soldagem de aço carbono, utilizando eletrodo AWS ER70S-3 de 1,2 mm de diâmetro, comprimento energizado de eletrodo fixado em 15,8 mm, gás Ar + 25%CO₂. Região I = curto-circuito, região II = globular e região III = goticular (LIU; SIEWERT; LAN, 1989)

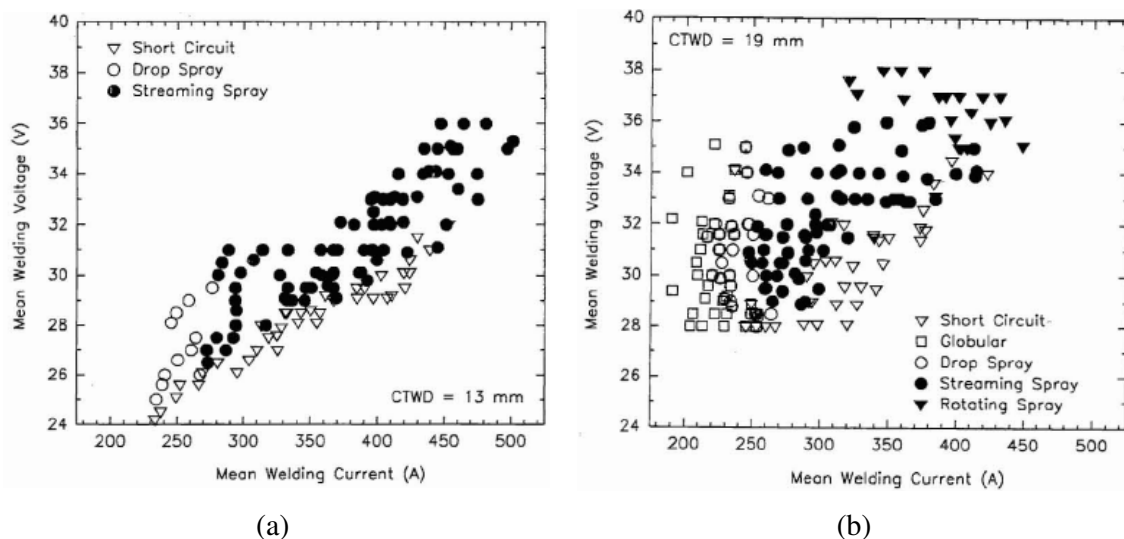


Figura 2.19 – Mapas de transferência (tensão versus corrente) para soldagem de aço carbono, utilizando eletrodo AWS ER100S-1 de 1,2 mm de diâmetro, gás Ar + 2%O₂, em (a) DBCP de 13 mm e em (b) DBCP de 19 mm (HEALD ET AL, 1994)

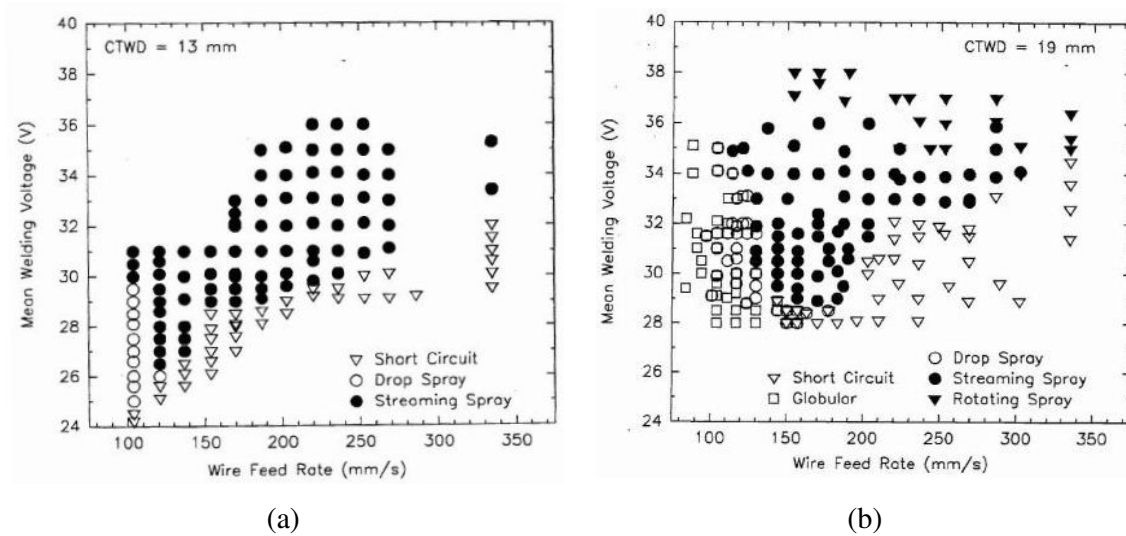


Figura 2.20 – Mapas de transferência (tensão versus velocidade de alimentação) para soldagem de aço carbono, utilizando eletrodo AWS ER100S-1 de 1,2 mm de diâmetro, gás Ar + 2%O₂, em (a) DBCP de 13 mm e em (b) DBCP de 19 mm (HEALD ET AL, 1994)

2.3. Consumo

Consumo, expresso pela taxa de fusão, é a quantidade de arame-eletrodo fundido por unidade de tempo. Quanto maior o consumo, maior a capacidade de produção do processo. Porém, o consumo (ou taxa de fusão) não deve ser utilizado como medida de produtividade. O parâmetro de medida de produtividade no processo MIG/MAG é a taxa de deposição que é a quantidade de material por unidade de tempo que realmente forma o cordão de solda, pois, leva em consideração as perdas de material ocorridas durante o processo (respingos, fumo, escória etc.). A diferença entre o consumo (material fundido) e a taxa de deposição (material depositado) é definida como rendimento de deposição (η_d) e dada pela Eq. (2.2).

$$\eta_d = \frac{\text{taxa de deposição}}{\text{taxa de fusão}} \quad (2.2)$$

Scotti e Ponomarev (2008) apresentam de forma didática um esquema, representado aqui na Fig. 2.21, mostrando uma analogia entre um arco e um resistor formado por resistências em série. Por esta analogia, existiriam quatro regiões, mostradas na figura, onde

haveria geração¹ de calor para soldagem (também existe o calor gerado, por efeito Joule, internamente na fonte de soldagem, no cabo da tocha e no cabo para conexão com a mesa, mas esta geração de calor não contribui para o consumo, mas pode afetar o processo). Porém, para se analisar de uma forma mais completa como as fontes de calor afetam o consumo, é necessário conhecê-las e buscar as condições de soldagem que poderiam afetá-las. Assim, de modo mais formal, as quatro fontes de calor que poderiam influenciar no consumo seriam o calor gerado no eletrodo devido à passagem da corrente (efeito Joule), o calor gerado devido às reações geradas na conexão arco-eletrodo, o calor proveniente da coluna de plasma devido às reações de ionização do gás de proteção e o calor proveniente da poça de fusão devido às reações geradas na conexão arco-peça.

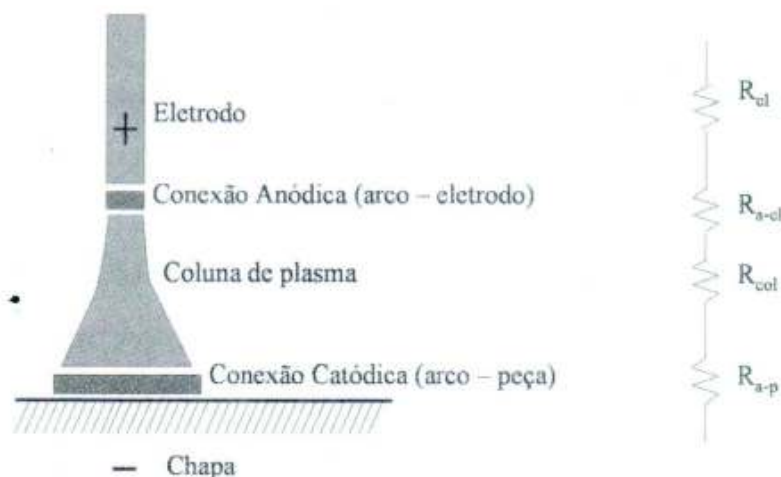


Figura 2.21 - Representação esquemática da analogia de um arco com um circuito resistivo em série (SCOTTI; PONOMAREV, 2008)

2.3.1. Calor Gerado no Eletrodo por Efeito Joule

A passagem de corrente pelo eletrodo promove a geração de calor por um efeito conhecido por efeito Joule. Esta geração de calor está intimamente ligada com a resistência oferecida pelo material à passagem de corrente. A relação entre a corrente (I), a tensão (U) e as características do condutor que afetam a resistência é dada pela Lei de Ohm, mostrada na Eq. 2.3.

¹ A palavra geração é normalmente utilizada, mas não está correta. Na verdade não há geração de calor e sim transformação, pois a energia não pode ser gerada ou destruída, apenas transformada.

$$U = \rho \frac{l}{A} I^2 \quad (2.3)$$

onde ρ = resistividade elétrica; l = comprimento do condutor; A = área da seção transversal do condutor.

A Fig. 2.22 mostra o efeito da corrente e do comprimento energizado do eletrodo (extensão do eletrodo) na geração de calor por efeito Joule. Pode-se verificar que o aumento da corrente, para um mesmo comprimento energizado de eletrodo, aumenta a taxa de fusão e que o aumento do comprimento energizado de eletrodo, para uma mesma corrente, também aumenta a taxa de fusão.

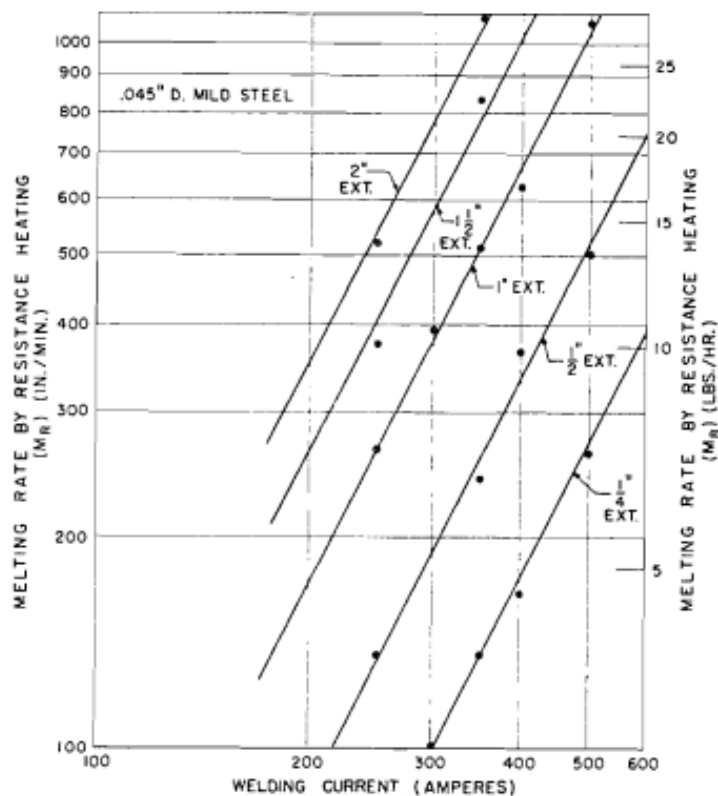


Figura 2.22 – Taxa de fusão em função da corrente para vários comprimentos energizados de eletrodo de médio carbono com diâmetro de 1,2 mm (LESNEWICH, 1958b)

Suban e Tusek (2001) verificaram a influência do comprimento do eletrodo na taxa de fusão para dois tipos de arames diferentes. A Fig. 2.23 apresenta as curvas da taxa de fusão em função da corrente, comprimento do eletrodo e tipo de arame-eletrodo. Pode-se observar

que o aumento da corrente e do comprimento energizado de eletrodo aumenta a taxa de fusão de forma similar para os dois tipos de arame-eletrodo. Chama-se atenção para o fato de que em baixas correntes a mudança no comprimento energizado de eletrodo afeta a taxa de fusão de forma menos pronunciada.

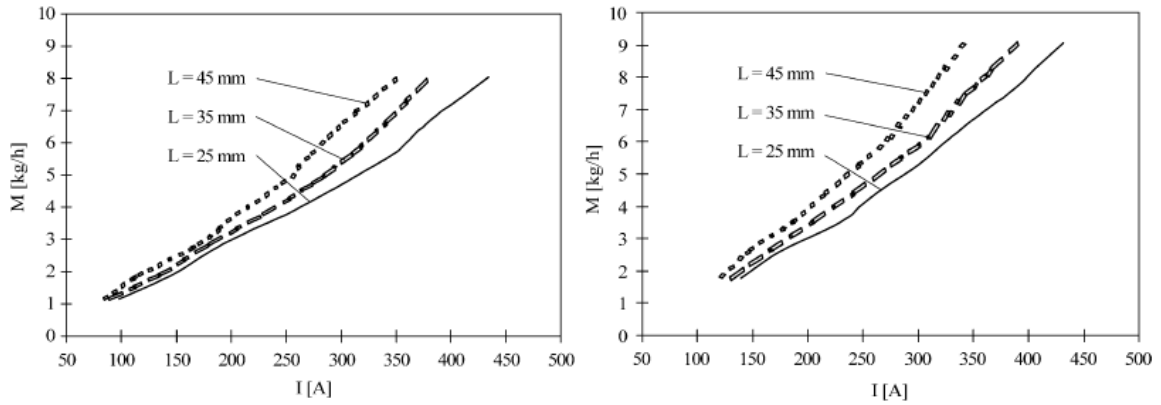


Figura 2.23 – Taxa de fusão em função da corrente para três comprimentos de eletrodo energizado. Em (a) utilizando o arame maciço VAC 60 (similar ao ER70S-6) e em (b) o arame tubular FabCore 70 TM (tipo rutílico com pó de ferro) ambos com diâmetro de 1,6 mm (SUBAN; TUSEK, 2001)

Lesnewich (1958b) utiliza um coeficiente de aquecimento por resistência (C_r) para mostrar a influência da área da seção transversal do eletrodo na taxa de fusão (Fig. 2.24). O coeficiente C_r é uma constante de proporcionalidade que é dependente do diâmetro do eletrodo e de sua resistividade. A relação entre a taxa de fusão (M_r) e C_r é dada pela Eq. 2.4.

$$M_r = C_r I^2 \quad (2.4)$$

Observando a Fig. 2.24 pode-se verificar que o aumento na área transversal do eletrodo para um mesmo valor de corrente e comprimento energizado de eletrodo, aumenta o valor de C_r , e conseqüentemente, a taxa de fusão.

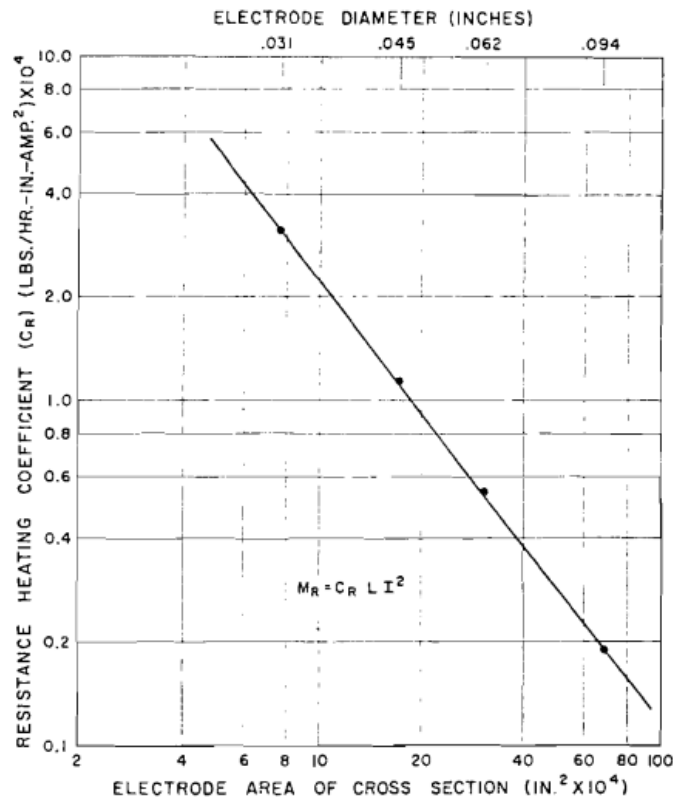


Figura 2.24 – Taxa de fusão em função da área de seção transversal do eletrodo (LESNEWICH, 1958b)

Em resumo, o calor gerado no eletrodo por efeito Joule é dependente do comprimento energizado de eletrodo, da corrente, do diâmetro e da resistividade do eletrodo.

2.3.2. Calor Gerado na Conexão Arco-Eletrodo

A soldagem pelo processo MIG/MAG, operando em corrente contínua, pode ser realizada tanto em CC+ (polaridade inversa – mais usual) quanto em CC- (polaridade direta). Em CC+, o eletrodo é o ânodo (pólo positivo) e em CC- é o cátodo (pólo negativo). As reações que ocorrem no ânodo e no cátodo são diferentes e podem promover uma maior geração de calor no cátodo para as mesmas condições de soldagem. As diferentes reações ocorridas em cada pólo são atribuídas ao mecanismo de emissão em cada polaridade. A Fig. 2.25 apresenta algumas das características de cada polaridade.

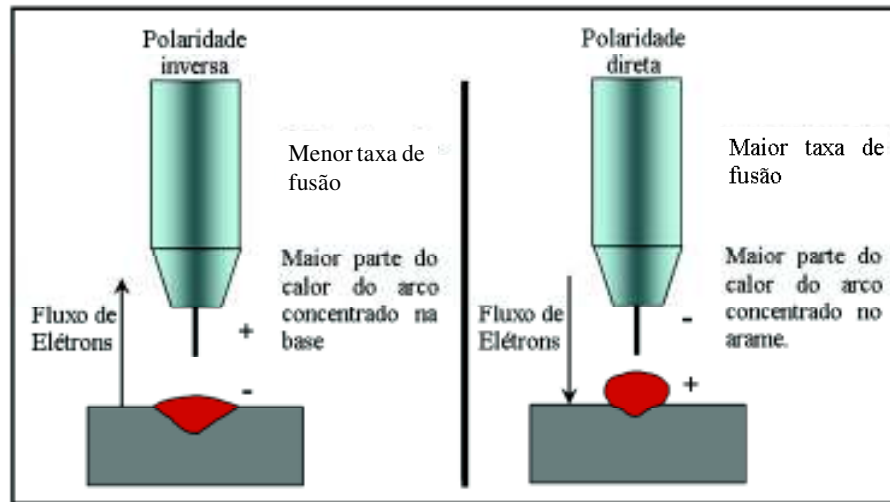


Figura 2.25 - Características do cordão de solda para soldagem na CC+ e CC- (modificado TALKINGTON, 1998)

a) Eletrodo Ligado no Pólo Positivo (Ânodo)

A Fig. 2.26 apresenta a influência da corrente na geração de calor no ânodo. Pode-se verificar que o calor gerado é proporcional à corrente de soldagem.

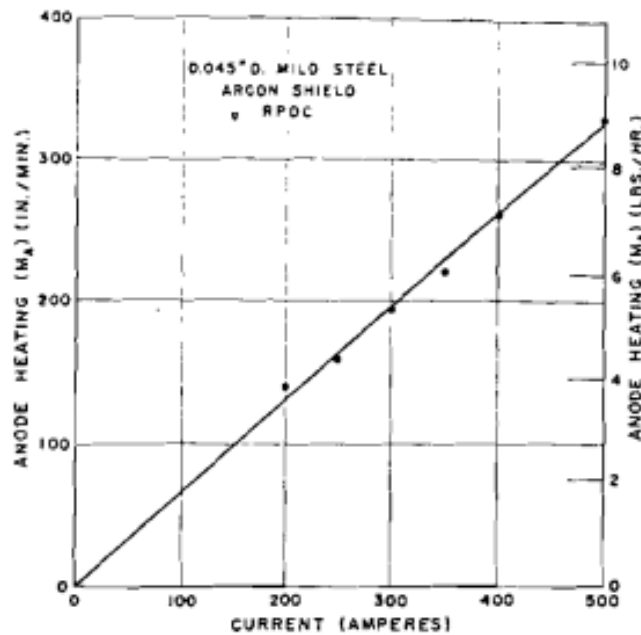


Figura 2.26 – Influência da corrente na geração de calor no ânodo para arame-eletrodo de médio carbono de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Ar puro (LESNEWICH, 1958b)

O diâmetro do eletrodo afeta também a quantidade de calor gerada no ânodo, pois, pode aumentar a área da conexão. Porém, Lesnewich (1958b) mostra em seu trabalho que esta relação não é direta, depende do formato da ponta do eletrodo que por sua vez depende do diâmetro do eletrodo.

Lesnewich (1958b) afirma em seu trabalho que a mudança do gás de proteção ou da condição superficial do eletrodo não altera a geração de calor no ânodo. Segundo ele, isto ocorre, pois, no ânodo a mudança nestas condições não altera as reações responsáveis pela geração de calor. A Tab. 2.2 apresenta a taxa de fusão em função do gás de proteção e do tratamento superficial do eletrodo. Nesta tabela pode-se observar que, pelo menos para os gases da tabela, o gás de proteção e o tratamento do eletrodo com Césio parecem sim ter efeito sobre a taxa de fusão. A Fig. 2.26 apresenta a taxa de fusão em função da corrente para quatro gases de proteção e um fluxo utilizando um arame maciço de 1,6 mm de diâmetro, enquanto a Fig. 2.27 apresenta o mesmo, porém utilizando um arame tubular de 1,6 mm de diâmetro. Estes resultados também indicam que a mudança no gás de proteção altera a taxa de fusão, e conseqüentemente, a geração de calor no ânodo.

Tabela 2.2 – Efeito dos gases de proteção e condição superficial do eletrodo na taxa de fusão operando em CC+ com corrente de 350 A para eletrodos de médio carbono de diâmetro de 1,6 mm e com comprimento energizado de 19 mm (adaptado Lesnewich, 1958b)

Gás de proteção	Condição superficial	Taxa de fusão (in/min)
Argônio	Limpa	225
Argônio	Tratada com Césio	215
Hélio	Limpa	230
Hélio	Tratada com Césio	235
Nitrogênio	Limpa	225
Nitrogênio	Tratada com Césio	225
Dióxido de carbono	Limpa	235
Dióxido de carbono	Tratada com Césio	230

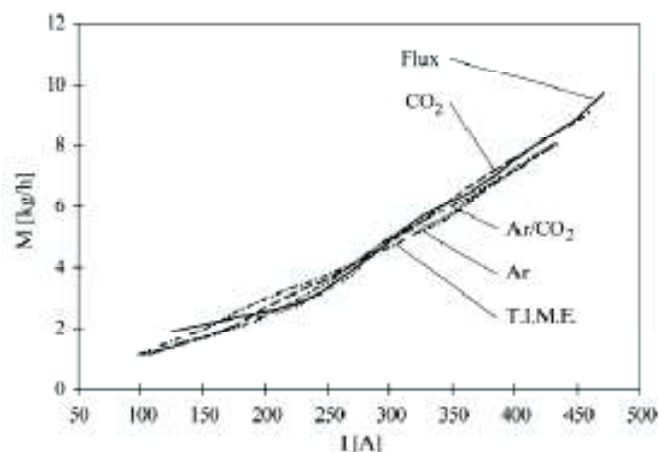


Figura 2.26 – Taxa de fusão em função da corrente para quatro gases de proteção e um fluxo utilizando o arame maciço VAC 60 (ER70S-6) com diâmetro de 1,6 mm e comprimento energizado de eletrodo de 25 mm. O fluxo usado foi o UNIFLUX D1, Ar/CO₂ é a mistura 82% Ar + 18% CO₂ e T.I.M.E. a mistura 65% Ar + 26,5% He + 8% CO₂ + 0,5% O₂ (SUBAN; TUSEK, 2001)

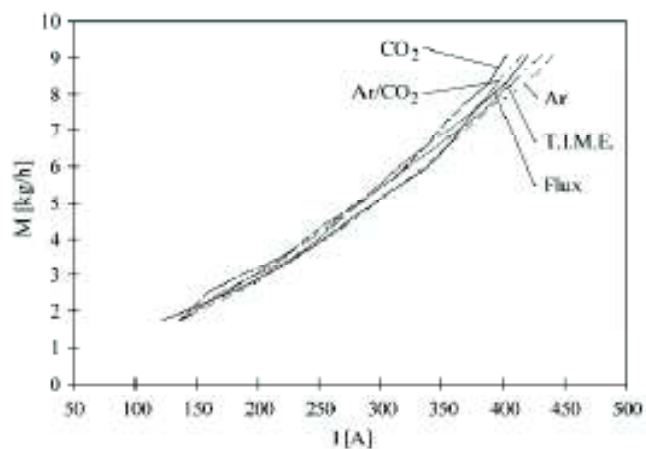


Figura 2.27 – Taxa de fusão em função da corrente para quatro gases de proteção e um fluxo utilizando o arame tubular FabCore 70 TM (rutílico com pó de ferro) com diâmetro de 1,6 mm e comprimento energizado de eletrodo de 25 mm. O fluxo usado foi o UNIFLUX D1, Ar/CO₂ é a mistura 82% Ar + 18% CO₂ e T.I.M.E. a mistura 65% Ar + 26,5% He + 8% CO₂ + 0,5% O₂ (SUBAN; TUSEK, 2001)

Em resumo, soldando na polaridade CC+, a geração de calor no ânodo aumenta com o diâmetro do eletrodo e corrente de soldagem, depende do gás de proteção e da condição superficial do eletrodo, mas não depende de comprimento energizado de eletrodo.

b) Eletrodo Ligado no Pólo Negativo (Cátodo)

Segundo Lesnewich (1958b) devido ao mecanismo para emissão de elétrons que ocorre no cátodo uma mudança na composição ou condição superficial do eletrodo altera a função trabalho do mesmo, mudando a facilidade de emitir elétrons. A Fig. 2.28 apresenta influência da adição de cálcio no eletrodo na taxa de fusão do mesmo. Pode-se observar que em pequenas quantidades a concentração de cálcio na superfície do eletrodo aumenta a taxa de fusão, mas no geral o aumento da concentração de cálcio diminui a mesma.

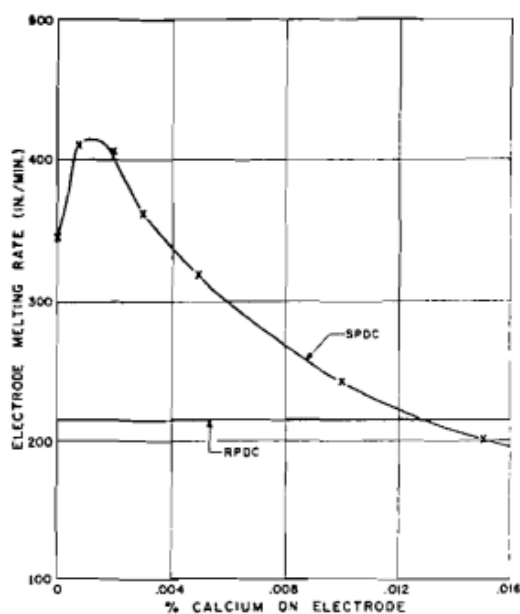


Figura 2.28 – Efeito da quantidade de cálcio na superfície do eletrodo na taxa de fusão operando em polaridade CC+ (RPDC) e polaridade CC- (SPDC) (LESNEWICH, 1958b)

De forma similar, devido ao mecanismo para emissão de elétrons que ocorre no cátodo, a mudança do gás de proteção pode mudar a quantidade de calor gerado pela facilitação da emissão de elétrons. A Tab. 2.3 mostra a influência do gás de proteção sobre a taxa de fusão. Nesta tabela pode-se observar que em relação ao argônio a mudança do gás para o hélio não muda significativamente a taxa de fusão, enquanto que a mudança para o nitrogênio e para o dióxido de carbono a taxa de fusão é alterada. Nota-se que o hélio e o argônio proporcionam taxas de fusão parecidas e o nitrogênio e dióxido de carbono também. Isto acontece por que os gases oxidantes facilitam a emissão de elétrons, diminuindo, assim, o calor gerado na conexão catódica. Ainda nesta tabela, pode-se mostrar que apesar o hélio ter um potencial de ionização maior que duas vezes o do argônio (34,6 contra 15,75 eV) a taxa de

fusão proporcionada pelo hélio não é substancialmente maior, mostrando que o potencial de ionização não tem relação com a taxa de fusão do eletrodo.

Souza; Rezende; Scotti (2009), em um estudo sobre a influência da polaridade na taxa de fusão apresentou resultados, mostrados na Tab. 2.4, que apontam que, para uma mesma corrente imposta, a mudança no gás de proteção pode alterar a taxa de fusão (velocidade de alimentação) ao se manter o comprimento do arco similar para todos os testes. Pode-se observar que na polaridade CC+ a mudança no gás de proteção alterou pouco a taxa de fusão, enquanto, para a polaridade CC- a mudança no gás de proteção provou uma alteração bem mais significativa no aumento da taxa de fusão. Estes resultados corroboram os anteriores, mostrando que o gás de proteção altera, porém pouco, a taxa de fusão quando soldando em polaridade CC+. Em polaridade CC- a adição de gases com maior poder oxidante diminui a taxa de fusão.

Tabela 2.3 – Efeito dos gases de proteção na taxa de fusão operando em CC- com corrente de 350 A para eletrodos de médio carbono de diâmetro de 1,6 mm e com comprimento energizado de 19 mm (adaptado (LESNEWICH, 1958b))

Gás de proteção	Taxa de fusão (in/min)
Hélio	400
Argônio	395
Nitrogênio	370
Dióxido de carbono	370

Tabela 2.4 - Parâmetros de regulagem para realização dos testes utilizando arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro (SOUZA; REZENDE; SCOTTI, 2007)

Teste	Gás de Proteção	Polaridade	Velocidade de Alimentação (m/min)	Velocidade Soldagem (cm/min)	DBCP (mm)	Corrente Soldagem (A)
01	Ar + 2%O ₂	CC-	11,7	34,8	20	249
02	Ar + 2%O ₂	CC+	7,2	34,8	20	250
04	Ar + 18%CO ₂	CC-	9,8	34,8	20	255
03	Ar + 18%CO ₂	CC+	7,0	34,8	20	251

O efeito da corrente na geração de calor no cátodo é similar ao efeito no ânodo, ou seja, o aumento da corrente aumenta a geração de calor. A Fig. 2.29 mostra a influência da corrente na geração de calor do ânodo e do cátodo, além de mostrar a influência da condição superficial do eletrodo na relação entre corrente e a geração de calor no cátodo. Nesta figura, pode-se observar que apesar da mesma tendência de crescimento do calor gerado com o aumento da corrente, as curvas para o ânodo e para o cátodo têm inclinações diferentes.

A Fig. 2.29 também mostra que a mudança da condição superficial do eletrodo altera a relação entre corrente e o calor gerado no cátodo, ou seja, afeta o C_c . A Fig. 2.30 mostra o efeito da corrente nos coeficientes C_a e C_c . Pode-se observar que C_a não depende da corrente e C_c é dependente da corrente e da condição superficial do eletrodo.

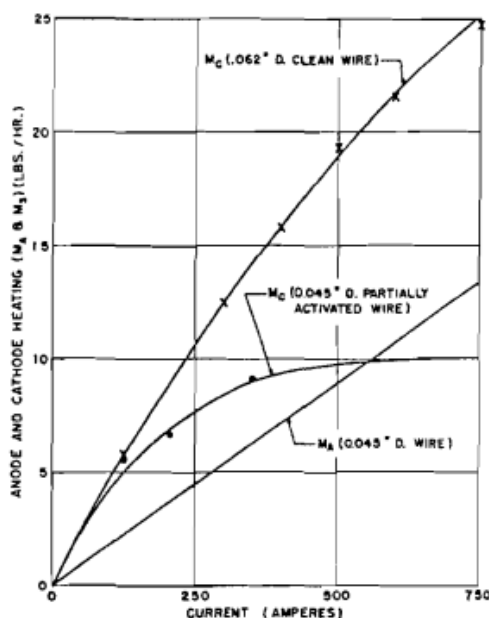


Figura 2.29 – Geração de calor no cátodo e no ânodo em função da corrente para eletrodos de diferentes diâmetros e condição superficial utilizando proteção gasosa de Ar + 1%O₂ (LESNEWICH, 1958b)

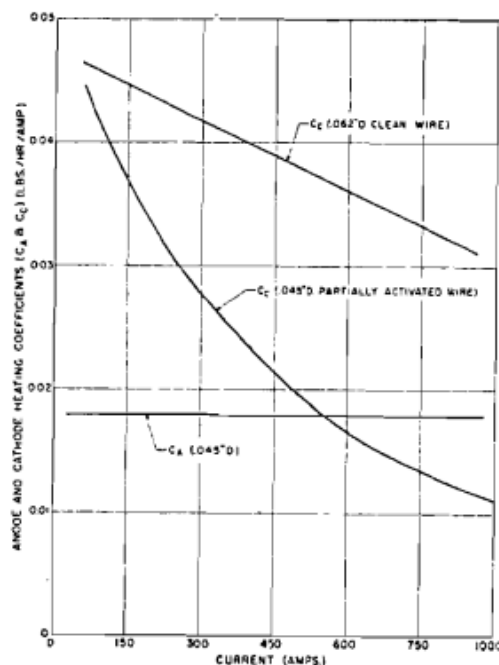


Figura 2.30 – Calor gerado no cátodo e ânodo em função da corrente para eletrodo de médio carbono e gás de proteção Ar + 1%O₂ (LESNEWICH, 1958b)

O comprimento energizado de eletrodo influi na taxa de fusão. Lesnewich (1958b), na revisão bibliográfica de seu artigo, atribui a mudança da taxa de fusão com o comprimento energizado de eletrodo à mudança na distribuição térmica na ponta do eletrodo. Ainda, segundo este autor, esta mudança tem efeito na área e grau de emissão de elétrons.

Em resumo, soldando na polaridade CC-, a geração de calor no cátodo aumenta com o aumento da corrente de soldagem, mas esta relação depende da condição superficial do eletrodo. Também existe uma relação da geração de calor com o comprimento energizado de eletrodo, porém bem menor que a relação com a corrente. O calor gerado no cátodo também depende do gás de proteção utilizado, desde que este seja oxidante.

2.3.3. Calor Proveniente da Coluna de Plasma e da Poça de Fusão

O calor proveniente da coluna de plasma e da poça de fusão poderia alterar a taxa de fusão pelo aquecimento do eletrodo por radiação. Porém, isto não ocorre. A mudança no comprimento do arco, que afeta a quantidade de calor irradiada pelo arco, não apresenta influência na taxa de fusão (Fig. 2.31). A radiação proveniente da poça de fusão pode ser alterada pela mudança na sua composição e tamanho. A Fig. 2.32 mostra, pela variação na composição do metal de base e pela variação da velocidade de soldagem, a independência do

calor irradiado pela poça na taxa de fusão. Esta figura mostra ainda que o aumento da tensão de soldagem, para um comprimento de arco e comprimento energizado de eletrodo fixos, também não altera a taxa de fusão. Isto implica que a simples mudança na potência de soldagem não provoca um aumento de taxa de fusão.

No geral, apenas duas parcelas de todo calor gerado na soldagem afetam a taxa de fusão, o calor gerado por efeito Joule no comprimento energizado de eletrodo e o calor gerado na conexão arco-eletrodo, sendo este último dependente da polaridade utilizada.

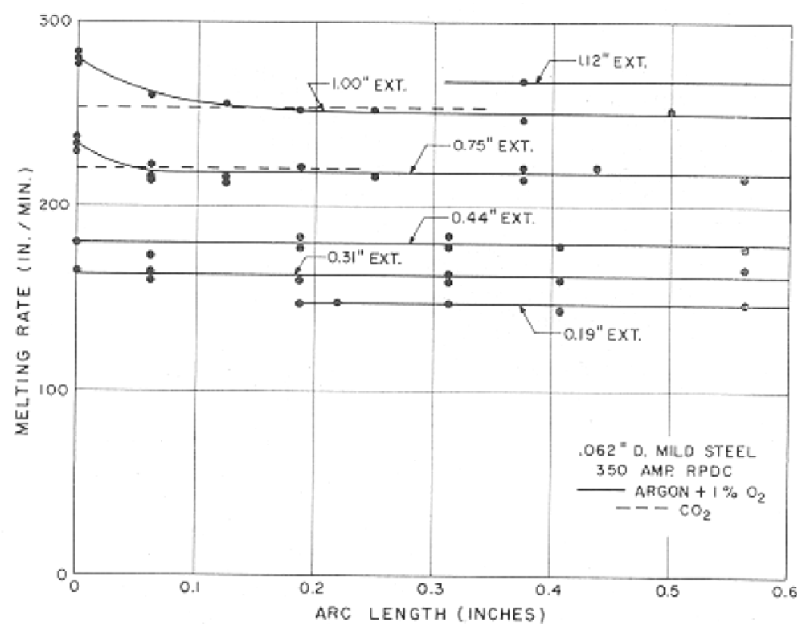


Figura 2.31 – Taxa de fusão em função do comprimento de arco para arame eletrodo de médio carbono e 1,6 mm de diâmetro operando em CC+ com corrente de 350 A (LESNEWICH, 1958b)

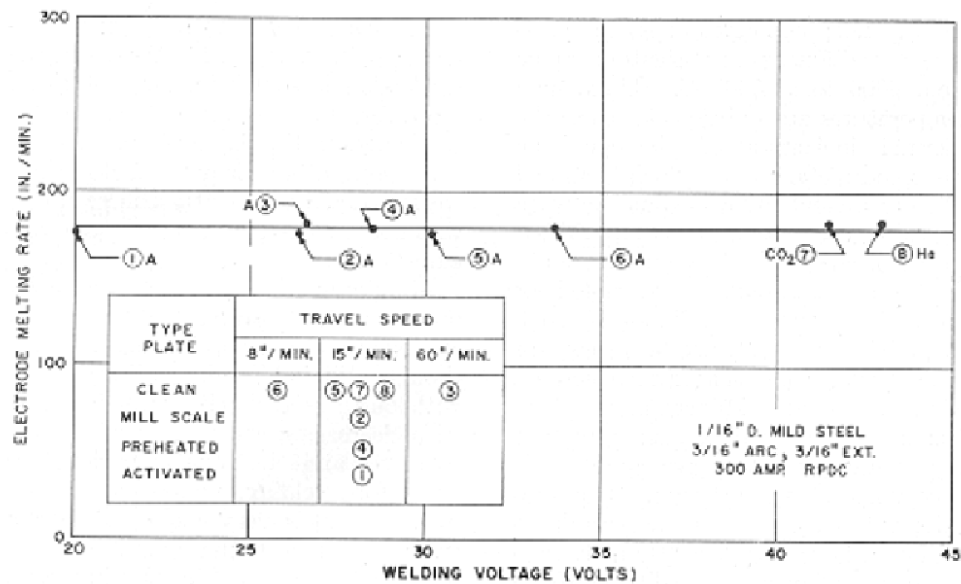


Figura 2.32 – Taxa de fusão em função da tensão de soldagem para chapas de teste com diferentes tratamentos e velocidade de soldagem utilizando arame-eletrodo de médio carbono com 1,6 mm de diâmetro, comprimento de arco de 5 mm e comprimento energizado de eletrodo de 5 mm operando com corrente de 300 A na polaridade CC+ (LESNEWICH, 1958b)

2.3.4. A Equação do Consumo

Os resultados de Lesnewich (1958b) levam a duas equações para taxa de fusão dependente da polaridade utilizada. A Eq. 2.5 para polaridade CC+ e a Eq. 2.6 para polaridade CC-.

$$M_{cc+} = C_a I + C_r I^2 \quad (2.5)$$

$$M_{cc-} = C_c I + C_r I^2 \quad (2.6)$$

Ainda segundo os resultados de Lesnewich (1958b), o coeficiente C_a é dependente do diâmetro do eletrodo e independente do gás de proteção utilizado, do comprimento energizado de eletrodo e da composição do eletrodo. O coeficiente C_c é depende da composição do eletrodo, do comprimento energizado de eletrodo e do gás de proteção. O coeficiente C_r é dependente do diâmetro e da resistividade do material do eletrodo.

Atualmente, a equação de consumo é apresentada de uma forma mais geral e os coeficientes ficam também em função da polaridade (Eq.2.7).

$$C = \alpha I + \beta I^2 \quad (2.7)$$

onde C = consumo (taxa de fusão); α e β são coeficientes análogos aos coeficientes C_a , C_c e C_r .

2.4. Gases de Proteção

São gases injetados na região da soldagem com a finalidade principal de proteger a poça e a gota em transferência. Além da função de proteger, os gases têm a função de estabilizar o arco e características como de influir sobre o modo de transferência metálica, na geometria, nas propriedades mecânicas e características metalúrgicas do cordão de solda. A Fig. 2.33 ilustra os principais efeitos dos gases de proteção em uma soldagem MIG/MAG.

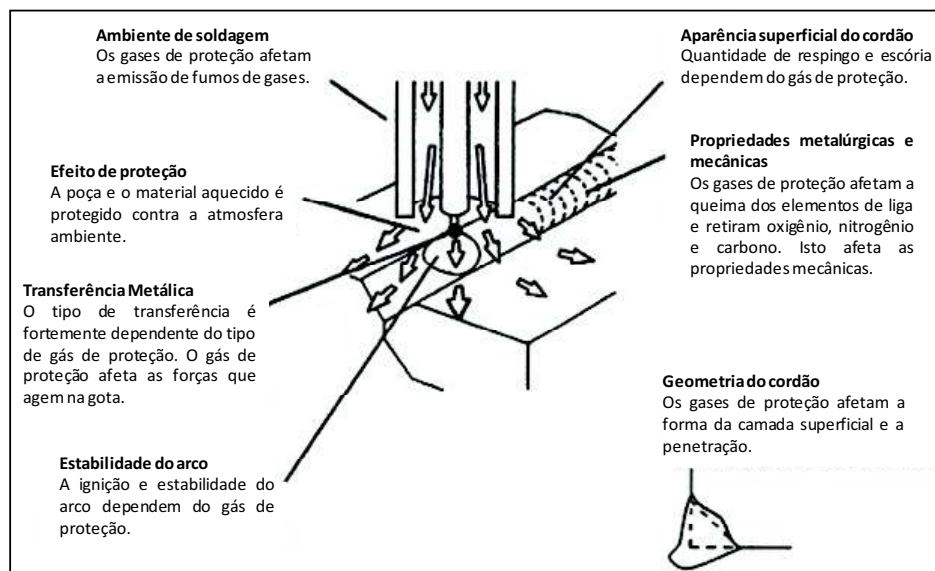


Figura 2.33 – Principais funções dos gases de proteção (modificado SUBAN; TUSEK, 2001)

Os gases para soldagem apresentam como propriedades básicas importantes o potencial de ionização, a condutividade térmica, a dissociação e recombinação, o potencial de oxidação e a densidade do gás. Algumas destas propriedades são apresentadas na Tab. 2.5.

Tabela 2.5 – Propriedades de gases utilizados em soldagem (modificado LARSON, 1990)

Gás	Peso Molecular	Densidade (g/l)	Potencial de Ionização (eV)
Argônio	39,95	1,784	15,7
Dióxido de Carbono	44,01	1,978	14,4
Hélio	4,00	0,178	24,5
Hidrogênio	2,016	0,090	13,5
Nitrogênio	28,01	12,5	14,5
Oxigênio	32,00	1,43	13,2

2.4.1. Propriedades dos Gases

a) Potencial de ionização

É a energia, expressa em elétrons-volts, necessária para remover um elétron de um átomo, fazendo dele um íon. Para todos os outros valores mantidos constantes, o valor do potencial de ionização diminui com o aumento do peso molecular do gás. A abertura e estabilidade do arco são fortemente dependentes do potencial de ionização dos componentes do gás de proteção usados no processo de soldagem. Um gás com um baixo potencial de ionização, como o argônio, transforma átomos em íons facilmente. O hélio, por sua vez, tem um alto potencial de ionização que produz dificuldade para abertura e estabilidade do arco. Embora existam outros fatores envolvidos na manutenção do plasma, os respectivos níveis de energia requeridos para ionizar estes gases devem ser mantidos e, como consequência, a tensão no arco é diretamente influenciada. Para equivalentes comprimentos de arco e corrente de soldagem, a tensão obtida com o hélio é significativamente maior do que com argônio.

b) Condutividade Térmica

A condutividade térmica de um gás é o quão bom este gás é condutor de calor. Isto influencia na perda radial de calor na direção centro-periferia da coluna do arco. Juntamente com o potencial de ionização, esta propriedade determina a tensão de soldagem necessária para manter o arco aberto. Quanto maior a condutividade do gás, maior é a tensão necessária para manter um mesmo arco. Além disso, também influencia a condução de calor para o metal de base e, conseqüentemente, o perfil do cordão. Um exemplo é a comparação entre o hélio e o argônio. O hélio, que tem maior condutividade térmica e produz uma poça de fusão maior e

mais distribuída, enquanto o argônio, que tem menor condutividade térmica, produz um perfil de cordão com maior penetração no centro (Fig. 2.34).

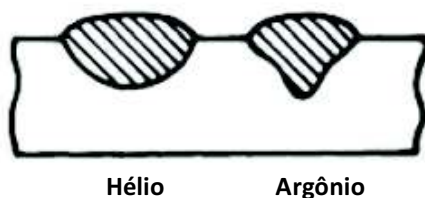


Figura 2.34 – Ilustração do perfil esperado para o cordão de solda quando se utiliza He ou Ar como gás de proteção (modificado CARY, 1989 apud ASM HANDBOOK, 1993)

c) Dissociação e Recombinação Molecular

Ocorrem em gases de proteção como o dióxido de carbono, hidrogênio e oxigênio que são formados de moléculas poliatômicas. Quando aquecidos a altas temperaturas, estes gases têm suas moléculas quebradas, ou dissociam. Nestas temperaturas eles estão parcialmente ionizados, produzindo elétrons livres e fluxo de corrente. Quando o gás dissociado entra em contato com a superfície da peça, que está relativamente fria, os átomos recombinaem e liberam calor neste ponto. Este calor liberado por este tipo de gás devido à recombinação dos átomos provoca um comportamento semelhante ao de gases com alta condutividade térmica, similar ao hélio, por exemplo. A dissociação e recombinação não ocorrem com gases, como o argônio, que são monoatômicos. Então, para uma mesma temperatura de arco, o calor gerado na superfície da peça pode ser consideravelmente maior com gases poliatômicos quando comparados aos gases monoatômicos.

d) Reatividade e Potencial de Oxidação

A natureza oxidante dos gases de proteção afeta o desempenho da soldagem e as propriedades do cordão resultante. 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 e formam a escória na superfície do metal depositado. Isto pode levar a perda de elementos como o manganês e o silício, que podem afetar a qualidade e o custo da soldagem produzida. A resistência do cordão de solda também pode ser afetada pelo gás de proteção. Com aumento

da oxidação natural dos gases de proteção pode ocorrer a diminuição da resistência do cordão (Fig. 2.35).

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. Stebacka e Persson (1989), soldando no modo gótico e utilizando arame-eletrodo de aço médio carbono, citam em seu trabalho 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 . O tamanho da gota é diminuído e o número de gotas transferidas por unidade de tempo aumenta com o aumento da quantidade de oxigênio no gás de proteção. O oxigênio reduz a tensão superficial do cordão de solda fundido, proporcionando melhor molhamento do cordão e maiores velocidades de soldagem. Pequenas adições de CO_2 funcionam de maneira similar. A tensão superficial entre o metal fundido e a atmosfera ao redor tem uma forte influência na forma do cordão. Se a energia superficial é alta, resultará em um cordão convexo e irregular. Baixos valores promovem cordões mais planos com o mínimo de susceptibilidade a mordeduras. Modenesi e Nixon (1994) obtiveram como resultado em seu trabalho sobre estabilidade do arco no processo MIG/MAG, utilizando o arame-eletrodo ER70S-3 de 1,2 mm de diâmetro, 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.

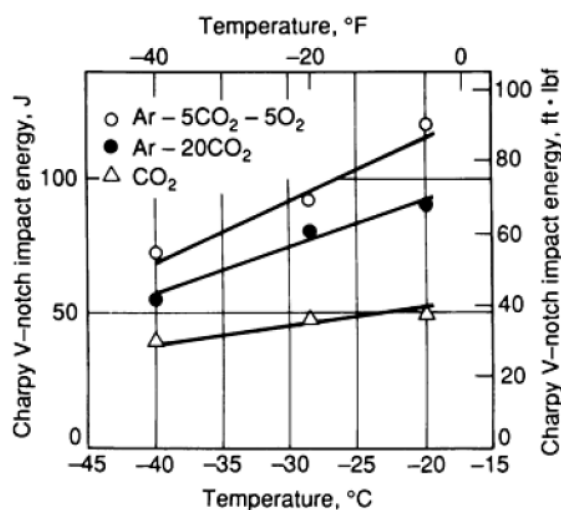


Figura 2.35 – Energia de impacto em função da temperatura para 3 gases de proteção diferentes (STENBACKA; PERSSON,1989)

e) Densidade

É o peso do gás por unidade de volume. A densidade é um dos principais fatores que influenciam a eficiência do gás de proteção. Basicamente, gases mais pesados do que o ar, como o oxigênio e o dióxido de carbono, requerem menor vazão para uso do que gases mais leves, como o hélio, para assegurar uma proteção adequada para a poça de fusão.

Além das propriedades descritas anteriormente, uma importante característica dos gases de proteção é a pureza. Alguns metais, como o aço carbono e o cobre, tem uma alta tolerância a contaminantes. Outros, como o titânio e o zircônio, tem uma baixíssima tolerância para qualquer componente externo contido no gás de proteção. 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.

2.4.2. Argônio (Ar)

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. Ele promove excelente estabilidade, penetração e perfil do cordão quando usado nestes materiais. Seu baixo potencial de ionização resulta em uma fácil abertura de arco. O argônio 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 “fingerlike”.

2.4.3. Dióxido de Carbono (CO₂)

Dióxido de carbono é um gás reativo geralmente usado em aço carbono. É facilmente disponível e relativamente barato. Porém, devido ao CO₂ não promover transferência goticular, a eficiência de deposição torna-se baixa e o nível de respingos e fumos é mais alto do que com misturas de argônio. Segundo Baixo e Dutra (1989), devido à 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. Ainda segundo este autor, em virtude deste

movimento, caso no momento da separação a gota esteja em posição desfavorável ao invés de transferir-se para poça, seja ejetado para fora da região, caracterizando a produção de respingos. Além da maior produção de respingos, o CO_2 produz superfícies de cordões mais oxidadas e irregulares.

2.4.4. Hélio (He)

Devido a sua alta condutividade térmica, ao hélio é creditado promover adicional aporte de calor ao material de base enquanto mantém uma atmosfera inerte. A molhabilidade, profundidade de fusão e velocidade de soldagem são maiores quando comparados com argônio. Esta vantagem é mais freqüentemente utilizada na soldagem de chapas espessas de alumínio, magnésio e ligas de cobre.

2.4.5. Argônio-Oxigênio

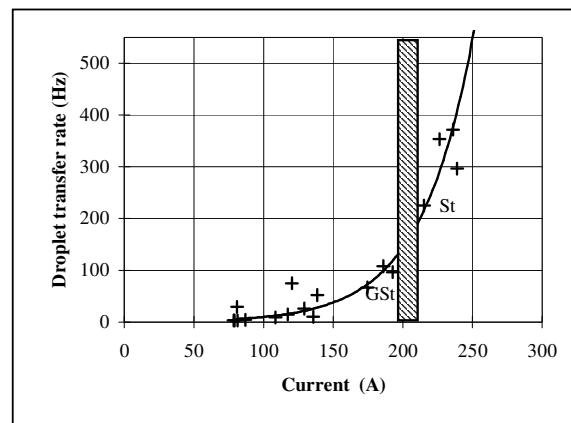
A adição de pequenas quantidades de oxigênio em argônio confere uma grande estabilidade ao arco de soldagem, diminui a corrente de transição e influencia no formato do cordão. Scotti (2000) apresenta em seu estudo resultados (reproduzidos na Fig. 2.36) que mostram haver queda da faixa de corrente de transição com a adição de apenas 1 e 2% de O_2 em Ar, utilizando arame-eletrodo ER308L de 0,889 mm de diâmetro. Modenesi e Nixon (1994) também obtiveram como resultado experimental a diminuição da corrente de transição para adição de até 5% de O_2 , porém, diferentemente de Scotti (2000), utilizando o arame-eletrodo de aço ER70S-3 de 1,2 mm de diâmetro.

As misturas Ar- O_2 mais comuns contêm 1, 2 e 5% de O_2 em argônio. O aumento da quantidade de oxigênio além de melhorar a estabilidade do arco, torna possível o aumento da velocidade de soldagem pelo aumento da fluidez da poça.

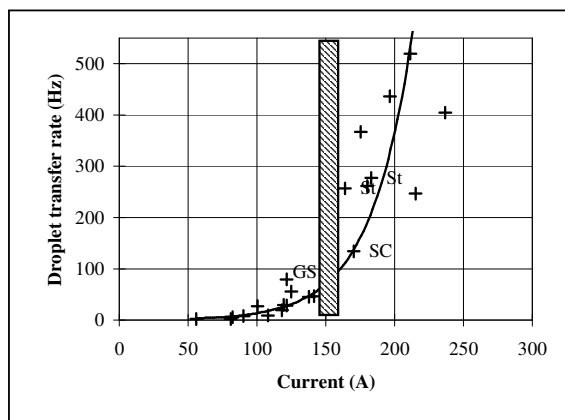
2.4.6. Argônio-Dióxido de Carbono

Estas misturas são principalmente usadas para aços ao carbono e baixa-liga e tem uso limitado para aço inoxidável. A adição de CO_2 em argônio produz resultados similares à adição de oxigênio, mas também a penetração é aumentada quando o teor de CO_2 é aumentado. As misturas mais comuns para transferência goticular são argônio mais 5, 8 e 10% ou de 12 a 25% de CO_2 . Zielinska et al (2008) variaram a quantidade de CO_2 em argônio para mostrar a influência do CO_2 na tensão do arco (Fig. 2.37). Estes resultados são devidos a uma maior necessidade de energia para manutenção do arco com CO_2 , quando comparado

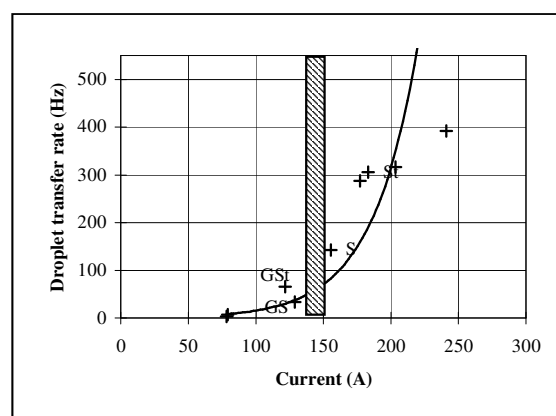
com Ar, por causa da sua maior capacidade de troca de calor. Estes mesmos autores fizeram imagens do arco com várias misturas de Ar + CO₂, mostradas na Fig. 2.38. Ainda segundo estes autores, quando a quantidade de CO₂ excede 9%, pode-se observar claramente uma mudança no destacamento das gotas, o arco perde estabilidade, são produzidos mais respingos e a formação de fumos aumenta. Eles observaram também que a forma do arco é significativamente modificada quando a porcentagem de CO₂ excede 12%.



100% Ar – $I_t = 190-210$ A



Ar + 1%O₂ – $I_t = 140-160$ A



Ar + 2%O₂ – $I_t = 130-150$ A

Figura 2.36 – Taxa de transferência das gotas em função da corrente. Influência da adição de oxigênio no gás de proteção na soldagem de aço inoxidável, utilizando eletrodo AWS ER308L de 0,889 mm de diâmetro, DBCP de 13 mm. I_t = Faixa de corrente de transição. GS = Globular-Goticular, St = Goticular com alongamento, S = Goticular, SC = Curto-circuito (SCOTTI, 2000)

Resultados experimentais de Ushio et al (1995), utilizando arame-eletrodo de aço médio carbono (JIS YCW-1) com DBCP de 25 mm e comprimento de arco de 6 mm, mostram que a corrente de transição aumenta para teores maiores de 5% de CO_2 . Foi observado também, por estes autores, que com a adição de até 10% de CO_2 a transferência globular ocorreu normalmente e acima desta quantidade a transferência passou a ser globular repulsiva. Os autores afirmam ainda que estes resultados indicam que a introdução de CO_2 no gás de proteção aumenta a força que age no arame fundido. Para valores acima de 30% de CO_2 , resultados de Aqusa e Yamauchi (1981 apud STENBACKA; PERSSON, 1989) mostram que transferência goticular não pôde ser obtida (Fig. 2.39).

Com o aumento de CO_2 , a maior fluidez da poça permite velocidades de soldagem mais altas. Misturas com maiores níveis de dióxido de carbono podem ser usadas para transferência por curto-circuito, comumente argônio mais 20 ou 25% de CO_2 . Porém, Stenbacka e Persson (1989) citam em seu trabalho que suas pesquisas mostram que mais que 15% de CO_2 no gás de proteção desestabiliza a transferência metálica e aumenta a quantidade de respingos. Resultados de Aqusa e Yamauchi (1981 apud STENBACKA; PERSSON, 1989) também mostram que o aumento do teor de CO_2 em Ar aumenta a geração de respingos (Fig. 2.40).

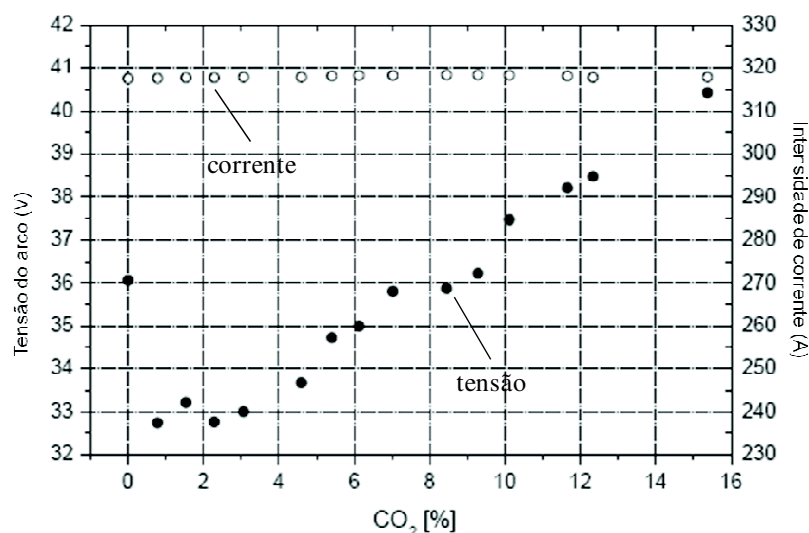


Figura 2.37 – Influência da adição de CO_2 em Ar na tensão de soldagem para o processo operando no modo corrente constante com velocidade de alimentação de 9 m/min e DBCP de 20 mm, na soldagem de aço carbono (modificado ZIELINSKA et al, 2008)

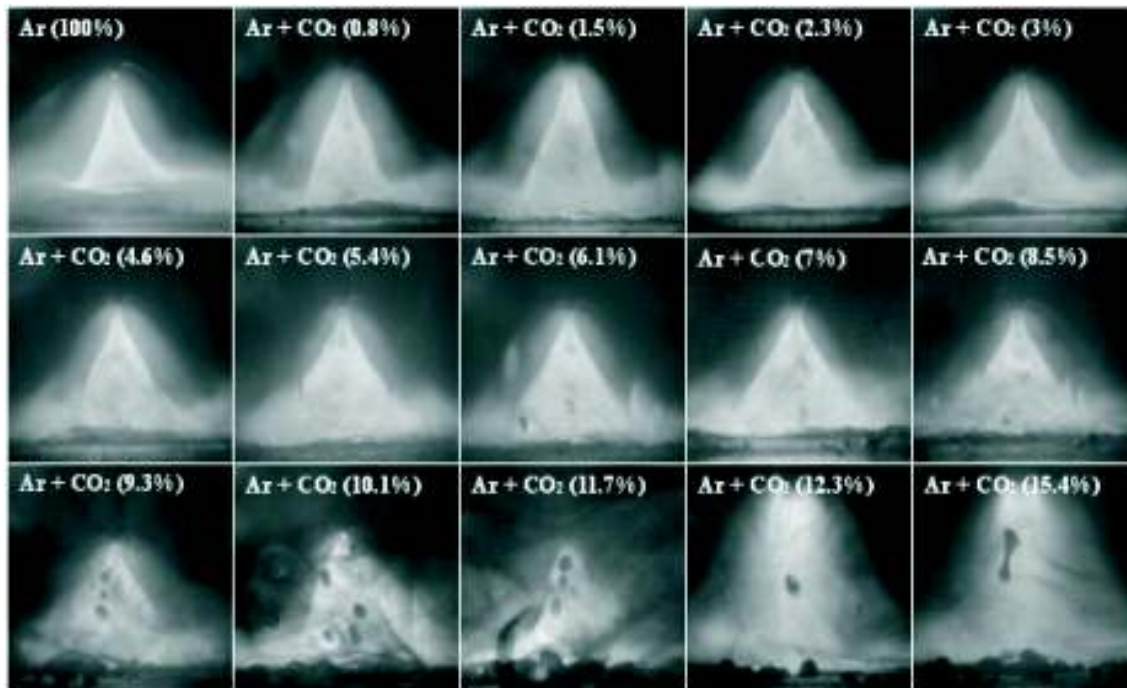


Figura 2.38 – Formato do arco para diferentes misturas do gás de proteção com o processo operando no modo corrente constante com velocidade de alimentação de 9 m/min e DCPB de 20 mm, na soldagem de aço carbono (ZIELINSKA et al, 2008)

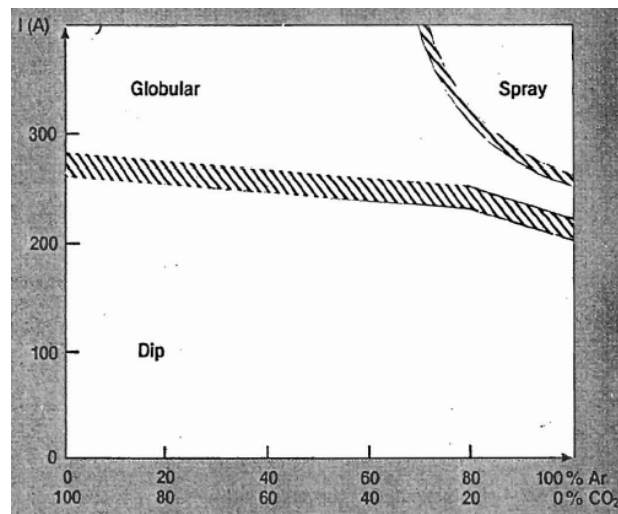


Figura 2.39 – Efeito da composição do gás de proteção no modo de transferência metálica, para soldagem MIG/MAG convencional utilizando arame-eletrodo maciço (modificado AQUISA E YAMAUCHI, 1981 apud STENBACKA; PERSSON, 1989)

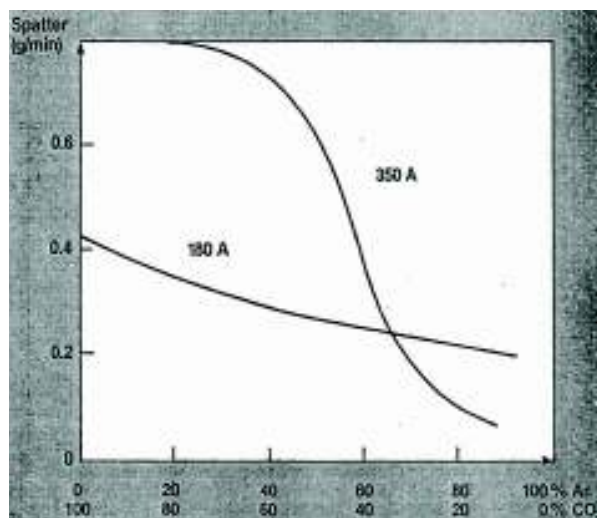


Figura 2.40 – Efeito da composição do gás de proteção (eixo x) na taxa de geração de respingos (eixo y), para soldagem MIG/MAG convencional utilizando arame-eletrodo maciço (modificado AQUISA E YAMAUCHI, 1981 apud STENBACKA; PERSSON, 1989)

2.5. Espectroscopia de Emissão

A espectroscopia é um conjunto de técnicas experimentais, para medição da radiação eletromagnética de átomos ou moléculas, relacionadas à absorção, emissão ou espalhamento. Entre as técnicas existentes de medição, neste trabalho será utilizada a espectroscopia de emissão. Segundo Barbosa (2007) a espectroscopia de emissão é uma importante técnica para identificação de espécies atômicas, moleculares e iônicas formadas em plasma e suas quantidades relativas quando os parâmetros de descarga são variados. A espectrometria de emissão é uma técnica não evasiva, que tem como vantagem principal a de estudar o plasma sem perturbar as condições originais pela introdução de um corpo estranho alterando a condição de equilíbrio.

2.5.1. Plasma

O primeiro cientista a iniciar as pesquisas efetivas sobre plasma foi Michael Faraday, em 1830. Ele começou a realizar estudos sobre descargas elétricas na atmosfera e seus efeitos nas reações químicas induzidas. Durante suas pesquisas, ele observou estruturas gasosas luminosas, que indicavam um novo estado da matéria. Com a descoberta do elétron e o aperfeiçoamento dos tubos de descarga a vácuo, estudos com gases à baixa pressão, conduzidos pelos cientistas Langmuir e Crookes, permitiram a elaboração dos primeiros

modelos teóricos para ionização, recombinação, difusão, colisões elétron-íon e a formação de íons negativos. Porém, o termo plasma só foi utilizado algum tempo depois (1926), por Irving Langmuir e H. Mott-Smith, para designar gases ionizados.

Considerado como o quarto estado da matéria, o plasma difere-se dos sólidos, líquidos e gasosos por ser um gás parcialmente ionizado. É constituído por um conjunto quase neutro de partículas eletricamente carregadas, formado pela ionização de átomos e moléculas por excitação energética de radiações eletromagnéticas, como calor (radiação térmica), microondas e etc. Este processo faz com que haja a formação de íons que durante a recombinação de seus elétrons emitem radiação visível ou não.

O arco elétrico, que é a fonte de calor utilizada na soldagem a arco, é formado por uma descarga elétrica entre dois eletrodos. Esta descarga entre os eletrodos ioniza o gás e o transforma em plasma. Assim, pode-se considerar que o arco elétrico é uma fonte de plasma para análise espectroscópica.

2.5.2. Princípio da Espectroscopia de Emissão

O plasma do arco elétrico sofre uma contínua ionização pela colisão de elétrons livres nos átomos não ionizados. Devido a estas frequentes colisões ocorre um processo intenso de excitação e relaxação dos átomos e moléculas, conseqüentemente, absorção e emissão de energia. Quando um átomo absorve energia ocorre a excitação de um elétron que busca um nível de energia superior. De acordo com Barbosa (2007), em uma fração de segundos ($\sim 10^{-8}$) o elétron volta para um estado de mais baixa energia (relaxação). Ainda segundo este autor, este processo ocorre entre dois níveis quânticos e depende da probabilidade de transição e das regras de seleção deduzidas pela equação de Schrödinger. A energia emitida na relaxação é conhecida como fóton e tem uma determinada frequência ou comprimento de onda. Segundo Bebian (2008), um dado elemento químico pode se apresentar em vários comprimentos de onda diferentes, porém, eles são exclusivos, ou seja, um determinado comprimento de onda observado está diretamente relacionado a somente um elemento químico. Como existe mais de um elemento químico no arco elétrico, por exemplo, em função do gás de proteção, ocorre uma sobreposição das linhas de emissão dando origem ao espectro de emissão. Um exemplo de um espectro emitido no processo de soldagem é mostrado na Fig. 2.41.

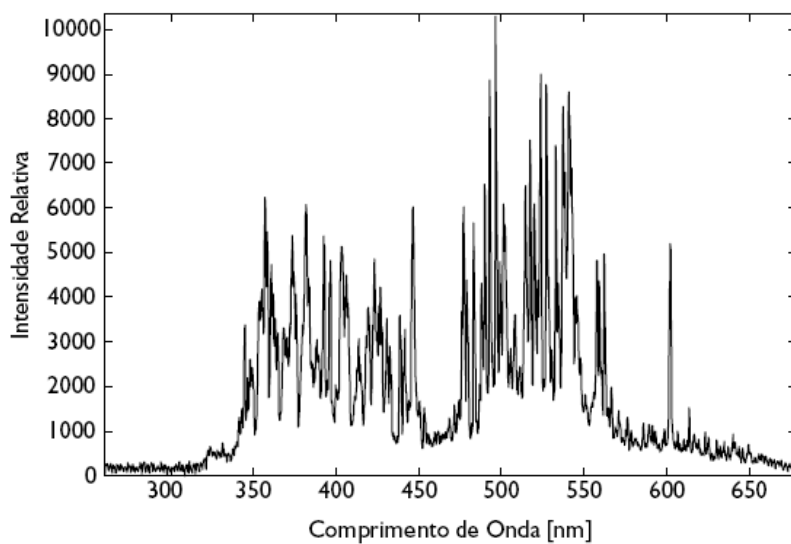


Figura 2.41 – Espectro emitido pelo arco de uma soldagem sobre uma placa de cobre resfriada à água e utilizando o processo TIG com gás de proteção Ar puro (MENDONÇA; ALFARO; BORGES, 2007)

2.5.3. Espectroscopia na Soldagem

Vários pesquisadores já utilizaram a técnica da espectroscopia para análise do arco elétrico na soldagem. Na revisão de um de seus trabalhos sobre o assunto, Mendonça; Alfaro; Borges (2007) citam pesquisadores que aplicaram a espectroscopia para determinação da composição e/ou detecção de possíveis contaminações da solda, seleção e qualificação de métodos de proteção gasosa e estudo do grau de dissolução de solda com metais dissimilares. Geralmente esta técnica é utilizada para o estudo do arco elétrico dentro do campo de estudo da física do arco. Por exemplo, Lacroix; Boudot; Jeandel (1999) utilizaram a espectroscopia para o cálculo da temperatura do plasma. Eles capturaram o espectro do plasma na soldagem de diferentes metais e, através da lei de Boltzmann, calcularam a temperatura. A Fig. 2.42 apresenta o espectro emitido pelo plasma na soldagem de aço e a Fig. 2.43 as temperaturas resultantes do plasma na soldagem dos diferentes metais. Hiraoka; Shiwaku; Ohji (1997) também determinaram temperaturas do plasma na soldagem utilizando espectroscopia, porém encontraram problemas na sua determinação usando diferentes métodos. Eles realizaram soldagens com o processo TIG utilizando proteção com Ar puro e mistura de Ar + H₂ e utilizaram como métodos de cálculo da temperatura o método de Fowler-Milne, método da intensidade relativa da razão das linhas de ArII/ArI e o método de Boltzmann. Como resultado, os autores detectaram discrepâncias nos valores de temperatura e também

limitações dos métodos. Já Alfaro; Carvalho; Matos (2005) utilizaram a espectroscopia para monitoramento da qualidade do cordão de solda em soldagem MIG/MAG. Eles monitoraram a soldagem através da temperatura dos elétrons dos elementos Fe e Mn, presentes na coluna do arco de soldagem, e utilizaram o método de Boltzmann para o cálculo da temperatura.

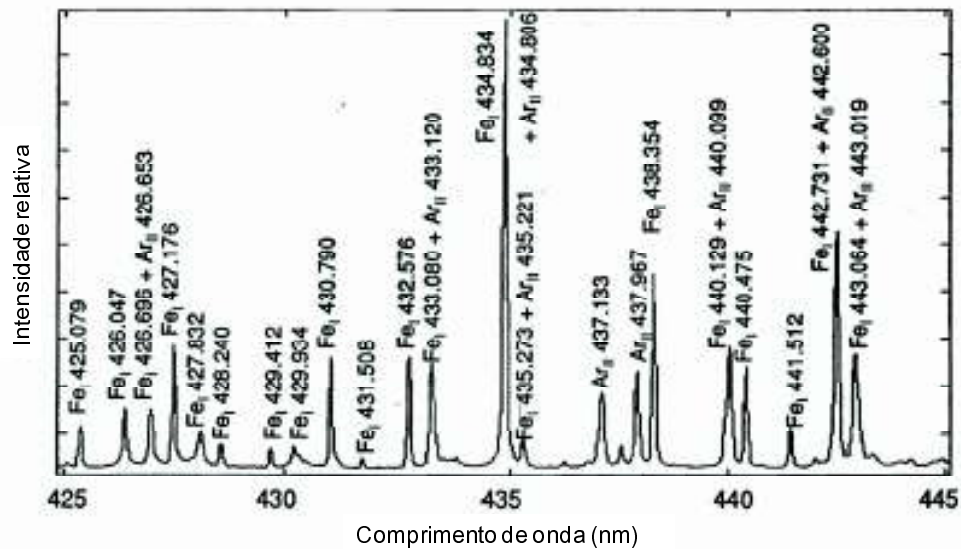


Figura 2.42 – Espectro obtido na soldagem sobre uma chapa de aço utilizando o processo TIG e proteção por Ar puro. $U = 10$ V, $I = 210$ A e velocidade de soldagem de 3 in/min (modificado LACROIX; BOUDOT; JEANDEL, 1999).

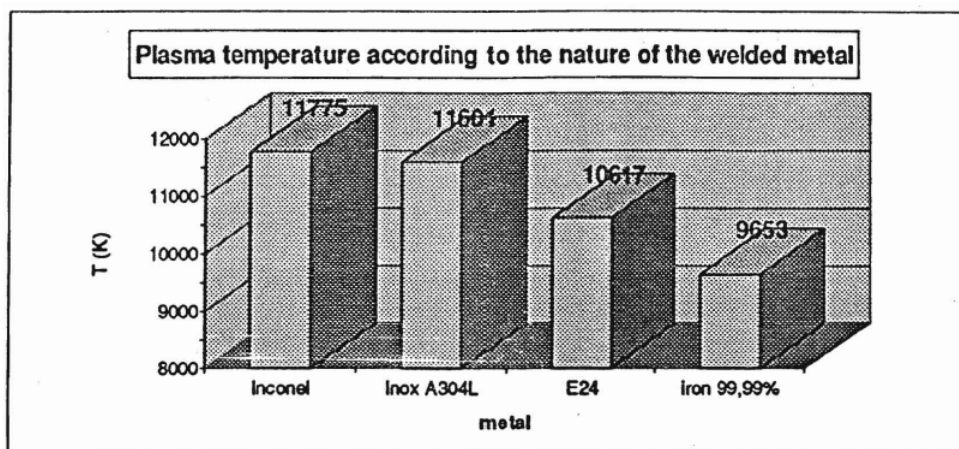


Figura 2.43 – Temperatura do plasma na soldagem de diferentes materiais de base utilizando o processo TIG e proteção por Ar puro. $U = 10$ V, $I = 210$ A e velocidade de soldagem de 3 in/min (LACROIX; BOUDOT; JEANDEL, 1999).

Porém, no presente trabalho propõe-se a utilização da espectroscopia visando questões de saúde e segurança do trabalhador de soldagem. Por isto, a espectrometria será utilizada simplesmente para obtenção da intensidade e composição da radiação emitida, ou seja, para obter o espectro emitido pelo arco. Rossi e Vilarinho (2008) mostraram em um trabalho diferenças na intensidade de radiação emitida por vários processos de soldagem (Fig. 2.44). Tais diferenças implicam na existência de processos mais ou menos agressivos ao soldador.

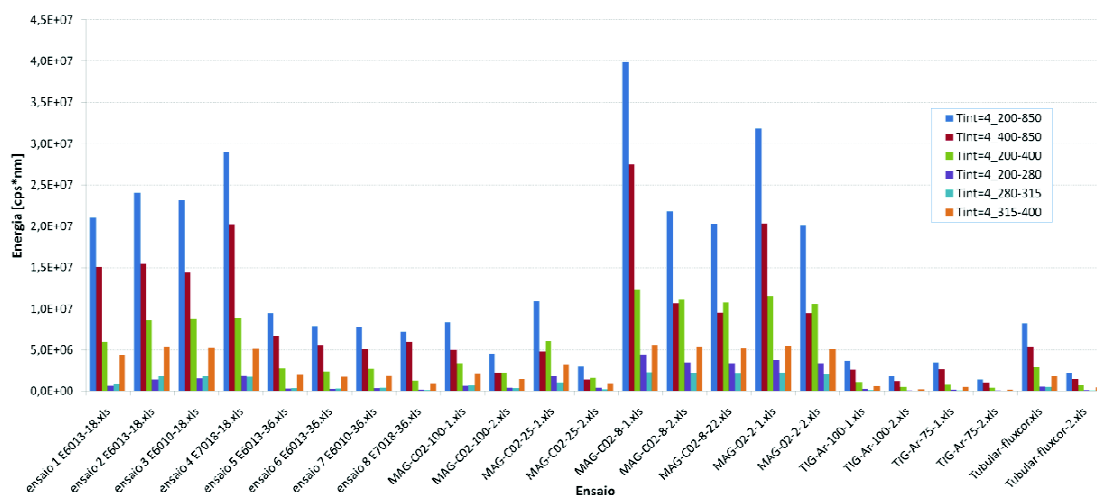


Figura 2.44 – Radiação emitida por faixas de comprimento de onda em nm com espectrômetro posicionado a 1 m do arco. Cada ensaio corresponde a um processo ou condição de soldagem diferente. O maior nível de radiação ocorreu para o ensaio MAG-CO2-8-1, ou seja, processo MIG/MAG utilizando arame-eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, proteção gasosa de Ar + 8%CO₂, 32 V, 277 A, DBCP = 22 mm e velocidade de alimentação de 6,8 m/min. Tint=4 quer dizer que o tempo de exposição da CCD do espectrômetro foi de 4 ms (ROSSI; VILARINHO, 2008)

A intensidade e o tipo de radiação (comprimento de onda) podem causar vários problemas à saúde dos soldadores. Problemas estes relacionados à pele, olhos e até mesmo à fertilidade. Figueiredo e Kobayashi (2007) citam e descrevem como patologias que podem ser causadas aos olhos, pela exposição à radiação, a catarata, a phothotalmia (conhecida como “flash” do soldador), ceratide (inflamação da córnea) e o pterígio (que é a degeneração do tecido fibrovascular da córnea). Em seu estudo estes autores verificaram a ocorrência de pterígio em trabalhadores que exercem atividades em ambientes de soldagem. Foi realizada a verificação da doença em 65 trabalhadores sendo 21 soldadores e 44 pessoas que trabalhavam

no mesmo ambiente dos soldadores. Um dos resultados obtidos indica que os trabalhadores que trabalham no mesmo ambiente dos soldadores apresentam maior ocorrência de pterígio. Em relação à ocorrência de pterígio em soldadores a Fig. 2.45 apresenta os resultados. Rossi e Vilarinho (2008 apud MORTENSEN, 1988) citam o aumento dos riscos de anomalias de fertilidade em soldadores baseado em um estudo com 1255 trabalhadores masculinos. Rossi e Vilarinho (2008 apud BONDE, 1992) também citam um estudo que comprova uma diminuição não permanente, mas significativa, na qualidade do sêmen dos soldadores pela análise do material de 17 soldadores que trabalhavam devidamente protegidos.

Deste modo, fica evidenciada a importância de se estudar os níveis de radiação emitidos pelo arco de soldagem.

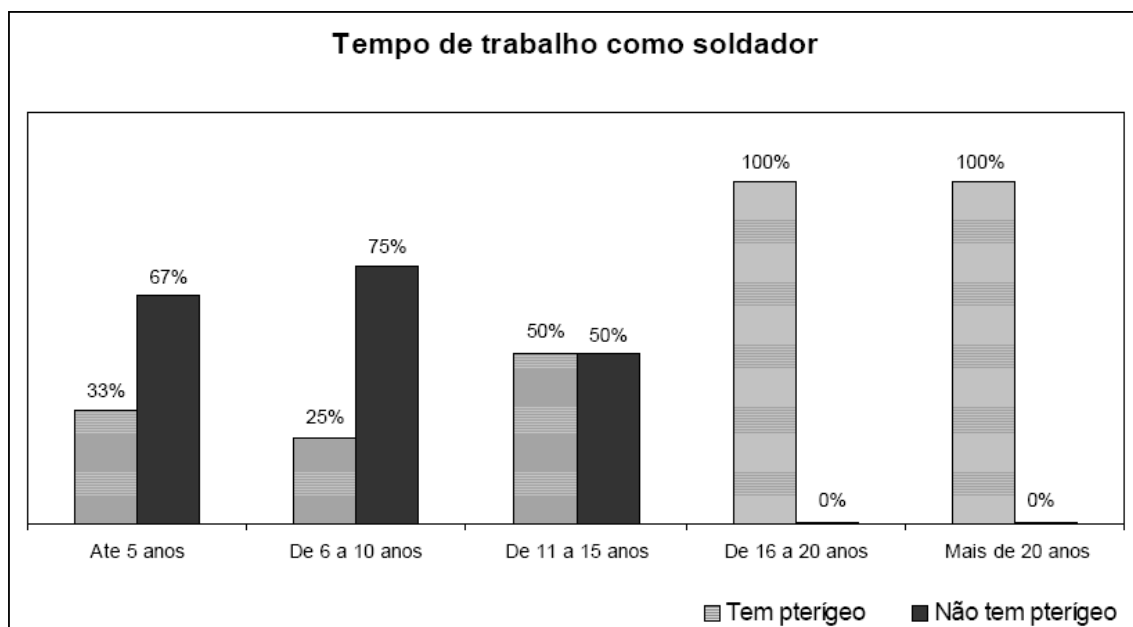


Figura 2.45 – Ocorrência de pterígio em soldadores em função do tempo de profissão (FIGUEIRÊDO; KOBAYASHI, 2007)

2.5.4. Efeito da Radiação no Corpo Humano

A radiação que apresenta efeito mais danoso ao ser humano é a Ultravioleta (UV). Ela representa uma pequena porção do espectro eletromagnético (Fig. 2.46), e subdivide-se em três faixas:

- 200 – 280 nm: UV-C (Ultravioleta remoto ou germicida);
- 280 – 315 nm: UV-B (Ultravioleta intermediário);

- 315 – 400 nm: UV-A (Ultravioleta próximo ou luz negra).

Segundo Schaberle e Silva (2000), o DNA, portador da informação genética na célula, devido à sua estrutura molecular, absorve radiações na faixa do UV. O máximo de absorção se dá em torno de comprimentos de onda da ordem de 260 nm (UV-C), sendo este o mais danoso aos seres vivos, diminuindo para comprimentos de onda maiores (UV-B e UV-A). Os raios UV interagem, portanto, diretamente com o DNA, podendo provocar sérias alterações nos seres vivos (eritemas, bronzeamento, diminuição da resposta imunológica, indução do câncer de pele etc.).

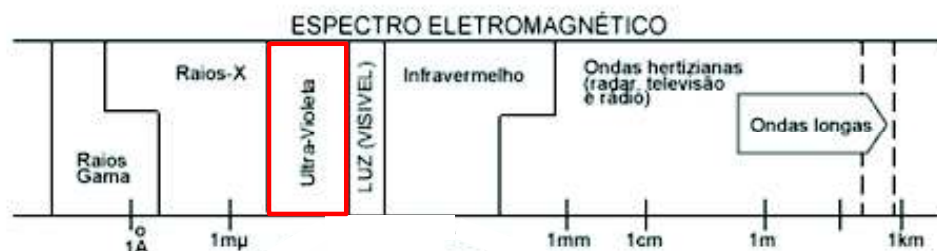


Fig. 2.46 – Espectro eletromagnético com detalhe para faixa de radiação ultravioleta 200-400 nm (modificado TENG, 2010)

2.6. Ciclo Térmico

Ciclo térmico de soldagem é a variação da temperatura com o tempo em um determinado ponto do material de base. Assim, existem infinitos ciclos térmicos em função da posição em que a temperatura foi medida. A Fig. 2.47 representa um ciclo térmico, onde, segundo Modenesi; Marques; Santos (2006) podem ser vistos os principais parâmetros que o descrevem:

- Temperatura de pico (T_p): É a temperatura máxima atingida em um ponto;
- Tempo de permanência (t_c) acima da Temperatura Crítica (T_c): É o tempo de permanência acima da temperatura de transformação de 727 °C, para o diagrama de Fe-C;

- Taxa de resfriamento (ϕ): É a velocidade de resfriamento do material em um ponto. Este parâmetro é importante na determinação da microestrutura em materiais como os aços estruturais comuns, que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento. Em uma dada temperatura, a velocidade de resfriamento é dada pela inclinação da curva do ciclo térmico nesta temperatura. Normalmente a taxa de resfriamento é definida entre as temperaturas de 800 – 500 °C, onde, segundo Chakravarti, Thibau, Bala (1985) é a faixa de temperatura que o calor latente de transformação é liberado.

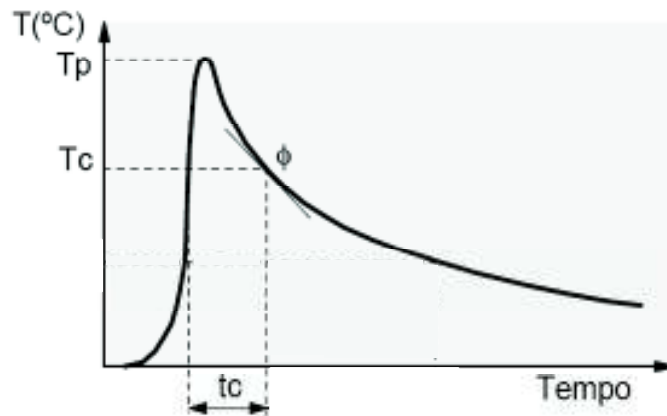


Figura 2.47 – Ilustração de um ciclo térmico de soldagem, onde T_p = temperatura de pico; T_c = temperatura crítica, t_c = tempo acima da temperatura crítica e ϕ = taxa de resfriamento (modificado MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)

Segundo Araújo (2008), existem diversos parâmetros operacionais que podem influenciar o fluxo de calor e conseqüentemente o ciclo térmico. Entre eles destacam-se a condutividade térmica, a espessura e geometria da junta e a energia de soldagem.

A energia de soldagem (E) (Eq. 2.8) representa a potência (P) gerada na fonte por unidade de comprimento de cordão de solda.

$$E = \frac{P}{v} \quad (2.8)$$

onde v = velocidade de soldagem.

O aumento da energia de soldagem diminui a taxa de resfriamento, ou seja, aumenta o tempo de resfriamento (Figs. 2.48 e 2.49).

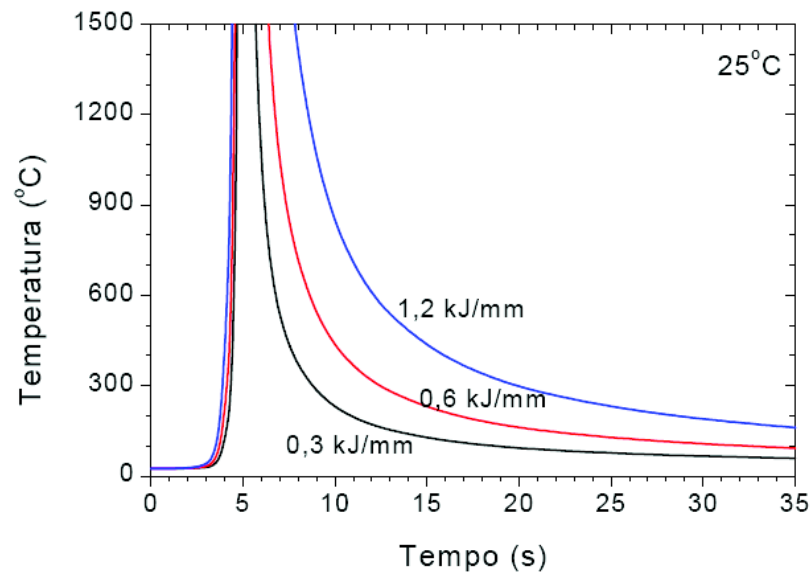


Figura 2.48 – Curva de velocidades de resfriamento para diferentes valores de energia de soldagem. Condições de soldagem não informadas (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2006)

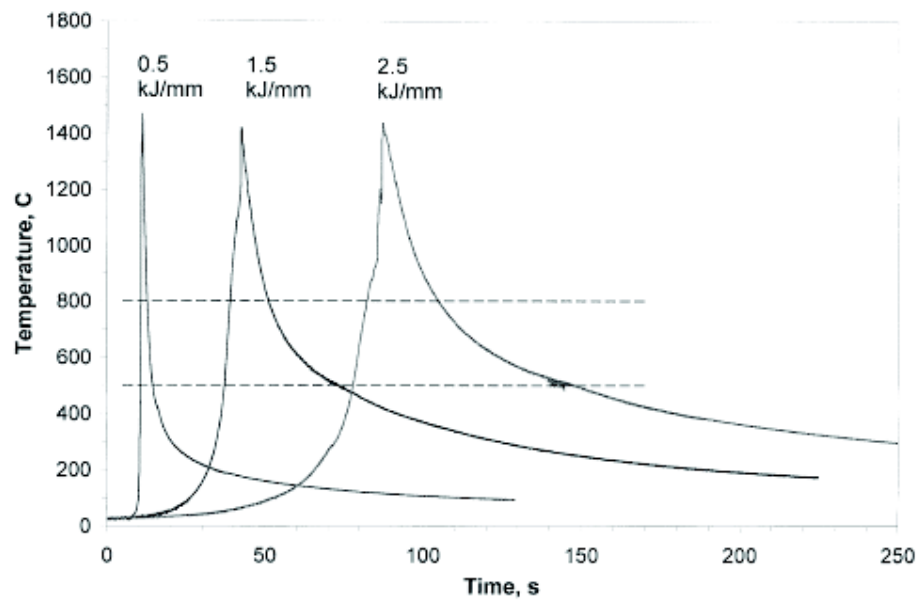


Figura 2.49 – Curva de velocidades de resfriamento (temperatura versus tempo) para diferentes valores de energia de soldagem. Soldagem de aço microligado utilizando processo TIG operando com tensão de 12,2 V, corrente de 150 A e velocidades de soldagem de 3,6, 1,2 e 0,7 mm/s (POORHAYDARI; PATCHETT; IVEY, 2005)

A importância do conhecimento do ciclo térmico de soldagem reside na possibilidade de se prever a microestrutura pela taxa de resfriamento do material. Isto é importante, pois a microestrutura determina a dureza e resistência do material. Por exemplo, pode-se escolher um gás de proteção ou regulagem do processo que confira uma maior ou menor energia de soldagem e, desta forma, se obtenha um ciclo térmico com maior ou menor taxa de resfriamento em função da microestrutura desejada. É verdade que para se prever a microestrutura da região fundida, seria necessário a medição do ciclo térmico nesta. Porém, a medição do ciclo em uma região adjacente pode determinar comparativamente se as condições e regulagens de soldagem promovem ciclos térmicos com maiores ou menores valores de taxas de resfriamento.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

3.1. Descrição do Mapa Operacional de Transferência Metálica como Proposto

É uma região de transferência metálica específica, de curto-circuito ou goticular, dentro da qual as regulagens de parâmetros levam à soldagem com estabilidade operacional (daqui em diante referenciadas como região de estabilidade operacional). Tais regiões apresentam com característica soldagens com comprimento de arco e correntes adequadas, nível de ruído homogêneo e estável, acabamento de cordão regular e geração de respingos baixa e em dimensões finas e constantes. Estes mapas também possuem um mecanismo para previsão de alteração da região de estabilidade operacional frente a mudanças na DBCP e na indutância. Um segundo mecanismo presente, permite a verificação do desempenho em relação geometria e acabamento do cordão, rendimento de deposição, emissão luminosa e calor imposto (ciclo térmico) quando regulados os parâmetros dentro e fora da região de estabilidade operacional.

3.2. Premissas para Desenvolvimento dos Mapas

Como objetivo do trabalho é confeccionar mapas operacionais de transferência metálica nos modos curto-circuito e goticular (“spray”), para que o mesmo seja alcançado foi, inicialmente, necessário o estabelecimento de premissas que direcionasse a elaboração da metodologia proposta. A principal premissa é a utilização de condições de soldagem o mais próximo possível das usadas no ambiente fabril. Uma segunda premissa é a de que se possam

comparar os cordões resultantes para fins de efeitos de geometria. Assim, propõem-se os seguintes requisitos para atender essas premissas:

- Usar as condições mais próximas como são usadas na prática:
 - a. Trabalhar com o modo de operação da fonte em tensão constante;
 - b. Trabalhar com juntas ao invés de soldas de simples deposição sobre chapa;
 - c. Trabalhar com espessuras de chapas distintas e adequadas para cada tipo de transferência;
 - d. Trabalhar com gases de proteção utilizados na prática e adequados a cada tipo de transferência;
 - e. Trabalhar com ângulo de ataque da tocha.
- Que cada mapa seja obtido de forma individual e específico para transferências por curto-circuito e goticular, com a regulagem das faixas de corrente e das DBCPs adequadas para cada modo de transferência;
- Usar mesma quantidade de material depositado por unidade de comprimento para um dado tipo de transferência nas condições de mesmo tipo de transferência (mais realista, pois na prática o que se faz é encher um chanfro e a dimensão do cordão não tem muita tolerância).

3.3. Estabelecimento e Procedimentos para Viabilização das Premissas do Trabalho

3.3.1. Modo de Operação da Fonte em Tensão Constante

Quanto ao modo de operação, as fontes de soldagem podem operar, fundamentalmente, em dois modos; tensão constante e corrente constante. Assim, para este estudo utilizar-se-á a fonte no modo de tensão constante, pois este é o modo comumente usado na prática. A escolha deste modo de operação da fonte também reflete no modo de apresentação do mapa de transferência. Neste modo de operação, o soldador/operador regula como parâmetros de soldagem a velocidade de alimentação de arame e a tensão de referência de controle do equipamento (doravante denominada tensão de regulagem), conseqüentemente definindo-se a corrente e tensão de soldagem. Porém, do ponto de vista de soldagem, a tensão de soldagem é mais significativa do que a tensão de regulagem. Assim, os mapas foram construídos com estes dois parâmetros, ou seja, foram mapas de velocidade de alimentação

versus tensão de soldagem (o operador poderá utilizá-los mais facilmente, provavelmente mesmo com outros equipamentos).

A fonte de soldagem utilizada será do tipo eletrônica, apesar das fontes convencionais serem mais utilizadas na prática, devido a indisponibilidade de uma fonte convencional que atendesse os requisitos técnicos necessários para o trabalho em questão. Assim, decidiu-se que, inicialmente, a indutância (que em fontes eletrônicas é chamada de fator de amortecimento da corrente), parâmetro de extrema importância em transferências por curto-circuito, ficaria em um valor de regulação fixo e seria, posteriormente, medido juntamente com os outros valores de regulação da indutância.

3.3.2. Juntas ao invés de Soldas de Simples Deposição sobre Chapa e Seleção de Espessura de Chapas Adequadas para Cada Tipo de Transferência

Como na prática não se utiliza soldas de simples deposição, para realização da análise geométrica do cordão e medição do rendimento de deposição, adotou-se dois tipos de juntas muito utilizadas em soldagens na posição plana; juntas de topo em I e juntas de topo com chanfro. As espessuras das chapas utilizadas para confecção das juntas e as dimensões geométricas das juntas (folga, nariz, ângulo de chanfro, etc.) foram escolhidas em função do tipo de transferência e condições de soldagens utilizadas (nível de corrente, tipo de gás, etc.), sempre em função daquilo que é normalmente utilizado na prática. Porém, para determinar as dimensões exatas das placas de teste, soldagens exploratórias foram realizadas nas condições mais críticas de penetração para cada modo de transferência proposto (maior valor de corrente associado ao gás de proteção que desse maior aporte de calor).

3.3.3. Gases de Proteção Utilizados na Prática e Adequado ao Tipo de Transferência

Os gases de proteção foram escolhidos em função do que se é mais utilizado na prática, porém levando em consideração o tipo de transferência metálica que se quer obter. Assim, ficaram definidas as misturas Ar + 8%CO₂, Ar + 15%CO₂ e Ar + 25%CO₂ para transferência no modo por curto-circuito e Ar + 8%CO₂, Ar + 15%CO₂ e Ar + 5%O₂ para transferência no modo goticular.

3.3.4. Ângulo da Tocha Usado na Prática para cada Espessura de Chapa

Outro parâmetro de soldagem imperativo para tornar o estudo prático é o ângulo de ataque utilizado na tocha em soldagem semi-automática, mesmo que neste trabalho foi

adotada a soldagem automática (para evitar a variável soldador). É sabido que em soldagens manuais o soldador utiliza o ângulo de ataque de modo a puxar ou empurrar a poça de metal líquido. Assim, em função da espessura da chapa utilizar-se-á o ângulo de ataque da tocha puxando ou empurrando.

3.3.5. Criação de Mapas Específicos para Transferências por Curto-Circuito e Goticular

Os mapas de transferência normalmente encontrados na literatura são confeccionados com todos os modos de transferência (mapas completos). Porém, acredita-se que esta não seja uma boa forma de apresentá-los, pois, o tipo de transferência metálica que se pretende utilizar nas soldagens determina, na prática, a faixa de distância bico de contato-peça (DBCP) adequada. Assim, para uma DBCP fixa não se obtém, de modo satisfatório, todos os modos de transferência metálica possíveis.

Pelos motivos apresentados, propõem-se a confecção de dois mapas de transferência metálica separados, transferência por curto-circuito e goticular (utilizando as DBCPs e faixas de corrente usuais para cada modo), que na prática são os modos utilizados para soldagens MIG/MAG. Para a confecção do mapa de curto-circuito, utilizou-se a DBCP de 12 mm e uma faixa de corrente entre 100 e 200 A. Já para o mapa de transferência goticular, utilizou-se uma DBCP de 18 mm e uma faixa de corrente de vai da corrente de transição até aproximadamente 400 A.

3.3.6. Utilização da Mesma Quantidade de Material Depositado por Unidade de Comprimento para um Dado Modo de Transferência

Para possibilitar comparações mais realistas do efeito dos parâmetros de soldagem sobre os parâmetros geométricos do cordão soldado é imprescindível que os volumes dos cordões fossem os mesmos. Como sabe-se que a quantidade de material depositado pelo tempo tem relação com o tipo de transferência, por isto a quantidade de material depositado por unidade de comprimento foi mantida constante para cada soldagem, ou seja, a relação velocidade de alimentação e velocidade de soldagem foi mantida num mesmo valor.

3.4. Etapas para Confeção dos Mapas Operacionais de Transferência

A confecção dos mapas operacionais foi dividida em duas partes, que dependerão do tipo do mapa de transferência que será confeccionado. A razão da divisão está nas particularidades intrínsecas de cada modo de transferência mapeado.

3.4.1. Etapas de Confeção do Mapa Operacional de Transferência por Curto-Circuito

Para confecção do mapa operacional de transferência metálica por curto-circuito, as seguintes etapas foram elaboradas e propostas:

- a) Determinação das velocidades de alimentação necessárias para obtenção das correntes desejadas;
- b) Determinação da tensão do limite inferior da região de curto-circuito;
- c) Determinação da tensão do limite superior da região de curto-circuito;
- d) Refino do mapa global¹ utilizando um critério para determinação de curtos-circuitos regulares.

a) Procedimento para determinação das velocidades de alimentação necessárias para obtenção das correntes desejadas

Os valores de corrente para confeccionar o mapa são definidos por dois extremos de uma faixa e mais dois valores intermediários dentro desta faixa. Foi escolhida arbitrariamente (porém, condizente com o praticado no meio industrial para esse tipo de transferência) a faixa de 100 a 200 A. Desta forma, a princípio os valores seriam 100, 133, 166 e 200 A. Porém, na prática os valores ficaram em torno de 105, 145, 175 e 210 A.

Como o modo de funcionamento da fonte é do tipo tensão constante, a obtenção das correntes nos valores propostos deve ser feito pela regulagem da velocidade de alimentação. Para isto, regula-se uma tensão na fonte e uma velocidade de alimentação típicas para proporcionar transferências metálicas por curto-circuito (usar literatura ou experiência

¹ Entende-se aqui como mapa global, o desenvolvimento de um mapa de transferência metálica ainda sem a preocupação de delimitar a região de estabilidade operacional. Distingue-se, portanto, dos mapas de transferência convencionais por atender as premissas definidas no item 3.2.

própria). Depois, aumenta-se a velocidade de alimentação até que se alcance a corrente desejada (corrigir a tensão de regulagem se necessário, no caso de arco muito curto).

b) Procedimento para determinação da tensão do limite inferior da região de curto-circuito

Determinadas as velocidades de alimentação que proporcionem as correntes desejadas, repetem-se soldagens com cada uma das respectivas velocidades de alimentação, agora diminuindo a tensão até que o arco visualmente se desestabilize ou apague por completo. A tensão imediatamente antes deste ponto é a tensão mínima de curto-circuito. Nesta fase, utilizam-se sucatas para realização das soldagens, que serão feitas de forma contínua, ou seja, os parâmetros serão variados enquanto a soldagem ocorre, isto, com objetivo de se diminuir ao máximo o gasto de material.

A Fig. 3.1 mostra um esboço de como o mapa deve estar neste momento. Por meio deste esboço é possível verificar os quatros pontos de velocidade de alimentação que proporcionam as correntes de soldagem predeterminadas. E também possibilitam a construção de uma linha que define uma região, imediatamente abaixo desta linha, onde o arco não apresenta estabilidade para soldagem.

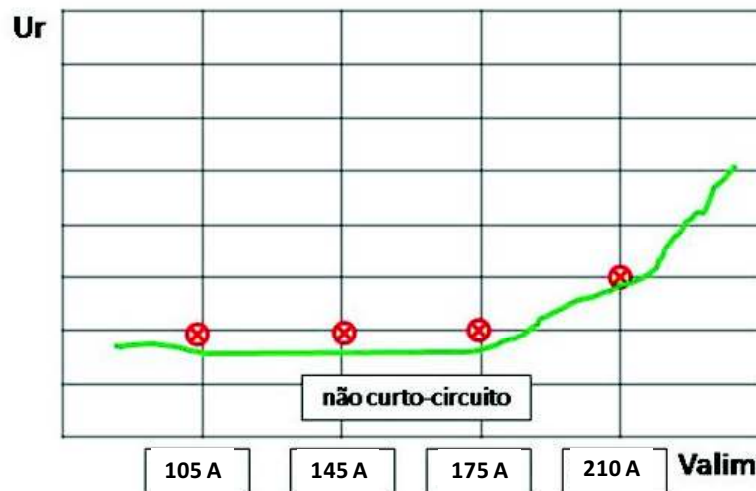


Figura 3.1 – Situação do mapa global de transferência após a etapa “b”. Os pontos em vermelho indicam valores de tensão mínima onde a transferência ainda ocorre por curto-circuito

c) Procedimento para determinação da tensão do limite superior da região de curto-circuito

Para determinação do limite superior da tensão para ainda se obter transferência por curtos-circuitos, deve-se realizar cordões de solda longos e contínuos. Durante a soldagem, aumentar, a partir do valor mínimo para cada velocidade de alimentação encontrada, o valor da tensão de regulagem, em degraus de 1 V e a cada 20 s, até que a condição de curto-circuito torne-se visualmente instável, ou seja, o modo de transferência passe a ser globular-curto-circuito (confirmado pelo oscilograma). Este valor de tensão determina o limite superior de curtos-circuitos para cada velocidade de alimentação determinada. Espera-se que a variação da tensão provoque apenas uma pequena variação na corrente de soldagem, visto que a velocidade de alimentação fica constante.

A Fig. 3.2 apresenta um esboço do mapa que ilustra o procedimento adotado para obtenção do ponto limite superior para a menor velocidade de alimentação, onde a tensão de regulagem foi incrementada até que a transferência ficasse instável (ponto em preto). A Fig. 3.3 apresenta como ficaria o mapa após o levantamento dos pontos de limite superior para todas as velocidades de alimentação.

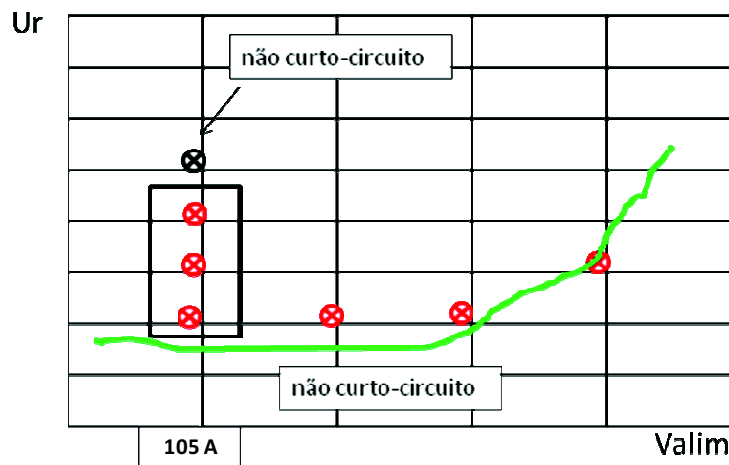


Figura 3.2 – Ilustração do procedimento para determinar o limite superior de curto-circuito, onde os pontos em vermelho indicam valores de tensão que proporcionam transferência por curto-circuito e o ponto em preto indica transferência já com características globulares.

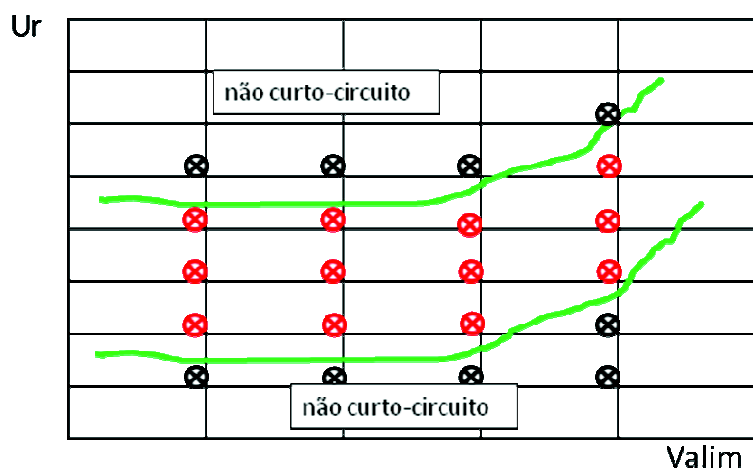


Figura 3.3 – Ilustração do mapa global de transferência por curto-circuito completo

d) Refino do mapa global utilizando um critério para determinação de curtos-circuitos regulares (região operacional)

A região de curto-circuito levantada até o momento pelo procedimento adotado não garante que todos os curtos-circuitos sejam em condições estáveis de transferência, pois o critério utilizado até agora (visual e análise dos oscilogramas) só permite uma diferenciação grosseira. Por isto, foi necessário fazer um refino desta região (refino do mapa), ilustrado pela Fig. 3.4. Para tal, foram feitas soldagens dentro da faixa pré-determinada e utilizado um critério para determinação de curtos-circuitos regulares. A descrição do critério utilizado será realizada no próximo Capítulo.

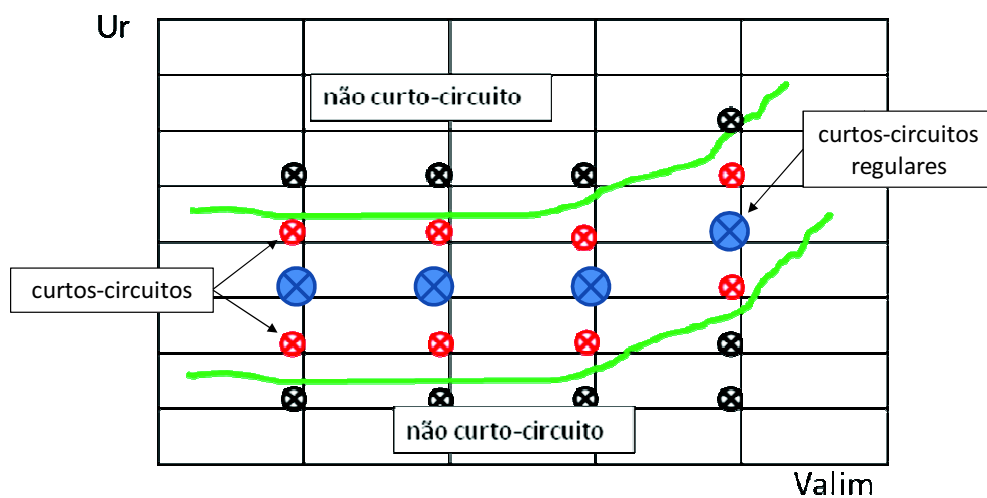


Figura 3.4 – Ilustração da região refinada (região de estabilidade operacional)

3.4.2. Etapas de Confeção de Mecanismos Complementares do Mapa Operacional de Transferência por Curto-Circuito

Para confecção de mapas complementares, as seguintes etapas foram elaboradas e propostas:

- a) Variação da DBCP para verificação da influência desse parâmetro sobre a região de estabilidade operacional;
- b) Variação da indutância da fonte para verificação da influência desse parâmetro sobre a região de estabilidade operacional;
- c) Escolha de pontos operacionais no mapa que demonstrem as conseqüências da utilização ou não do mapa na soldagem (soldagem dentro e fora da região de estabilidade operacional), utilizando juntas para promover uma avaliação mais realista.

a) Procedimento de variação da DBCP para verificação da influência do seu aumento sobre a região de estabilidade operacional

Para avaliação da influência da DBCP sobre a transferência por curto-circuito, será realizada uma varredura das tensões de soldagem, conforme itens anteriores, para somente um dos gases de proteção. Para isto, escolhe-se uma velocidade de alimentação dentro da faixa pré-determinada de corrente (105 a 210 A), se determina os limites de tensão e depois se utiliza o critério para refino. Depois de determinada a faixa de tensão, constrói-se um mapa, para o gás escolhido, com mais esta velocidade de alimentação e verifica-se a influência do aumento da DBCP sobre o mesmo.

b) Procedimento de variação da indutância da fonte para verificação da influência da variação deste parâmetro sobre a região de estabilidade operacional

Para avaliação da indutância, deve-se primeiro caracterizar o real valor da indutância em relação ao valor regulado na fonte. Desta forma, podem-se avaliar quais e quantos valores de indutância serão utilizados para avaliação de sua influência. Finalmente, procede-se da mesma forma do que no item anterior (a).

c) Procedimento para escolha de pontos que demonstrem as conseqüências da utilização ou não do mapa operacional na soldagem (soldagem dentro e fora da região de estabilidade operacional), utilizando juntas para promover uma avaliação mais realista

Serão escolhidos pontos dentro e fora do mapa levantado para cada velocidade de alimentação e gás de proteção utilizado. Estes pontos devem mostrar a influência da soldagem na região de estabilidade operacional e fora dela. Serão avaliados o acabamento e geometria do cordão, rendimento de deposição, ciclo térmico de soldagem e intensidade do espectro emitido.

3.4.3. Etapas de Confecção do Mapa Operacional de Transferência Goticular

A metodologia prevê as seguintes etapas:

- a) Determinação das velocidades de alimentação necessárias para obtenção das correntes desejadas;
- b) Determinação da região inferior de transferência goticular;
- c) Determinação da região superior de transferência goticular.

Obs: Como se verá adiante, ao contrário do mapa operacional para transferência por curto-circuito, não há uma forma de fazer um refino da região de transferência goticular, para caracterizá-la como de estabilidade operacional, Por isto, neste item não está sendo usado o termo Mapa Global de Transferência.

a) Procedimento para determinação das velocidades de alimentação necessárias para obtenção das correntes desejadas

Inicia-se a soldagem utilizando um comprimento de arco longo e velocidade de alimentação que proporcione uma transferência do tipo globular. Depois, mantendo-se a tensão de regulagem fixa, aumenta-se continuamente a velocidade de alimentação, e conseqüentemente a corrente de soldagem, até que a transferência, visualmente, mude para o modo goticular. Com o contínuo aumento da velocidade de alimentação, pode ocorrer do arco ficar com o comprimento muito curto e, porventura, provocar curtos-circuitos antes que a transferência torne-se goticular. Se isto ocorrer, interrompe-se a soldagem e aumenta-se a tensão para corrigir o comprimento do arco. Usando os oscilogramas de tensão e corrente, determinam-se dois pontos de velocidade de alimentação, um imediatamente antes da faixa corrente de transição e outro depois. Inicialmente, propõem-se mais dois pontos de velocidade de alimentação, uma máxima que leve a corrente por volta de 400 A e um ponto entre a velocidade de alimentação imediatamente após a corrente de transição e a corrente

máxima, mas constantemente avaliando-se a necessidade da inserção de mais pontos para caracterizar o mapa. A Fig. 3.5 apresenta um esboço da proposta.

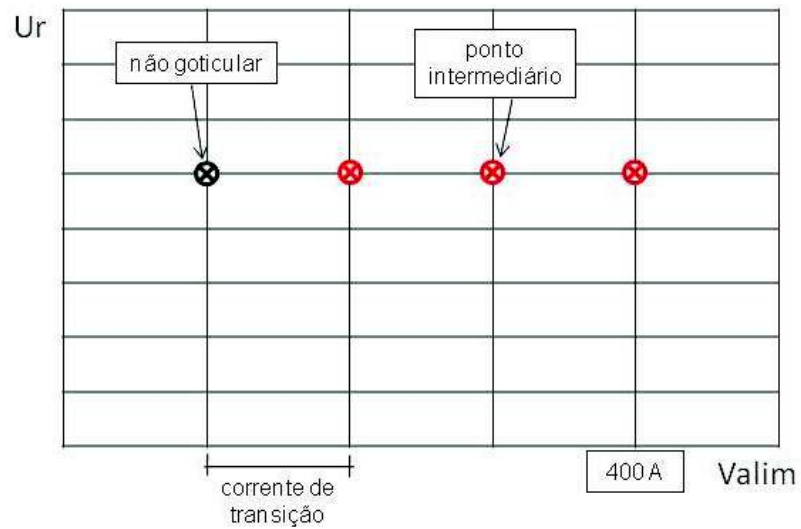


Figura 3.5 – Ilustração do mapa após a determinação das velocidades de alimentação para soldagem

b) Procedimento para determinação da região inferior de transferência goticular

Para determinação da região inferior de transferência goticular, diminui-se continuamente a tensão de regulagem, para cada velocidade de alimentação determinada anteriormente até que ocorram curtos-circuitos. A tensão onde os curtos-circuitos se iniciaram será definida como a tensão mínima a ser analisada.

c) Procedimento para determinação da região superior de transferência goticular

Para determinação da região superior de transferência goticular deve-se aumentar continuamente a tensão de regulagem, em cada velocidade de alimentação determinada anteriormente até o arco fique excessivamente longo.

A Fig. 3.6 mostra uma ilustração da montagem do mapa para transferência goticular.

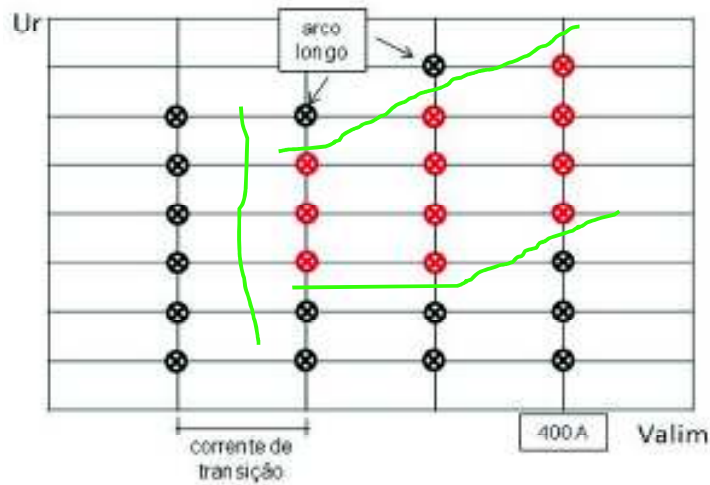


Figura 3.6 - Ilustração do mapa com região operacional para transferência goticular limitada pelas linhas

3.4.4. Etapas de Confecção de Mapas Complementares de Transferência Goticular

Para este caso, a metodologia prevê as seguintes etapas:

- a) Variação da DBCP para verificação da influência de variação deste parâmetro sobre a região de estabilidade operacional;
- b) Escolha de pontos operacionais no mapa que demonstrem as conseqüências da utilização ou não do mapa na soldagem (soldagem dentro e fora da região de estabilidade operacional), utilizando juntas para promover uma avaliação mais realista.

a) Procedimento de variação da DBCP para verificação da influência de variação deste parâmetro sobre a região de estabilidade operacional

Para avaliação da influência da DBCP na transferência goticular, será realizada uma varredura das tensões de soldagem, conforme itens anteriores, para somente um dos gases de proteção. Para isto, escolhe-se uma velocidade de alimentação dentro da faixa determinada de velocidades de alimentação e se determina os limites de tensão. Depois de determinada a faixa de tensão, constrói-se um mapa, para o gás escolhido, com mais esta velocidade de alimentação e verifica-se a influência do aumento e diminuição da DBCP no mesmo.

b) Procedimento para escolha de pontos operacionais no mapa que demonstrem as conseqüências da utilização ou não do mapa na soldagem (soldagem dentro e fora da região de estabilidade operacional), utilizando juntas para promover uma avaliação mais realista

Serão escolhidos pontos dentro e fora do mapa levantado para cada velocidade de alimentação e gás de proteção utilizado. Estes pontos devem mostrar a influência da soldagem na região mapeada e fora dela. Serão avaliados o acabamento e geometria do cordão, ciclo térmico de soldagem e intensidade do espectro emitido.

3.5. Bancada Experimental

A bancada experimental foi montada como mostrado na Fig. 3.7. Nesta figura podem ser observadas a fonte de soldagem e o alimentador de arame, a tocha montada no robô e mesa onde foi colocado o suporte que servia para fixar as placas de teste. Podem-se observar também os cilindros de gases de proteção e uma unidade de circulação de água utilizada para refrigeração tocha. Os equipamentos utilizados são descritos a seguir.

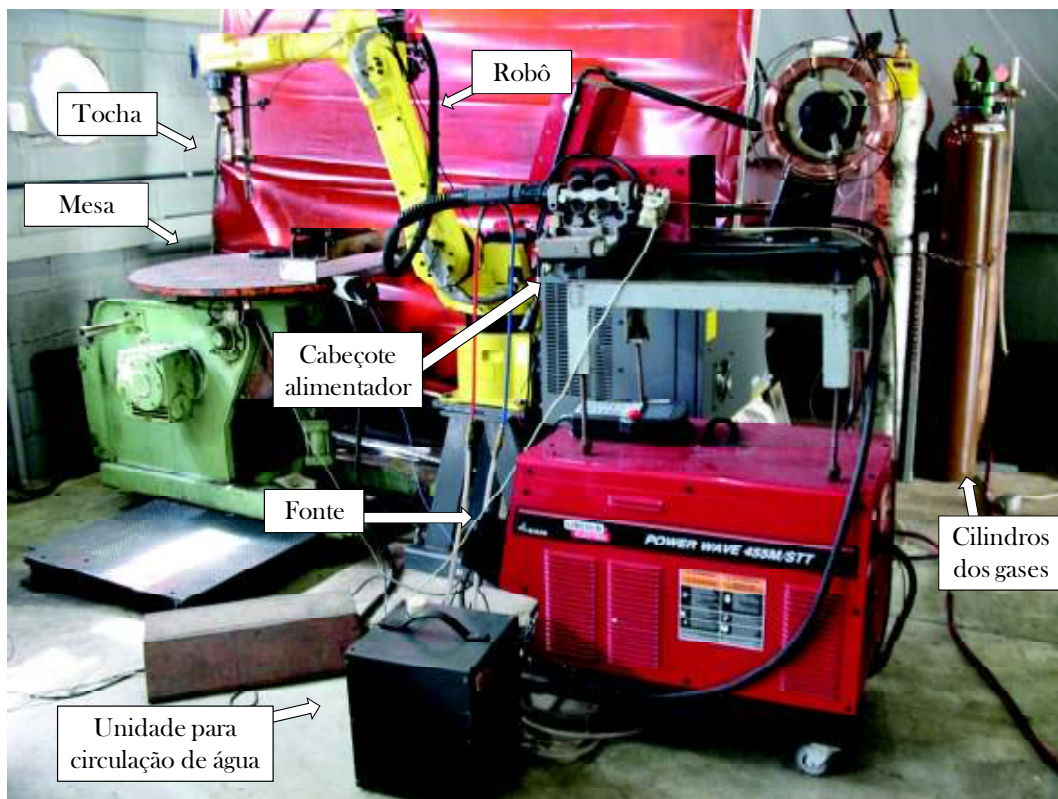


Figura 3.7 – Visão geral da montagem da bancada experimental

3.5.1. Fonte de Soldagem e 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. 3.8. A fonte utilizada é do tipo inversora de três fases, multiprocesso, faixa de corrente e tensão de trabalho de 5 A/10 V até 570 A/43 V, tensão em vazio de 25 a 90 V, corrente máxima de 570 A e tensão máxima de 43 V com fator de trabalho de 60% e corrente máxima de 450 A e tensão máxima de 38 V com fator de trabalho de 100%. A identificação comercial da fonte se dá, pois, o equipamento, devido a características construtivas, vai ser uma variável, se não das mais importantes, mas significativa na construção de mapas de transferência.



(a)



(b)

Fig. 3.8 – (a) fonte de soldagem (LINCOLN ELECTRIC, 2009); (b) alimentador de arame (LINCOLN ELECTRIC, 2009)

3.5.2. Sistema de Translação da Tocha (Robô)

Para movimentação da tocha foi utilizado um braço mecânico do fabricante FANUC Robotics modelo Arc Mate 100 iBe, com 6 graus de liberdade e capacidade máxima de carga na flange de 6 kg.

3.5.3. Tocha

Foi utilizada uma tocha automática para processo MIG/MAG, do fabricante TBI modelo 511 Aut. Segundo TBI Industries (2009), esta é uma tocha refrigerada à água com

corrente máxima de soldagem de 450 A para mistura de gases e 500 A quando utilizada com CO₂ puro. A Fig. 3.9 apresenta a montagem para fixação da tocha ao robô.

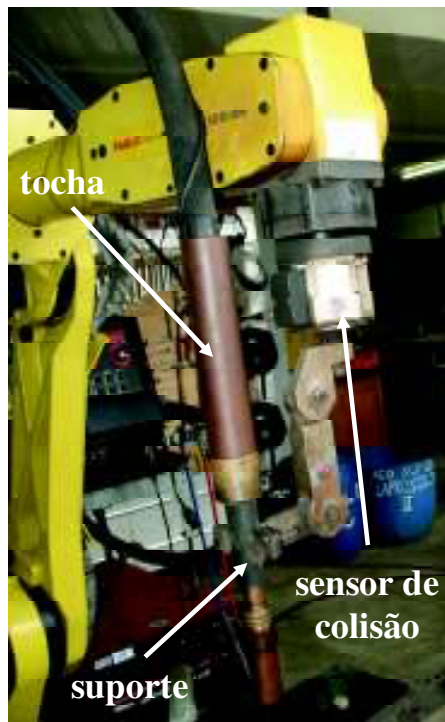


Figura 3.9 – Fixação da tocha de soldagem na flange do robô mostrando o sensor de colisão e o suporte para prender a tocha ao sensor

3.5.4. Placas de Teste

Para realização das soldagens foram confeccionadas placas de teste em aço carbono comum adquirido no comércio local. Os testes foram realizados em cordão sobre chapa e depois em juntas. Para os testes em cordão sobre chapas, foram utilizadas chapas disponíveis no laboratório, já soldadas (sucatas), com dimensões de aproximadamente 1000 x 400 mm e no mínimo 12,7 mm de espessura. Houve a preocupação de não se utilizar chapas com empenamento excessivo, apesar da utilização do robô permitir a marcação de vários pontos para manter a DBCP constante, e limpá-las com uma escova e/ou água e sabão quando necessário. Para os testes em juntas, as placas de teste foram confeccionadas a partir de barras chatas. Foram utilizadas duas configurações dependentes do tipo de transferência usada. Para transferência por curto-circuito, optou-se por uma junta de topo com preparação em I com folga (Fig. 3.10), enquanto para transferência goticular foi usada uma junta de topo com preparação em Y (Fig. 3.11). As chapas foram ponteadas para evitar a abertura da junta

durante a soldagem. No caso da junta com preparação em I, foram utilizadas medidas adicionais para evitar também o fechamento da folga durante a soldagem. Para isto, foram colocados pequenos pedaços de chapas com dimensão da folga (1,5 mm) nos extremos e no meio da junta. O ponteamto ocorria sobre estes pedaços de chapa que não eram retirados e serviam, assim, com espaçadores. A Fig. 3.12 mostra a chapa de testes já ponteadada e pronta para soldagem.

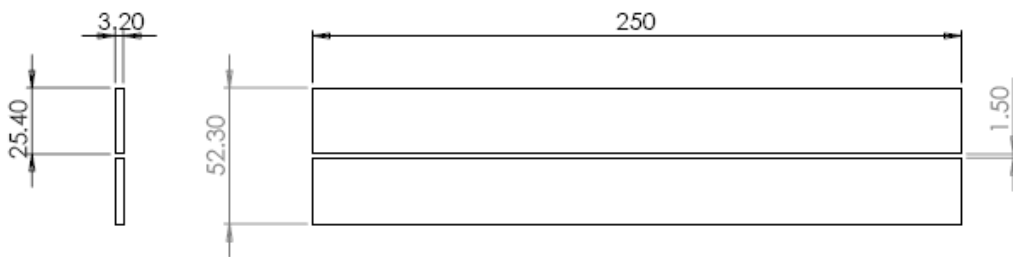


Figura 3.10 – Dimensões e geometria da junta utilizada para soldagens com transferência por curto-circuito

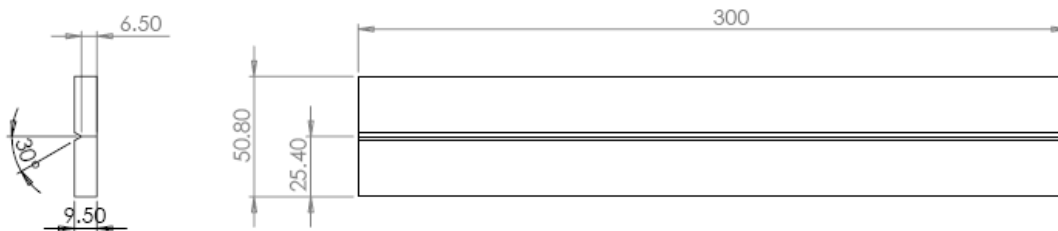


Figura 3.11 – Dimensões e geometria da junta utilizada para soldagens com transferência goticular



Figura 3.12 – Posição do ponteamto realizado na placa de teste com junta em I e folga de 1,5 mm (notar a presença dos espaçadores e o esmerilhamento para retirada do excesso dos pontos)

3.5.5. Suporte de Fixação das Placas de Teste

As placas de testes foram fixadas em dois tipos suportes. O primeiro (Fig. 3.13) foi utilizado nos testes preliminares e fixava placas grandes e espessas (sucatas). Outro suporte (Fig. 3.14) foi utilizado para fixar as placas de testes preparadas para os ensaios em juntas de topo e chanfradas. Lembrar que o principal objetivo desses suportes foi de impedir a distorção das placas de teste durante a soldagem, evitando assim a variação dos parâmetros.

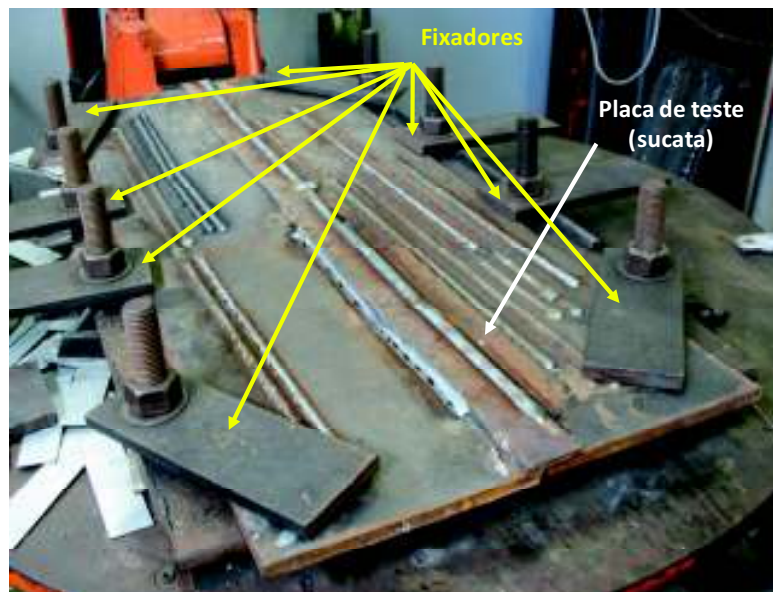


Figura 3.13 – Suporte para fixação das placas dos testes preliminares (sucata) - dimensões: 900 x 500 mm

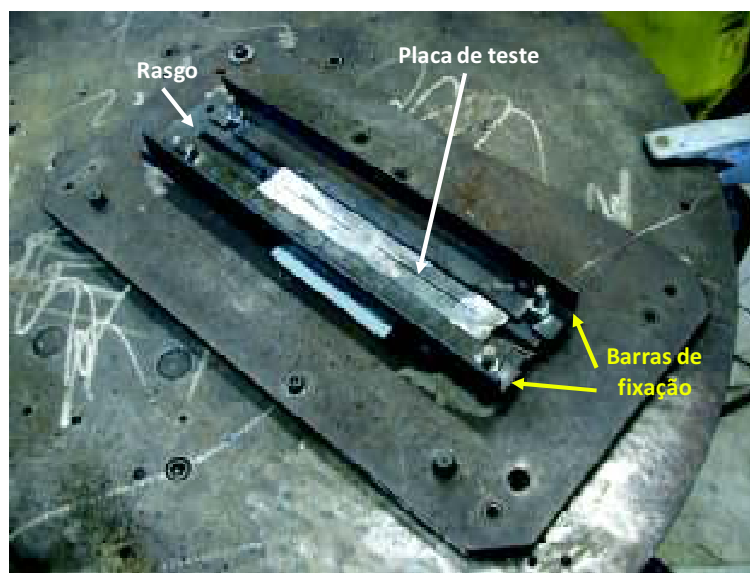


Figura 3.14 – Suporte para fixação das placas preparadas para os testes com juntas (atentar para o rasgo no suporte, que tem como objetivo simular soldagem sem cobre-junta) - dimensões: 100 x 420 mm

3.5.6. Gases de Proteção e Arame-Eletrodo

Foram utilizados gases acondicionados na forma de cilindros. Os gases foram fornecidos pela Air Products Brasil Ltda, sendo utilizadas as misturas Ar + 8% CO₂, Ar + 15% CO₂, Ar + 25% CO₂ e Ar + 5% O₂. O arame-eletrodo utilizado foi o da classe AWS ER70S-6 do fabricante Belgo Bekaert embobinado capa a capa com 1,2 mm de diâmetro. A menção ao nome dos fabricantes se deve a possível influência do produto no resultado final das soldas. Os gases tiveram sua composição analisada com um analisador de gases (Witt – Oxybaby[®]) que mede a quantidade de O₂ e CO₂ na mistura. Foram realizadas três análises durante o período de realização do trabalho (pouco menos de dois anos), em intervalos de aproximadamente um ano entre a primeira e segunda análise e seis meses entre a segunda e terceira.

Os resultados das análises são mostrados na Tab. 3.1. Como se vê, existem variações significativas do teor do gás de mistura no argônio com o tempo. Há uma tendência de aumento do gás de mistura, mas não suportada quando se fez uma nova análise em um dos casos após procurar movimentar o gás dentro do cilindro. Não foi feita uma avaliação mais sistemática deste fenômeno, por fugir do escopo do trabalho e até por que esta variação ter ficado praticamente dentro do limite de 10% a partir do valor nominal, tolerância normalmente aceitável na prática.

Tabela 3.1 – Quantidades de CO₂ e O₂ medidas pelo analisador para três análises distintas

Composição nominal	Quantidade de CO ₂ medida (%)		
	1ª análise	2ª análise	3ª análise
Ar + 8% CO ₂	7,4	8,1	9,3
Ar + 15% CO ₂	14,2	13,8	14,8
Ar + 25% CO ₂	24,3	-	25,3 / 23,5*
Ar + 5% O ₂	-	4,4	4,7

** Na terceira análise desta mistura, após a primeira medição o cilindro foi deitado e rolado com objetivo de misturar o gás, para depois ser colocado novamente na vertical e efetuar-se uma nova análise*

3.6. Caracterização do Sistema de Medição

A Fig. 3.15 mostra o esquema da montagem geral do sistema de medição utilizado para adquirir temperatura, luminosidade, sinais elétricos e velocidade de alimentação. O sistema de medição consiste em um microcomputador ligado a duas placas de aquisição e um espectrômetro. Uma das placas de aquisição é responsável pela coleta dos sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação e a outra é dedicada à aquisição do sinal de um termopar. Em cada etapa do trabalho, o sistema de aquisição foi montado para coletar os sinais de forma dedicada. A seguir serão apresentados os equipamentos utilizados para aquisição.

3.6.1. Placas de Aquisição

As placas de aquisição utilizadas são do fabricante National Instruments e suas características técnicas principais são apresentadas nas Figs. 3.16 e 3.17.

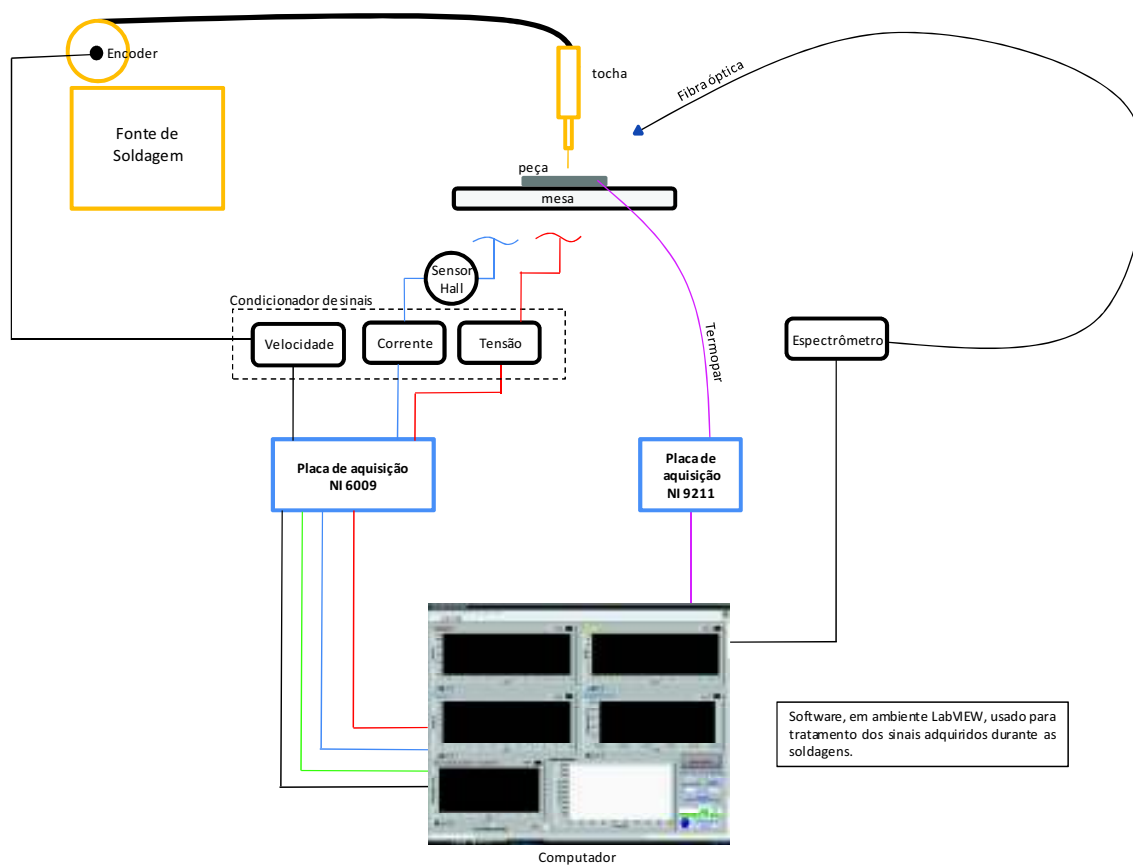


Figura 3.15 – Esquema da montagem completa do sistema de medição



Figura 3.16 – Placa de aquisição modelo NI USB-6009 com resolução de 14 bits e faixa de medição de ± 10 V (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009a)



Figura 3.17 – Placa de aquisição modelo NI 9211 com resolução de 24 bits e faixa de medição de ± 80 mV (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009b)

3.6.2. Espectrômetro

Foi utilizado o espectrômetro, cujas características físicas e técnicas são apresentadas na Fig. 3.18. Este tipo de espectrômetro recebe as radiações emitidas e, após conveniente separação de seus comprimentos de onda por sistemas ópticos, têm suas intensidades respectivas medidas por meios de um CCD e correlacionadas às concentrações correspondentes através de curvas de calibração obtidas previamente.



Figura 3.18 – Espectrômetro do fabricante Spectral Products modelo SM 242 com faixa de medição de 200-850 nm e resolução de 0,31 nm (SPECTRAL PRODUCTS, 2009)

3.6.3. Termopar

O termopar utilizado para aquisição de temperatura foi do tipo K (Níquel-Cromo(+) versus Níquel-Alumínio(-)). A Eq. 3.1 apresenta a curva de calibração de um termopar tipo K segundo um catálogo do IOPE Instrumentos de Precisão Ltda (2009). A curva de calibração foi verificada para alguns pontos e se mostrou válida. A Fig. 3.19 mostra a faixa de temperatura e os limites de erro para este tipo de termopar.

$$T = 0,226584602x + 24152,10900x + 67233,4248x^2 + 2210340,682x^3 - 860963914,9x^4 + 4,83506 \cdot 10^{10}x^5 - 1,18452 \cdot 10^{12}x^6 + 1,38690 \cdot 10^{13}x^7 - 6,33708 \cdot 10^{13}x^8 \quad (3.1)$$

onde T = temperatura (°C) e x = tensão (mV)

Tipo de Termopar	Faixa de Temperatura	Limites de Erro	
		Standard (Escolher o Maior)	Especial (Escolher o Maior)
T	0 a 350°C	±1°C ou ±0,75%	±0,5°C ou 0,4%
J	0 a 750°C	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
E	0 a 900°C	±1,7°C ou ±0,5%	±1°C ou ±0,4%
K	0 a 1250°C	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
S e R	0 a 1450°C	±1,5°C ou ±0,25%	±0,6°C ou ±0,1%
B	800 a 1700°C	±0,5%	-
T	-200 a 0°C	±1°C ou ±1,5%	-
E	-200 a 0°C	±1,7°C ou ±1%	-
K	-200 a 0°C	±2,2°C ou ±2%	-

Figura 3.19 – Faixa de temperatura e limites de erros dos termopares, conforme recomendação da norma ANSI MC 96.1 (1982)

3.6.4. Transdutores/Condicionadores de Sinal

Para condicionamento dos sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação, para este trabalho, foi necessário o projeto e construção de uma caixa condicionadora de sinais (Fig. 3.20). A caixa tinha como função 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). Uma breve descrição deste equipamento será dada a seguir.

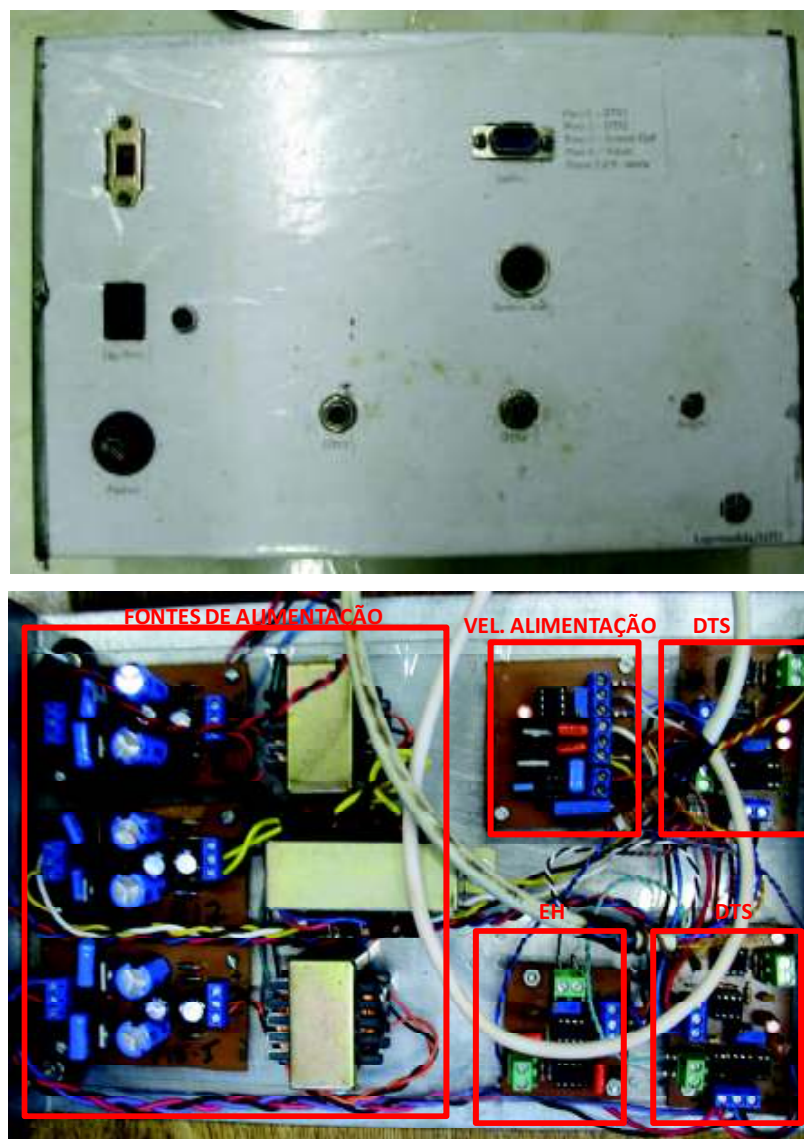


Figura 3.20 – Interface condicionadora de sinal projetada e construída no Laprosolda/UFU (painel externo acima e circuitos internos abaixo)

a) *Sensor Hall*

Para aquisição do sinal de corrente de soldagem foi utilizado um transdutor de corrente que funciona segundo princípio do efeito Hall. Tal transdutor, então, transforma um valor de corrente de soldagem que passa por ele em um valor de tensão proporcional a corrente. O sensor utilizado é da marca LEM Transducers modelo HT 500-S8D e possui faixa de medição de ± 500 A (Fig. 3.21).



Figura 3.21 – Transdutor para medição de corrente baseado no efeito Hall

Quando ainda era um jovem estudante, em 1879, Edwin H. Hall descobriu um fenômeno inesperado. Ele observou que, se uma placa fina de ouro for colocada em um campo magnético perpendicular à sua superfície, uma corrente elétrica fluindo ao longo da placa pode causar uma diferença de potencial em uma direção perpendicular tanto ao campo magnético quanto à corrente (Fig. 3.22). Este fenômeno, chamado de *efeito Hall*, acontece porque as partículas eletricamente carregadas (neste caso, elétrons) movendo-se em um campo magnético são influenciadas por uma força e defletidas lateralmente (BERTULANI, 2009).

Para condicionamento do sinal de saída do sensor Hall foi utilizado um circuito elétrico que tinha como função principal aumentar o valor de tensão de saída deste sensor antes de entrar na placa de aquisição. A Fig. 3.23 apresenta um diagrama de bloco da montagem geral do sensor e condicionador de sinal, enquanto a Fig. 3.24 apresenta o diagrama do circuito do condicionador de sinal do sensor Hall, onde pode se verificar, entre outros componentes, a existência de um filtro do tipo passa-baixa com frequência de corte de 1000 Hz. A Fig. 3.25 mostra o projeto da placa de circuito impresso e uma fotografia do circuito do condicionador de sinais pronto.

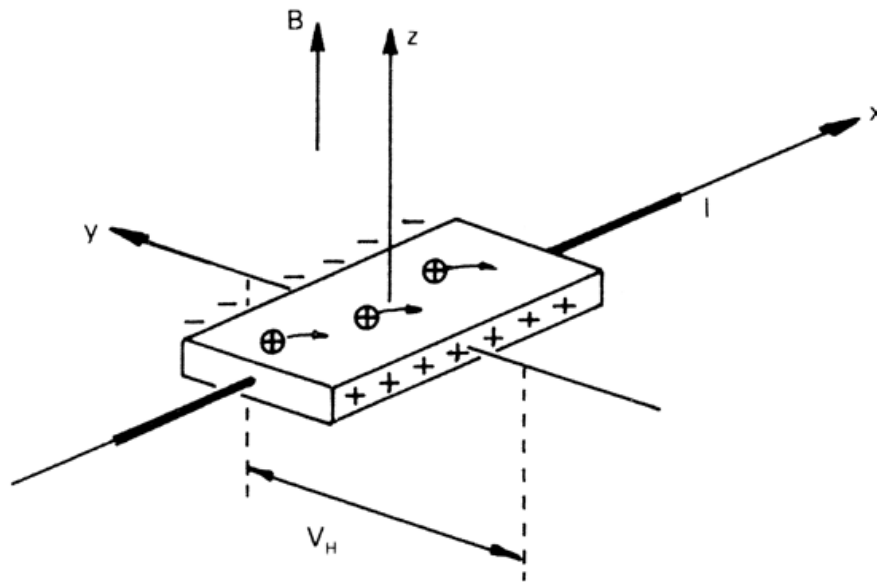


Figura 3.22 - Uma tensão V dá origem a uma corrente I na direção positiva de x . A resistência ôhmica é V / I . Um campo magnético na direção positiva z deflete os portadores de carga positiva na direção negativa de y . Isto gera um potencial de Hall (V_H) e uma resistência de Hall (V_H / I) na direção de y (BERTULANI, 2009)

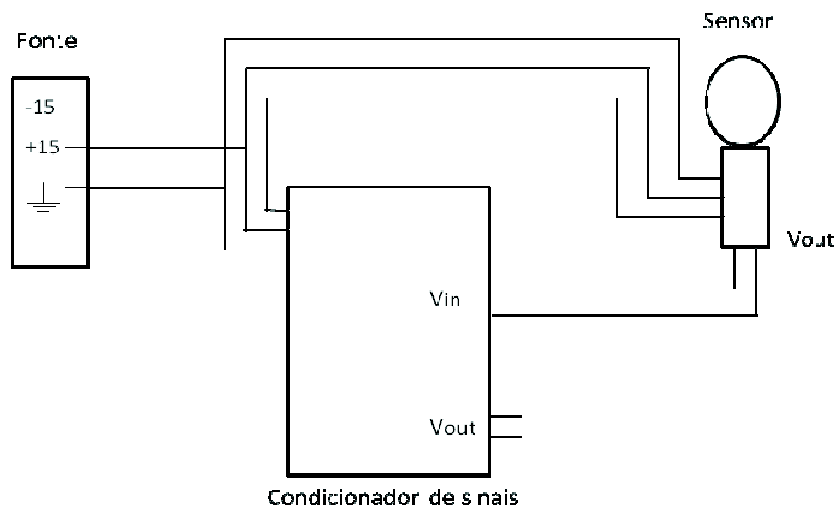


Figura 3.23 – Esquema da montagem do sensor Hall no condicionador de sinal. A fonte de tensão de 15 V que alimenta o sensor faz parte da caixa condicionadora de sinais

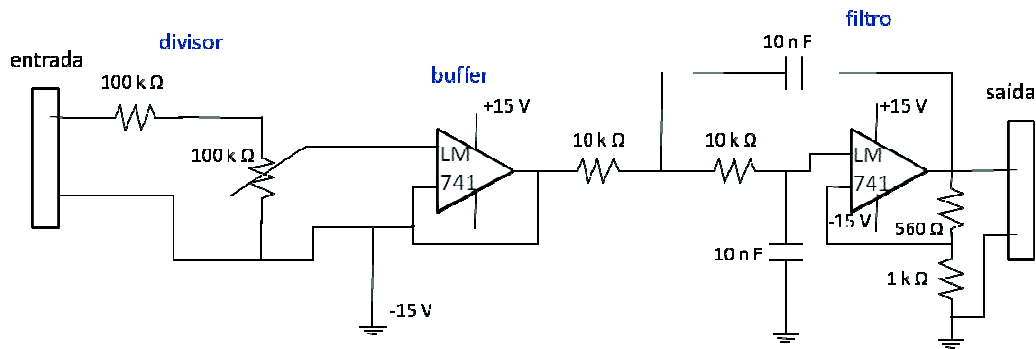
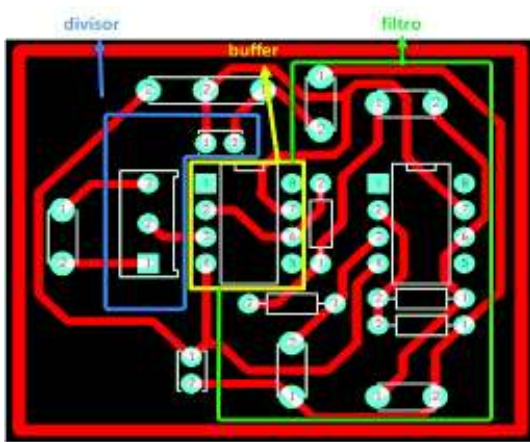
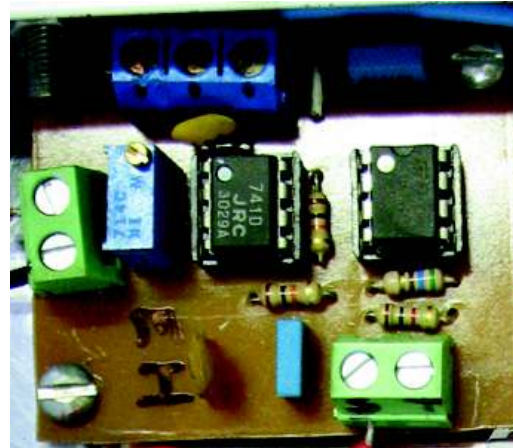


Figura 3.24 – Circuito do condicionador de sinal do sensor Hall



(a)



(b)

Figura 3.25 – Circuito elétrico do condicionador de sinal do efeito Hall. (a) Projeto da placa de circuito impresso e (b) placa com os componentes instalados

b) Divisor de Tensão (DTS)

Para possibilitar a aquisição do valor de tensão de soldagem na placa de aquisição utilizada, foi necessária a construção de um divisor de tensão para garantir que a entrada de tensão na placa fosse de no máximo ± 10 V (faixa de medição da placa). Como a tensão máxima de saída das fontes do laboratório é em torno de 60 a 70 V (tensão em vazio), utilizou-se uma razão de divisão de aproximadamente 10:1, o que garante uma entrada máxima na placa de aproximadamente 7 V. A Fig. 3.26 mostra o diagrama do circuito, enquanto a Fig. 3.27 mostra o projeto da placa de circuito impresso e uma fotografia do circuito do condicionador de sinais pronto. Neste divisor de tensão, como no condicionador de sinal do sensor Hall, foi utilizado um filtro do tipo passa baixa com frequência de corte de 1000 Hz.

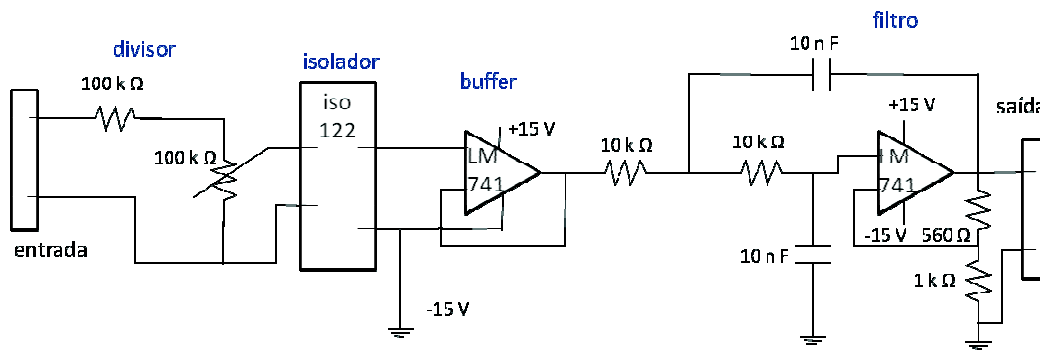
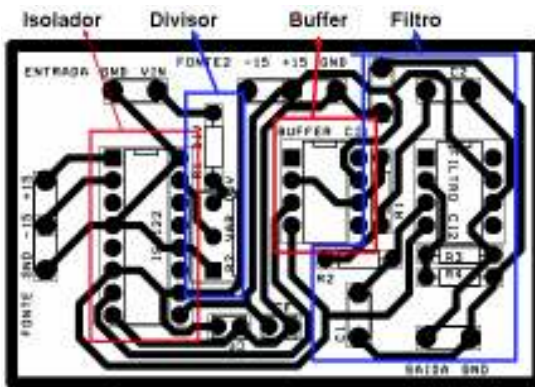


Figura 3.26 – Circuito do divisor de tensão



(a)



(b)

Figura 3.27 – Circuito elétrico do divisor de tensão. (a) Projeto da placa de circuito impresso e (b) placa com os componentes instalados

c) Sensor de velocidade de alimentação

Para aquisição da velocidade de alimentação foi utilizado um encoder (Fig. 3.28). O encoder utilizado foi fabricado pela IMC Soldagens e tem resolução de 50 pulsos por volta. Este dispositivo funciona como um transdutor que transforma a velocidade de alimentação (linear) em velocidade de rotação do seu disco perfurado. O sinal de saída do encoder são valores de tensão com frequência variável determinada pela velocidade de rotação disco. Desta forma, o condicionador de sinal da velocidade de alimentação é um circuito elétrico que produz uma saída de tensão proporcional a frequência de entrada.



(a)



(b)

Figura 3.28 – (a) Encoder utilizado nos experimentos, fabricante IMC Soldagem, com resolução de 50 pulsos por giro; (b) exibição da montagem do arame no sensor

3.6.5. *Calibração dos Transdutores/Condicionadores de Sinais*

Para calibração do divisor de tensão e do sensor Hall, foi utilizada uma fonte de soldagem e um banco de cargas para simulação de uma soldagem com objetivo de gerar os sinais estáveis de tensão e corrente utilizados para calibração. O procedimento utilizado foi impor um valor de tensão na fonte, conectada ao banco de carga, e ler com um voltímetro e um amperímetro calibrados os valores de tensão e corrente de saída da fonte (entrada de tensão no divisor de tensão e corrente no sensor Hall). Simultaneamente eram lidas as saídas de tensão do condicionador de sinais referentes aos sinais de tensão e corrente. A Fig. 3.29 apresenta um esquema da montagem para calibração. A faixa de tensão utilizada para calibração foi de 5 a 60 V e para corrente de 100 a 300 A. A tensão de soldagem era medida entre o suporte do bico de contato (por meio de um fio colocado por dentro da tocha) e a mesa de soldagem.

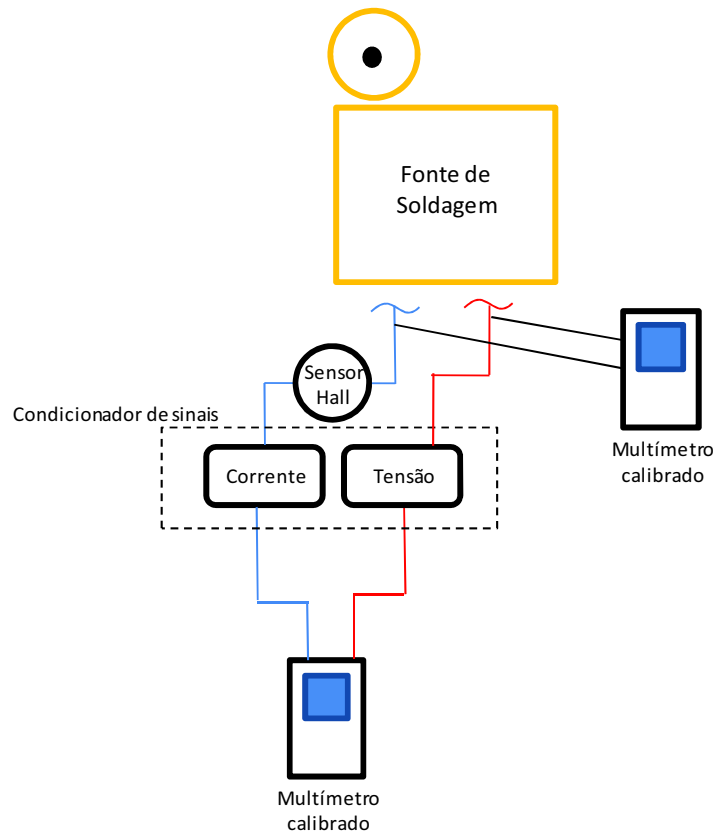


Figura 3.29 – Esquema de montagem para calibração da corrente e tensão (a relação entre os valores de corrente e tensão obtidos nos multímetros é que gera a curva de calibração)

Para calibração do sensor de velocidade de alimentação, foi utilizado um dispositivo, construído no Laprosolda/UFU, que consiste em um tubo por onde o arame é conduzido (Fig. 3.30). Durante sua passagem no tubo o arame aciona duas chaves que servem para ligar e desligar um cronômetro. Como as chaves têm uma distância conhecida entre elas pode-se calcular a velocidade de deslocamento do arame. Para realizar a calibração basta regular uma velocidade de alimentação na fonte e medir a velocidade real com o dispositivo e ler a saída de tensão do condicionador de sinal do sensor de velocidade. Obtém-se, a partir da relação entre a velocidade real e a tensão de saída, a curva de calibração.

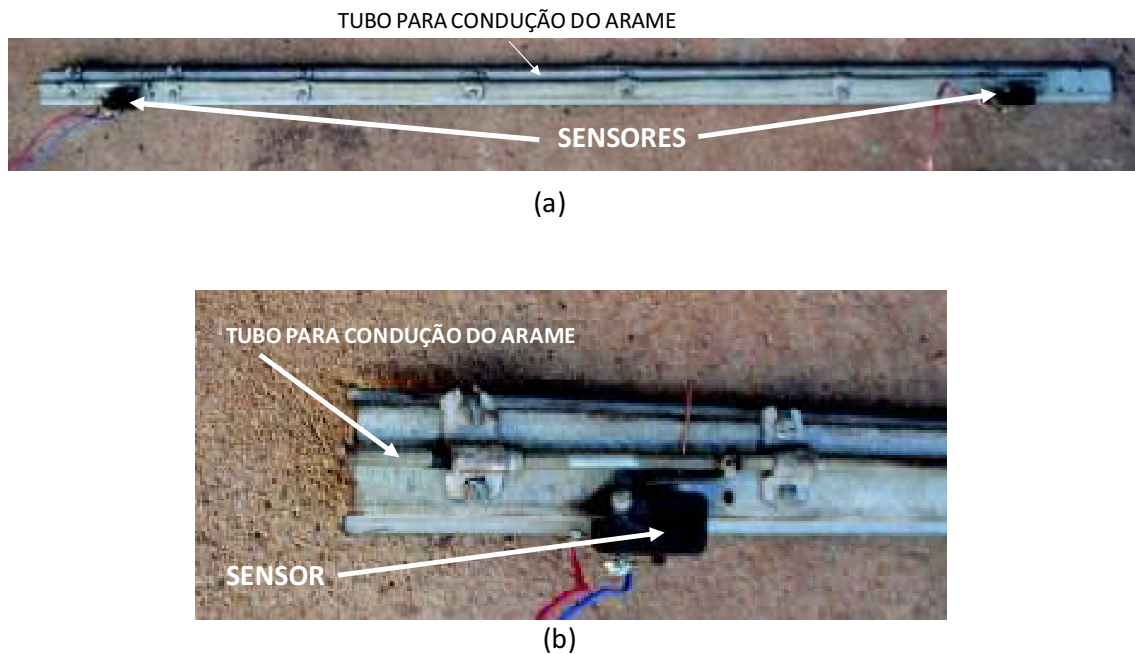


Figura 3.30 – (a) Dispositivo para medição da velocidade de alimentação de arame (b) detalhe

As curvas de calibração dos sensores são utilizadas para calibração do programa de aquisição. A Eq. 3.2 apresenta a curva para calibração da corrente, a Eq. 3.3 da tensão e a Eq. 3.4 da velocidade de alimentação.

$$y = 70,58x + 6,8 \quad (3.2)$$

Onde y = corrente de soldagem (A) e x = tensão de saída do condicionador de sinais (V)

$$y = 10,7x \quad (3.3)$$

Onde y = tensão de soldagem (V) e x = tensão de saída do condicionador de sinais (V)

$$y = 2,57x \quad (3.4)$$

Onde y = velocidade de alimentação (m/min) e x = tensão de saída do condicionador de sinais (V)

3.6.6. Programa de Aquisição de Dados

Para aquisição e armazenamento dos dados de soldagem foi implementado, por integrantes do Grupo Laprosolda, em linguagem LabView®, um programa que capturava os dados durante a soldagem e após término da aquisição os apresentava em forma de gráficos. A tela de interface do programa com o usuário é apresentada na Fig. 3.31 enquanto a Fig. 3.32 apresenta o código fonte do programa. A taxa de aquisição utilizada para os sinais elétricos foi de 5000 Hz e para temperatura de 4 Hz.

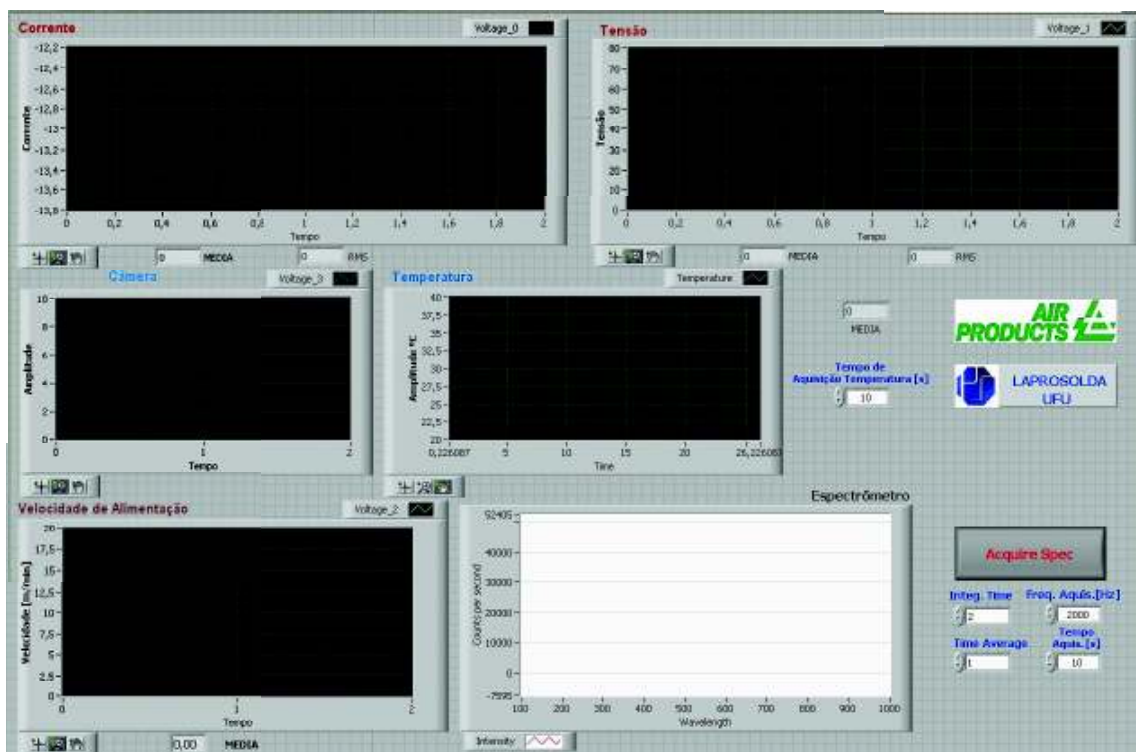


Figura 3.31 – Interface do programa com o usuário

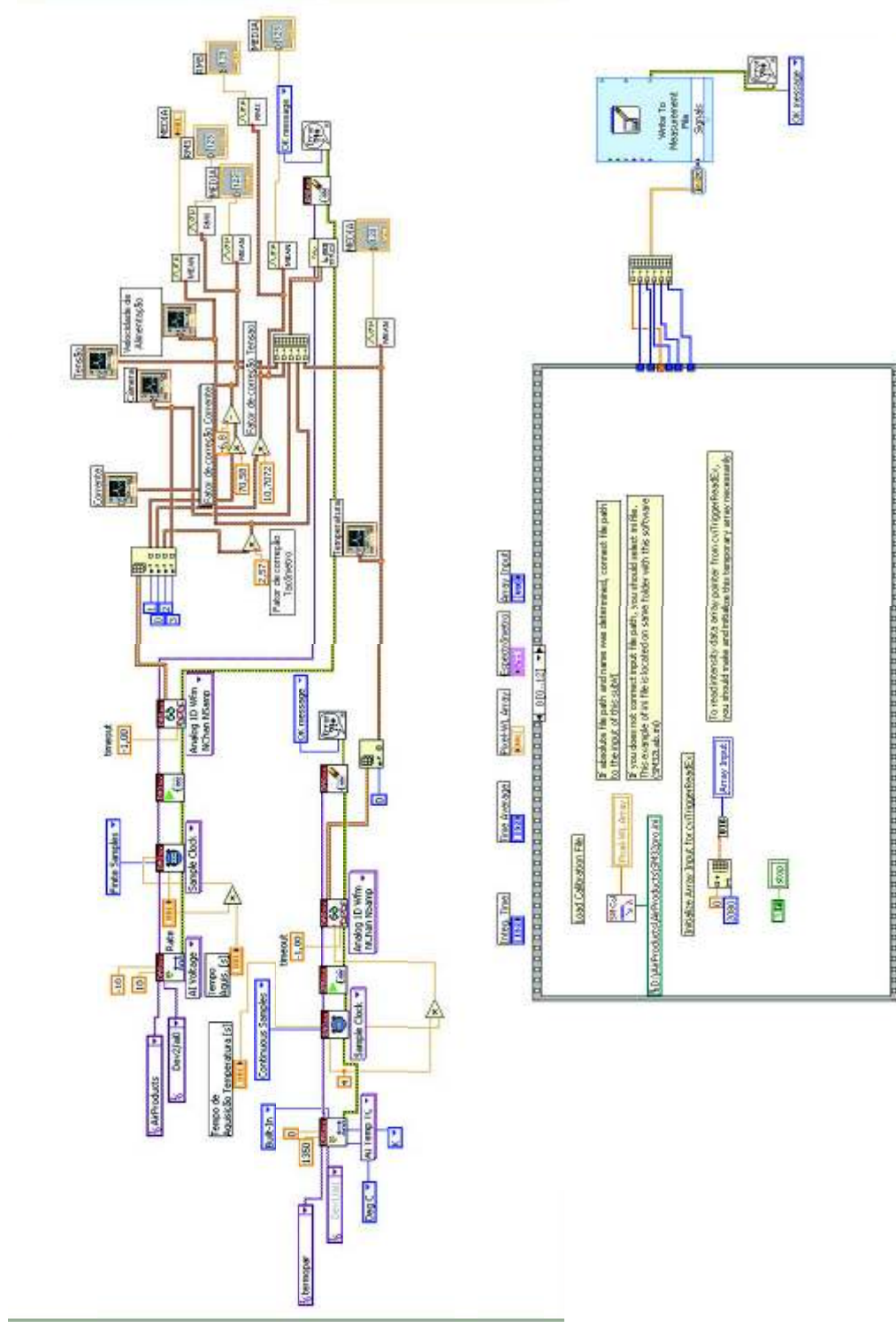


Figura 3.32 – Código fonte do programa

CAPÍTULO IV

LEVANTAMENTO DA REGIÃO DE TRANSFERÊNCIA DOS MAPAS OPERACIONAIS

Foram realizadas soldagens com objetivo de levantar as regiões de transferência dos mapas operacionais. Nesta fase, as soldagens para varredura dos valores de tensão e velocidade de alimentação, conforme metodologia proposta, foram realizadas em sucatas. A tocha foi posicionada perpendicularmente à placa de teste (ângulos de trabalho e ataque iguais a zero). A indutância da fonte foi regulada na posição zero (indicado pela palavra *off* no painel de regulagem).

4.1. Mapeamento do Modo de Transferência por Curto-Circuito

Todas as etapas para o mapeamento foram realizadas para os três gases de proteção propostos: Ar + 8%CO₂; Ar + 15%CO₂; e Ar + 25%CO₂. A DBCP utilizada foi de 12 mm e o bico de contato ficou para fora do bocal em 2 mm, como mostrado na Fig. 4.1. Soldagens preliminares foram realizadas para determinar uma velocidade de soldagem de forma que o volume do cordão fosse visualmente adequado para este tipo de transferência. Como consequência, a relação velocidade de soldagem (cm/min)/velocidade de alimentação (m/min) foi definida e mantida em 10 cm/m, para todas as soldagens.

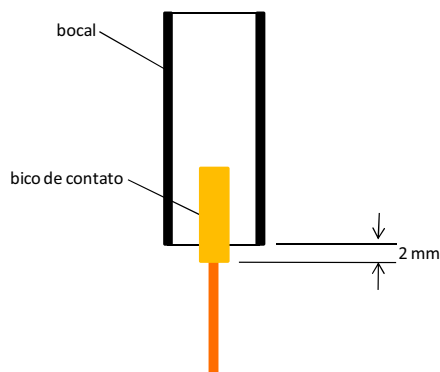


Figura 4.1 – Posicionamento do bico de contato em relação ao bocal da tocha utilizado nas soldagens no modo curto-circuito

4.1.1. Determinação dos Valores de Velocidade de Alimentação para as Correntes Desejadas

Para determinação das velocidades de alimentação que proporcionassem as correntes desejadas, iniciou-se a soldagem com uma condição de valor de tensão que proporcionasse transferência por curto-circuito. Soldando, nesta condição, de forma contínua em uma chapa, variou-se a velocidade de alimentação até que a corrente almejada fosse conseguida. Relembrando, o objetivo era alcançar correntes de 105 A, 145 A, 175 A e 210 A, aceitando uma tolerância de ± 5 A. A Tab. 4.1 mostra os valores de velocidade de alimentação impostas e as correntes obtidas, assim como os valores de velocidade de soldagem regulada para manter o mesmo volume de cordão por unidade de comprimento de solda com os três gases de proteção.

4.1.2. Determinação das Tensões Mínimas e Máximas de Soldagem para cada Velocidade de Alimentação Determinada

Para se determinar a tensão mínima de soldagem para cada valor de velocidade de alimentação definido, iniciou-se soldagens regulando a velocidade de alimentação em questão e um valor de tensão que proporcione transferência por curto-circuito. Depois, soldando continuamente, decrementou-se o valor de tensão em 1 V a cada 20 s até que, visualmente¹, a transferência tornasse instável, provocando grande quantidade de respingos. Parou-se a soldagem e anotou-se este valor como valor de tensão mínima de curto-circuito.

¹ Visualmente é uma forma simplificada de se referir. Na verdade, mais do que a visão, é utiliza-se a audição para determinação do tipo de transferência.

Tabela 4.1 – Valores resultantes da velocidade de alimentação para as correntes desejadas

Gás de proteção	Velocidade de Alimentação (m/min)	Corrente de Soldagem (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
Ar + 8% CO ₂	2,05	107	20
	2,76	142	28
	3,65	172	36
	4,69	208	47
Ar + 15% CO ₂	2,00	104	20
	2,81	148	28
	3,60	175	36
	4,80	207	48
Ar + 25% CO ₂	2,00	109	20
	2,71	148	27
	3,60	181	36
	4,70	213	47

Para se determinar o valor de tensão máxima, procedeu-se da mesma forma do que no parágrafo anterior, porém incrementou-se a tensão, continuamente, até que se percebesse, visualmente, que o modo transferência atingisse uma condição combinada de curto-circuito/globular, caracterizada pelo grande espaço de tempo entre um curto e outro. A Fig. 4.2 apresenta, apenas para exemplificar o procedimento, o oscilograma da soldagem contínua com os dados dos dois testes, para a velocidade de alimentação de 2,05 m/min e gás de proteção Ar + 8% CO₂, para uma variação de tensão entre 12 e 21 V (valor mínimo e máximo determinado). A figura mostra também em destaque ampliações de trechos desse oscilograma (retirados no início e fim do oscilograma total), onde cada um apresenta um intervalo de tempo de 2 s. Para tensões médias mais baixas (em torno de 14 V), pode-se verificar grande quantidade de curtos (alta frequência de curtos) em conjunto com uma instabilidade na amplitude dos mesmos. Já para valores de tensões média mais altas (baixas em torno de 21 V), há baixíssima frequência de curtos (2 Hz), mas com grande estabilidade na amplitude dos mesmos. Estes oscilogramas apóiam a eficiência da metodologia, pois, apresentam de forma tangível o que foi percebido apenas visualmente durante as soldagens.

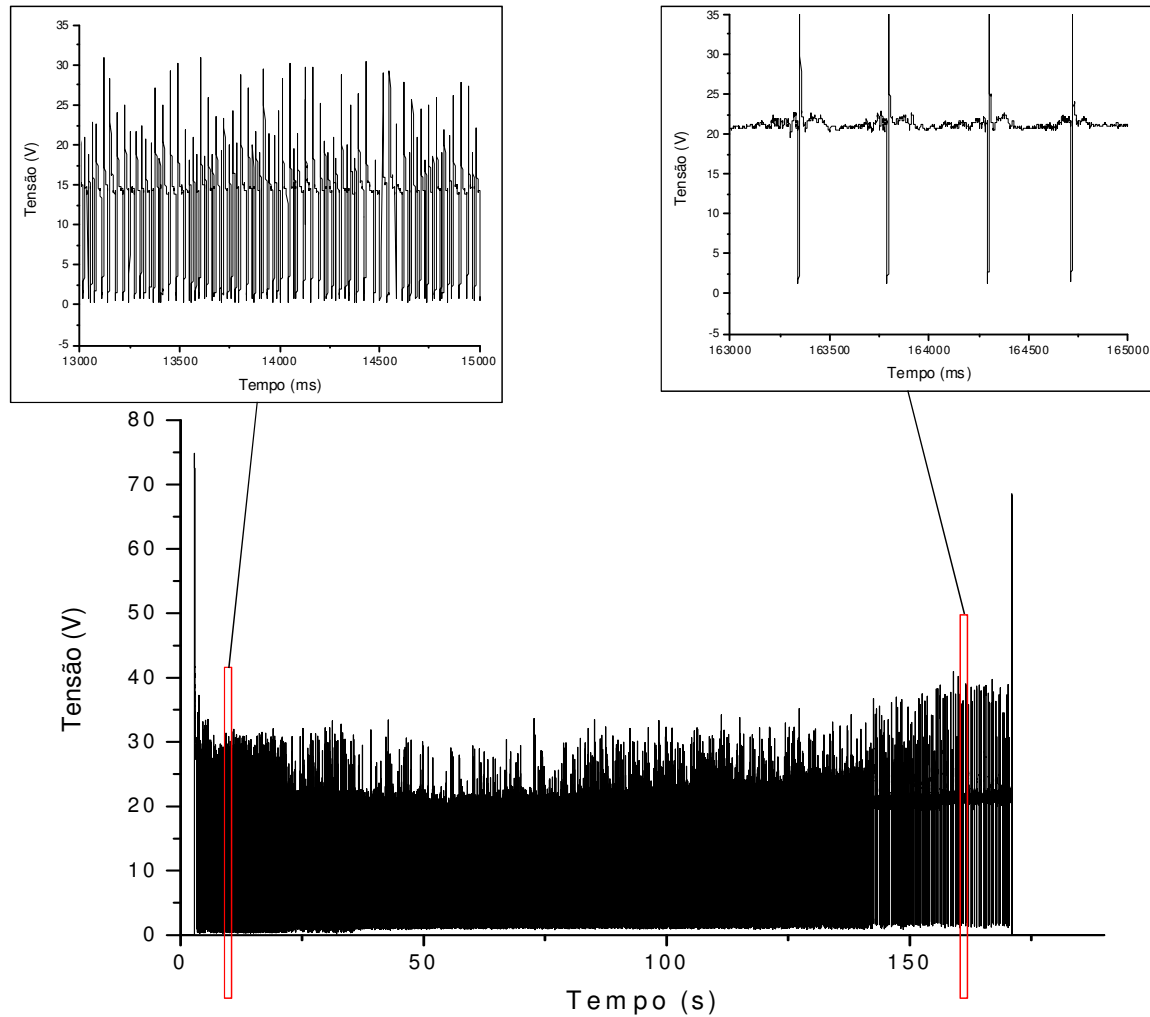


Figura 4.2 – Exemplo do oscilograma da soldagem contínua na velocidade de alimentação de 2,05 m/min para uma variação de tensão entre 12 e 21 V utilizando proteção de Ar + 8% CO₂

O mesmo procedimento foi aplicado para todos os valores de velocidade de alimentação e gases de proteção. A Tab. 4.2 apresenta a faixas de tensão de soldagem resultantes.

Tabela 4.2 – Faixa de tensão resultante do mapeamento visual do modo de transferência por curto-circuito, utilizando DBCP de 12 mm

Gás de proteção	Velocidade de Alimentação (m/min)	Faixa de Tensão de Soldagem (V)
Ar + 8% CO ₂	2,05	11,9 – 21,1
	2,76	13,7 – 23,8
	3,65	14,4 – 27,2
	4,69	15,1 – 30,0
Ar + 15% CO ₂	2,00	12,2 – 21,3
	2,81	13,6 – 25,6
	3,60	14,4 – 27,3
	4,80	15,2 – 29,0
Ar + 25% CO ₂	2,00	13,8 – 21,1
	2,71	15,4 – 22,8
	3,60	15,5 – 25,5
	4,70	14,5 – 24,4

4.1.3. Refino do Mapa Global

A faixa de tensão de soldagem levantada no item 4.1.3 pode ser considerada uma faixa grosseira, pois a avaliação foi apenas visual (mapa global). Desta forma, surge a necessidade de se refinar esta faixa de tensão, objetivando uma faixa onde a transferência esteja realmente estável (região de estabilidade operacional). Para isto, foi proposto usar um critério que medisse a estabilidade da transferência por curto-circuito. No presente estudo, aplicou-se o critério batizado de “Critério para Estabilidade de Transferência em MIG/MAG com Curto-Circuito” formado por dois parâmetros, a saber, Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc}) e Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota para Transferência por Curto-Circuito (F_{corte}).

O índice de regularidade (IV_{cc}) é baseado na premissa de que a estabilidade do processo de transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto, ou seja, acredita-se que, se os tempos sofrem pouca variação tanto em curto-circuito como em arco aberto, o processo está estável. Nessa abordagem, as constâncias nos tempos são medidas através do coeficiente de variação, que leva em conta não

somente o desvio padrão da amostra, mas também sua média. Já a F_{corte} tenta correlacionar o tamanho da gota antes de entrar contato com a poça com as frequências de curtos-circuitos. Gotas muito grandes não representam uma condição adequada para transferência por curto-circuito. Abaixo de certa frequência há grandes possibilidades das gotas serem grosseiras, ou seja, o processo está operando num modo combinado conhecido como globular/curto-circuito.

Para utilização do critério proposto, deve-se primeiro aplicar o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência em Curto-Circuito (IV_{cc}), apresentado pela Eq. 4.1. Quanto menor o valor do índice de regularidade, melhor a regularidade.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{t_{cc}}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}} \quad (4.1)$$

onde $\sigma_{t_{cc}}$ = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; $\sigma_{t_{ab}}$ = desvio padrão da média do tempo de arco aberto, t_{cc} = média do tempo de curto-circuito; t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

Um programa computacional foi desenvolvido (pelo Grupo do Laprosolda/UFU) em ambiente MatLab para medir, a partir dos dados corrente e tensão instantâneos coletados durante as soldagens, os valores médios de t_{cc} e t_{ab} , além dos valores de número e frequência de curto-circuito (F_{cc}), tensão e corrente médios e eficazes, etc. O programa também calcula e apresenta o índice de regularidade (IV_{cc}). Seu princípio de funcionamento e manual de utilização encontra-se no Anexo I.

Em seguida, deve-se calcular a frequência de corte (F_{corte}). Assumiu-se arbitrariamente que gotas com diâmetro maiores do que 25% do diâmetro do arame-eletrodo já representam o modo de transferência combinado (indesejável). Assim, é possível a partir da velocidade de alimentação (V_{alim}), do diâmetro do eletrodo (d_e) e do diâmetro da gota máximo aceitável ($d_g = 1,25 \times d_e$), calcular F_{corte} utilizando-se a Eq. 4.2.

$$F_{\text{corte}} = \frac{3V_{\text{alim}}d_e^2}{2d_g^3} \quad (4.2)$$

A Tab. 4.3 mostra a Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota para Transferência por Curto-Circuito (F_{corte}) calculada em função da velocidade de alimentação para todos os gases ensaiados.

Tabela 4.3 - Valores calculados para frequência de corte para tamanho máximo de gota (F_{corte}) em função da velocidade de alimentação/corrente de soldagem, mantendo-se DBCP de 12 mm e uma tensão regulada para curto-circuito estável para cada combinação

Gás de proteção	Velocidade de Alimentação (m/min)	Corrente de Soldagem (A)	F_{corte} (Hz)
Ar + 8% CO ₂	2,05	107	21,86
	2,76	142	29,44
	3,65	172	38,93
	4,69	208	50,02
Ar + 15% CO ₂	2,00	104	21,33
	2,81	148	29,97
	3,60	175	38,40
	4,80	207	51,20
Ar + 25% CO ₂	2,00	109	21,33
	2,71	148	28,90
	3,60	181	38,40
	4,70	213	50,13

A Fig. 4.3 apresenta o efeito da variação da tensão de soldagem (dentro da faixa de tensão mínima e máxima encontrada) sobre a frequência medida de curto-circuito (F_{cc}) e sobre o índice de regularidade (IV_{cc}) para a velocidade de alimentação de 2,05 m/min (107 A) e gás de proteção Ar + 8%CO₂. De forma similar, os mesmos gráficos foram levantados para as demais combinações da Tab. 4.3, mas por falta de espaço não são aqui apresentados, mas encontram-se no Apêndice I. Observando-se as curvas de todos os experimentos, a frequência tem uma tendência de crescer até um máximo e de cair continuamente para maiores valores de tensão de soldagem. Menores valores de frequência são esperados para maiores valores de tensão (proporcionalmente maiores comprimentos de arco), pois se criam condições para a gota crescer antes de se destacar. Já os valores muito baixos de tensão, para arcos muito curtos, pode-se justificar pelo caráter explosivo da transferência nestas condições, o que faz o arco atingir valores altos depois de cada aproximação gota-poça, demorando um pouco mais a provocar uma nova aproximação.

Observando-se agora as curvas do índice de estabilidade em função da tensão de soldagem (exemplificada na Fig. 4.3), pôde-se verificar que o índice tem a característica de diminuir e depois novamente aumentar seu valor com o aumento da tensão de soldagem. Como valores menores do índice indicam melhor estabilidade, verifica-se que o processo tem pouca estabilidade para tensões muito baixas e muito altas, como esperado. Kang e Rhee (2001) também obtiveram resultados parecidos quando capturaram a quantidade de respingos gerada em função da tensão de soldagem para quatro valores de corrente de soldagem. Os gráficos destes autores são mostrados na Fig. 4.4. Mita; Sakabe; Yokoo (1988) propuseram um índice de regularidade também baseado em parâmetros estatísticos (mas de forma diferente e utilizando regressão linear) e com valores menores indicando melhor estabilidade. A Fig.4.5 apresenta os resultados obtidos por estes autores do índice de regularidade em função da tensão de soldagem para misturas com diferentes teores de CO_2 , onde se pode observar a mesma tendência do índice proposto neste trabalho. Novamente na Fig. 4.3, é interessante se notar que o mínimo de IVcc não coincide com o máximo de Fcc .

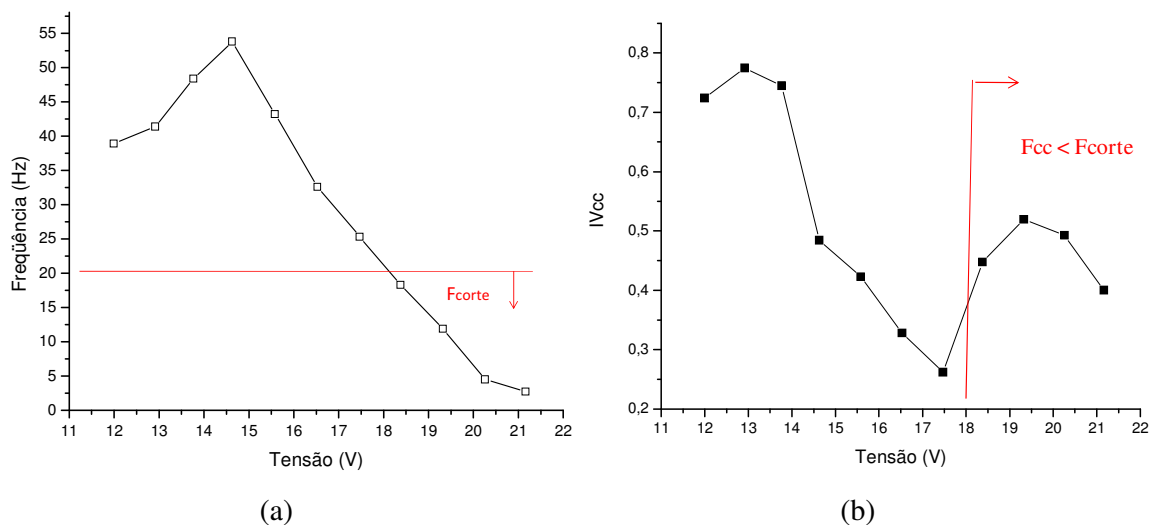


Figura 4.3 - Curvas de frequência de curto-circuito medida (a) e índice de regularidade (IVcc) calculado (b), em função da tensão de soldagem para velocidade de alimentação de 2,05 m/min (107 A) e gás de proteção Ar + 8% CO_2

Para o refino da faixa de tensão obtida nos experimentos, o Critério para Estabilidade de Transferência em MIG/MAG com Curto-Circuito foi aplicado. Utilizando-se das curvas de frequência (exemplificada na Fig. 4.3) e os valores da frequência de corte (F_{corte} na Tab. 4.3) determinaram-se inicialmente os valores de tensão que proporcionavam somente transferência

por curto-circuito. Trabalhando agora apenas sobre a faixa restante dos valores de tensão de soldagem, determinou-se arbitrariamente os valores de tensão que estão no vale das curvas do índice IVcc; no caso da Fig. 4.3, tomou-se como regular as tensões entre 14,6 e 17,4 V.

A Tab. 4.4 mostra uma comparação entre a faixa de tensão de soldagem (obtida visualmente) e a faixa de tensão refinada (obtida através do critério).

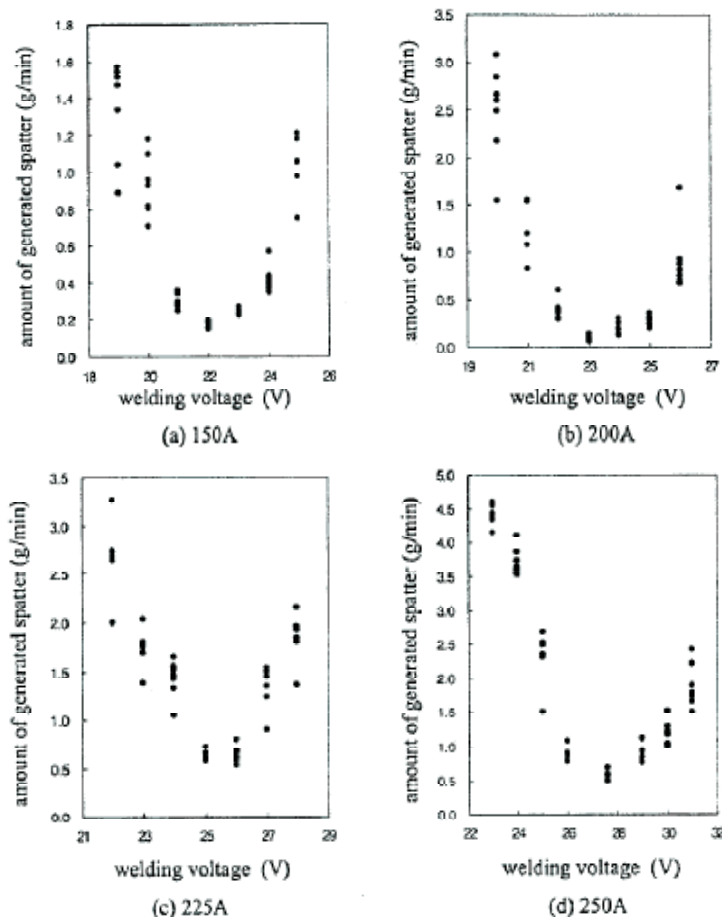


Figura 4.4 - Curvas da quantidade de respingos gerados em função da tensão de soldagem para quatro valores de corrente (KANG; RHEE, 2001)

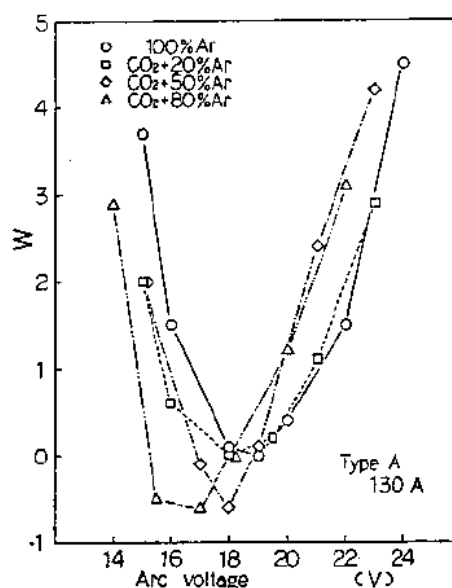


Figura 4.5 – Índice de regularidade (W) em função da tensão de soldagem para soldagens utilizando arame maciço de aço com 1,2 mm de diâmetro (MITA; SAKABE; YOKOO, 1988)

Tabela 4.4 – Faixa de tensão resultante do mapeamento visual do modo de transferência por curto-circuito e da posterior aplicação do critério de estabilidade, utilizando DBCP de 12 mm

Gás de proteção	Velocidade de Alimentação (m/min)	Faixa de Tensão de Soldagem (V)	Faixa de Tensão Refinada (V)
Ar + 8% CO ₂	2,05	11,9 – 21,1	14,6 – 17,4
	2,76	13,7 – 23,8	15,3 – 18,2
	3,65	14,4 – 27,2	16,1 – 19,0
	4,69	15,1 – 30,0	16,0 – 19,7
Ar + 15% CO ₂	2,00	12,2 – 21,3	15,5 – 18,4
	2,81	13,6 – 25,6	15,3 – 19,0
	3,60	14,4 – 27,3	16,0 – 19,8
	4,80	15,2 – 29,0	15,9 – 20,7
Ar + 25% CO ₂	2,00	13,8 – 21,1	17,5 – 19,2
	2,71	15,4 – 22,8	18,2 – 21,0
	3,60	15,5 – 25,5	19,1 – 21,8
	4,70	14,5 – 24,4	18,9 – 20,8

4.1.4. Levantamento da Região Estabilidade Operacional para Soldagem por Curto-Circuito

A Fig. 4.6 apresenta a região de transferência por curto-circuito, mostrando como faixa aconselhável de trabalho para o dado arame, DBCP e os 3 tipos de gases, a faixa de tensão já refinada.

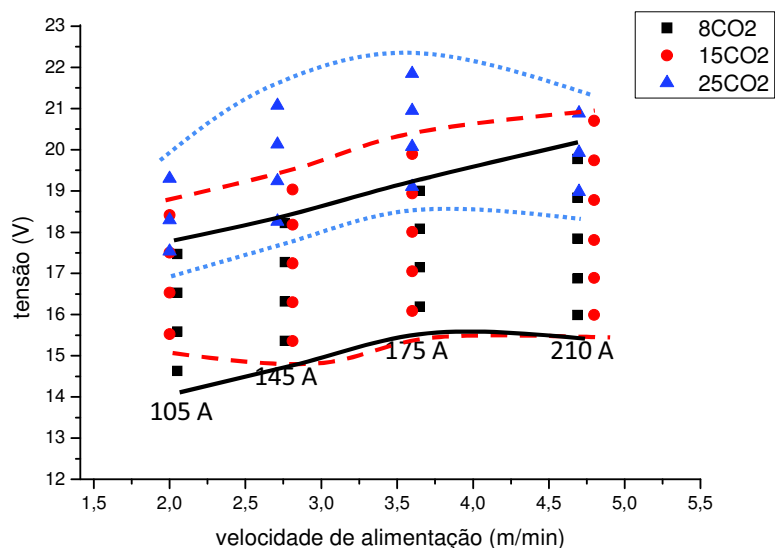


Figura 4.6 – Regiões de estabilidade operacional para o modo curto-circuito para o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e utilizando DBCP de 12 mm na polaridade CC+

A Fig. 4.6 permite observar que a relação entre a corrente e a velocidade de alimentação não foi significativamente afetada pela mudança no gás de proteção, pelo menos para as condições utilizadas neste levantamento.

Ainda nesta figura pode-se observar também que, para misturas mais ricas em CO_2 existe uma tendência da faixa de operação com regularidade de transferência ter valores mais altos de tensão, ou seja, na prática, deve-se trabalhar com maiores valores de tensão quando se utiliza gases mais ricos em CO_2 . O CO_2 tem maior potencial de ionização e maior capacidade de troca de calor do que o Ar. Desta forma, para uma mesma tensão e corrente, o aumento do teor de CO_2 diminui o comprimento do arco para equilibrar o valor de tensão disponível. Então, para que o arco volte ao comprimento desejável, a tensão deve se tornar maior. Assim, para maiores teores de CO_2 é necessário que a tensão seja maior para que o comprimento do arco seja adequado para promover transferência com regularidade.

4.2. Mapeamento do Modo de Transferência Goticular

Todas as etapas para o mapeamento foram realizadas para os três gases de proteção propostos: Ar + 8%CO₂; Ar + 15%CO₂; e Ar + 5%O₂. A DBCP utilizada foi de 18 mm e a posição do bico de contato em relação ao bocal da tocha é mostrada na Fig. 4.7. Soldagens preliminares foram realizadas para determinar uma velocidade de soldagem de forma que o volume do cordão fosse visualmente adequado para este tipo de transferência. Para todas as soldagens a relação velocidade de soldagem (cm/min)/velocidade de alimentação (m/min) foi mantida em 5,6 cm/m.

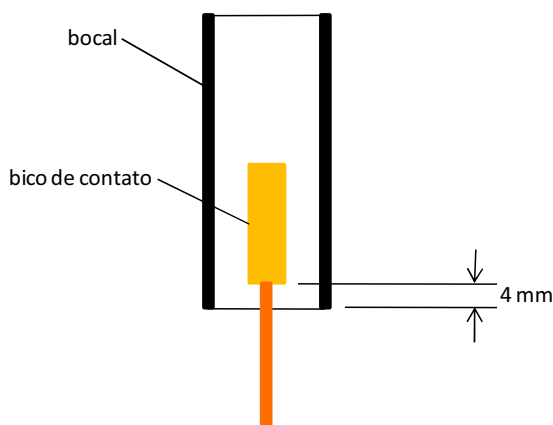


Figura 4.7 – Posicionamento do bico de contato em relação ao bocal da tocha utilizado nas soldagens no modo goticular

4.2.1. Determinação da Corrente de Transição

Para determinar a corrente de transição, iniciou-se a soldagem em uma condição de regulagem de velocidade de alimentação e tensão que promovesse transferência globular e, enquanto a soldagem ocorria, incrementou-se continuamente a velocidade de alimentação até que, visualmente, se percebesse que a transferência havia mudado para goticular. Depois, utilizando os oscilogramas foi determinada a corrente. A Fig. 4.8 apresenta, de forma a exemplificar o procedimento, os oscilogramas dos parâmetros de soldagem para este teste. Pode-se observar a variação da corrente quando se varia a velocidade de alimentação. A curva de corrente apresenta, inicialmente, com certa amplitude de variação e uma ondulação de baixa frequência, característica de oscilogramas de transferência globular. Com o aumento da corrente, repentinamente o oscilograma passa a ficar mais “liso”, ou seja, a amplitude de variação da corrente diminui e a ondulação desaparece, sendo que esta é uma característica de

oscilogramas de corrente de transferência goticular. Ainda na Fig. 4.8, pode-se verificar que o oscilograma de tensão também apresenta uma repentina diminuição da amplitude de variação com o incremento da velocidade de alimentação, indicando também uma mudança no comportamento da transferência metálica. Portanto, pode se considerar que em torno do tempo de aquisição de 23 s têm-se a velocidade de alimentação (pouco maior do que 7 m/min) e, conseqüentemente, a corrente de soldagem nas quais a transferência metálica se encontra no modo goticular (aproximadamente 282 A). Para garantir que o mapa fosse confeccionado no modo goticular, assumiu-se como a velocidade de alimentação de transição globular-goticular a encontrada pelo método acima, arredondada para cima em aproximadamente 1 m/min (para o exemplo, usou-se 8 m/min). A Tab. 4.5 apresenta os valores determinados para velocidade de alimentação e os valores aproximados das correntes de transição para os três gases testados.

Resende; Keocheguerian; Vilarinho (2009) utilizando basicamente as mesmas condições paramétricas que neste trabalho, encontraram correntes de transição de 274, 281 e 228 A, respectivamente para os gases Ar + 8%CO₂, Ar + 15%CO₂ e Ar + 5%O₂, valores estes um pouco menores do que os valores encontrados neste trabalho. A diferença maior entre os dois trabalhos foi que o primeiro utilizou filmagens com perfilografia para caracterizar o momento da transição, enquanto no presente trabalho utilizou-se apenas os oscilogramas. Considerando que corrente de transição na verdade é uma faixa, pode-se dizer que ambos resultados são coerentes.

A Tab. 4.5 ainda mostra que o aumento do teor de CO₂ no gás aumentou a faixa de corrente de transição e que a adição de O₂ diminuiu a faixa de corrente de transição, em comparação com os outros dois gases estudados. Scotti (2000) apresenta em seu estudo resultados que mostram haver queda da faixa de corrente de transição com a adição de apenas 1 e 2% de O₂ em Ar, utilizando arame-eletrodo de aço inoxidável ER308L de 0,889 mm de diâmetro. Modenesi e Nixon (1994) também obtiveram como resultado experimental a diminuição da corrente de transição para adição de até 5% de O₂, porém, diferentemente de Scotti (2000), utilizando o arame-eletrodo de aço carbono ER70S-3 de 1,2 mm de diâmetro. Tais resultados corroboram os resultados encontrados no presente trabalho.

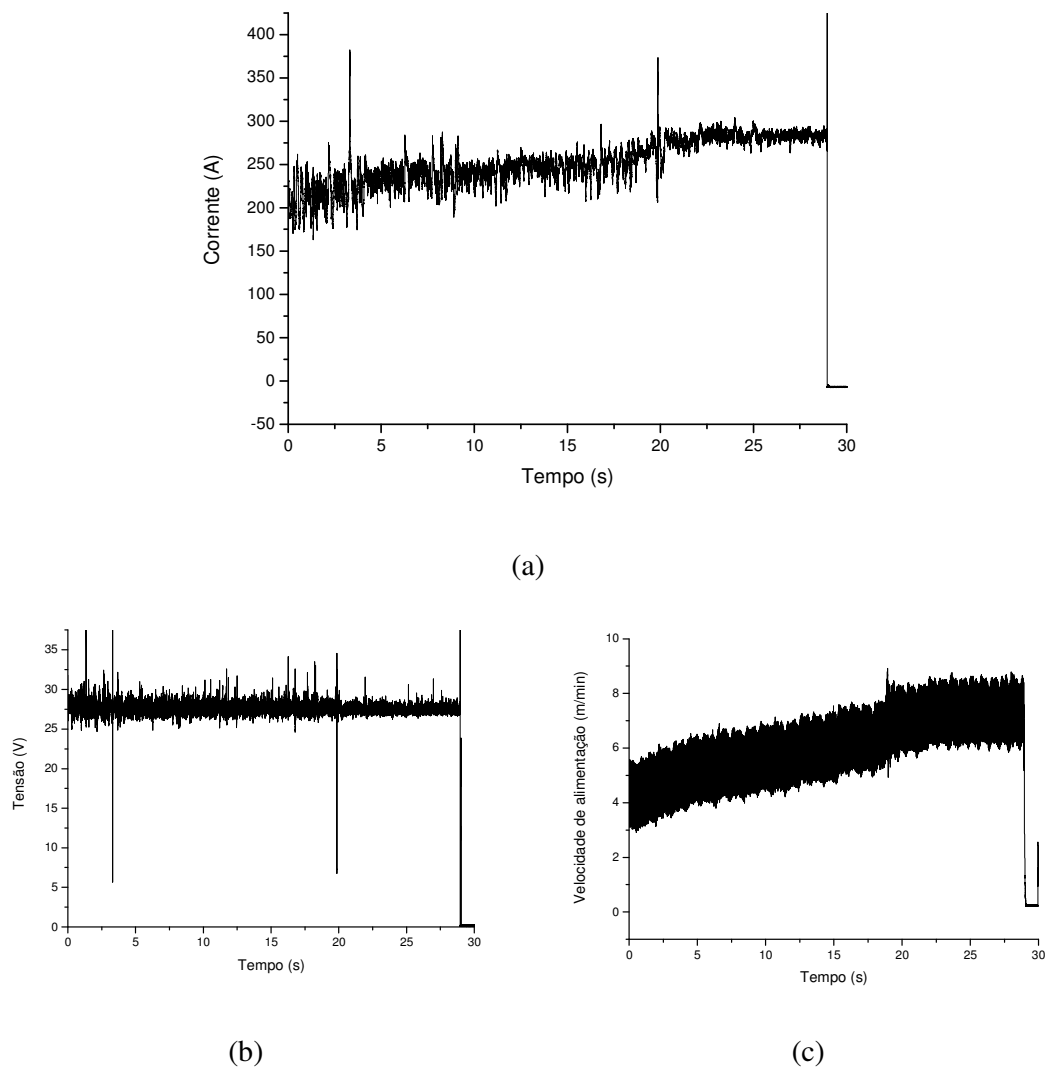


Figura 4.8 – Oscilogramas de corrente (a), tensão (b) e velocidade de alimentação (c) para o teste de determinação da corrente de transição utilizando como gás de proteção Ar + 8% CO₂

Tabela 4.5 – Velocidades de alimentação e corrente de transição utilizando DBCP de 18 mm

Gás de proteção	Veloc. alimentação assumida como de transição (m/min)	Corrente de transição (A)
Ar + 8% CO ₂	8	282
Ar + 15% CO ₂	8	296
Ar + 5% O ₂	7	246

4.2.2. Determinação da Velocidade de Alimentação para Proporcionar a Corrente de 400 A

Para determinação da velocidade de alimentação que proporcionava a corrente de soldagem de 400 A, incrementou-se a velocidade de alimentação, naturalmente corrigindo-se a tensão caso o arco ficasse muito curto, até que se alcançasse a corrente desejada. A Tab. 4.6 apresenta os valores de velocidade de alimentação para a corrente aproximadamente 400 A em função do gás de proteção. Observa-se nesta tabela que o aumento do teor de CO₂ não apresentou muita influência nas correntes desejadas, ou seja, as correntes de 400 A são próximas para Ar + 8% CO₂ e Ar + 15% CO₂. Porém, quando se altera a mistura para Ar + 5% O₂ o resultado é um pouco diferente.

Tabela 4.6 – Velocidades de alimentação para corrente de 400 A utilizando DBCP de 18 mm

Gás de proteção	Velocidade de alimentação para
	alcançar corrente de 400 A (m/min)
Ar + 8% CO ₂	14
Ar + 15% CO ₂	14
Ar + 5% O ₂	14,5

4.2.3. Escolha das Outras Velocidades de Alimentação para Completar o Mapa

Com a determinação da velocidade de alimentação mínima e máxima, propõem-se mais dois valores de velocidade para completar o mapa. A Tab. 4.7 apresenta as velocidades de alimentação utilizadas para confeccionar o mapa no modo goticular em função do gás de proteção.

Tabela 4.7 – Velocidades de alimentação utilizadas para confecção do mapa no modo goticular utilizando DBCP de 18 mm

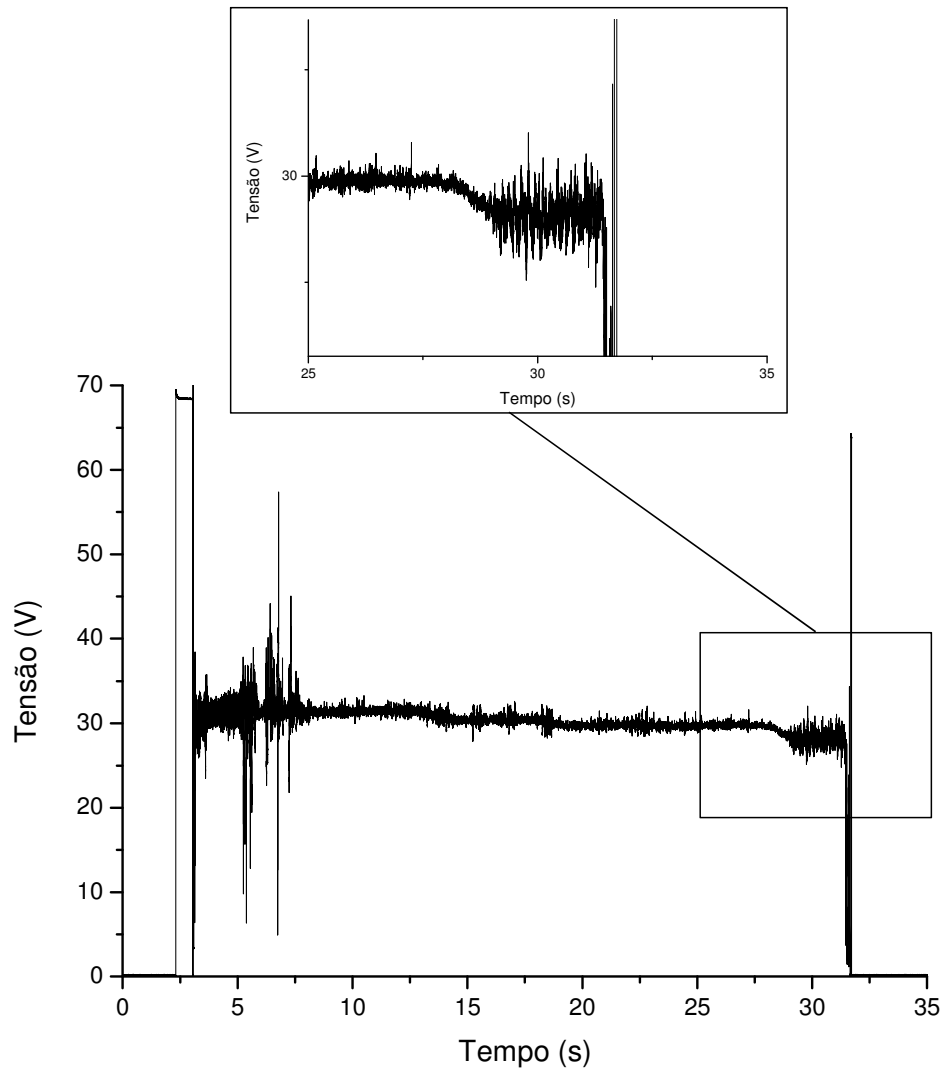
Gás de proteção	Veloc. Alim. para	Veloc. Alim.	Veloc. Alim. para
	corrente de transição (m/min)	intermediárias (m/min)	corrente de 400 A (m/min)
Ar + 8% CO ₂	8	10 e 12	14
Ar + 15% CO ₂	8	10 e 12	14
Ar + 5% O ₂	7	9,5 e 12	14,5

4.2.4. Determinação das Tensões Mínimas e Máximas de Soldagem para cada Valor de Velocidade de Alimentação Determinado

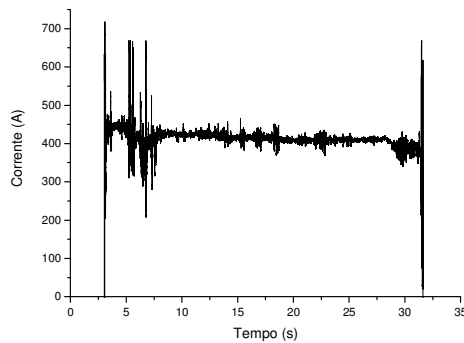
Para determinação da tensão mínima de soldagem, por exemplo, para corrente máxima (400 A), regulou-se o valor de 14 m/min para velocidade de alimentação e um valor de tensão de soldagem suficiente para transferência goticular. Depois, a partir da tensão regulada diminuiu-se o valor da tensão gradativamente até que se, visualmente, percebesse a ocorrência de curtos-circuitos. A Fig. 4.9 apresenta o oscilograma de tensão, corrente e velocidade de alimentação deste teste durante todo o tempo de teste e um oscilograma entre os instantes 25 e 35 s. Observa-se que a gradual diminuição de tensão provocou em um determinado momento (por volta de 29 s) a instabilidade do processo. Este mesmo fenômeno pode ser visto no oscilograma de corrente, enquanto o oscilograma de velocidade de alimentação mostra que esta não variou durante a soldagem. Desta forma, fica caracterizada que a tensão imediatamente antes da ocorrência da instabilidade como a tensão mínima de soldagem para estas condições, neste caso a tensão de aproximadamente 29 V.

Para determinação da tensão máxima de soldagem, aumentou-se o valor da tensão até que, visualmente, o arco atingisse um comprimento de aproximadamente 8 mm. O critério adotado para considerar o comprimento de arco alto foi a estabilidade apresentada por ele. Acima do comprimento proposto percebia-se que o arco apresentava um comportamento instável. Para determinar visualmente o comprimento do arco durante a soldagem, utilizou-se o bocal da tocha como referência. A Fig. 4.10 ilustra o comprimento do arco em relação ao bocal segundo o critério adotado. Quando o comprimento do arco ficava um pouco acima do meio da distância entre o bocal e a chapa considerava-se o arco alto.

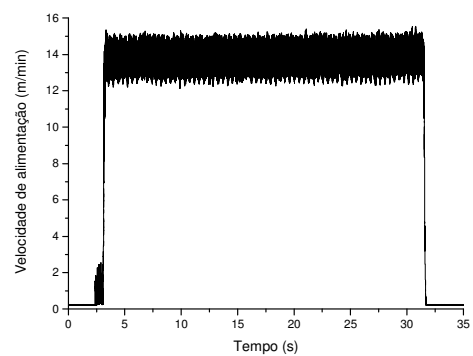
Após a realização dos testes para a mistura Ar + 8% CO₂, repetiu-se os testes utilizando o mesmo procedimento para as misturas Ar + 15% CO₂ e Ar + 5% O₂. As faixas de tensão resultantes são apresentadas na Tab. 4.8.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9 – Oscilogramas de tensão (a), corrente (b) e velocidade de alimentação (c) para determinação da tensão mínima de soldagem sem curtos-circuitos. Velocidade de alimentação regulada em 14 m/min, DBCP de 18 mm e gás de proteção Ar + 8%CO₂.

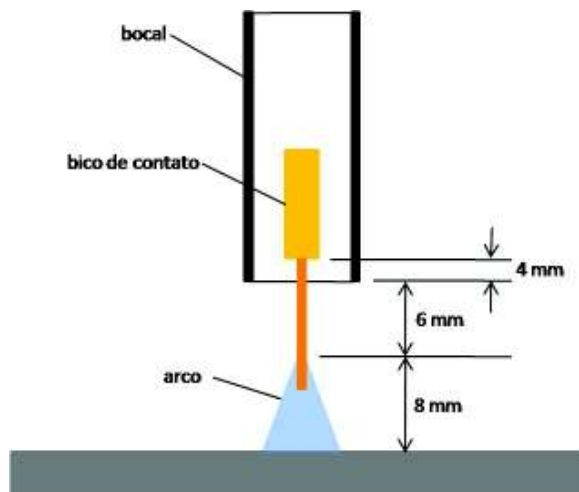


Figura 4.10 – Ilustração do comprimento do arco em relação ao bocal segundo o critério adotado

Tabela 4.8 – Faixa de tensão resultante do mapeamento visual do modo de transferência goticular, utilizando DBCP de 18 mm

Gás de proteção	Velocidade de alimentação (m/min)	Faixa de Tensão de Soldagem (V)
Ar + 8% CO ₂	8	27,5 – 31,1
	10	27,1 – 32,1
	12	28,5 – 31,0
	14	30,4 – 34,5
Ar + 15% CO ₂	8	27,3 – 32,6
	10	27,9 – 33,5
	12	28,8 – 32,3
	14	31,4 – 35,0
Ar + 5% CO ₂	7	25,1 – 27,7
	9,5	27,6 – 31,1
	12	29,2 – 31,8
	14,5	30,7 – 33,6

4.2.5. Levantamento da Região Estabilidade Operacional para Soldagem no Modo Goticular

A Fig. 4.11 apresenta o gráfico com os valores de tensão de soldagem em função da velocidade de alimentação para soldagem no modo goticlar, seguindo o procedimento adotado e utilizando as três misturas propostas. Nota-se nesta figura que, no geral, os valores de tensão de operação para este modo de transferência são maiores para a proteção de Ar + 15%CO₂, seguido por Ar + 8%CO₂ e Ar + 5%O₂. Isto significa dizer que a tensão necessária para obter um arco de comprimento aproximado de 8 mm cresce com o aumento da quantidade de O₂/CO₂ na mistura do gás de proteção. Como já mostrado no capítulo de revisão bibliográfica, Zielinska et al (2008) variaram a quantidade de CO₂ em argônio para mostrar a influência do CO₂ na tensão do arco (Fig. 4.12). Estes resultados são devidos a uma maior necessidade de energia para manutenção do arco com CO₂, quando comparado com Ar, por causa da sua maior capacidade de troca de calor e maior potencial de ionização. Pelo mesmo motivo deve ocorrer o aumento da tensão quando se adiciona O₂ no gás de proteção.

Já a tensão mínima de soldagem que não provoca curtos-circuitos é praticamente a mesma para todos os gases e em todas as velocidades de alimentação testadas, exceto pela diferença observada na velocidade de alimentação 7 m/min e gás de proteção Ar + 5%O₂, onde a tensão pode ser decrementa até valores mais baixos.

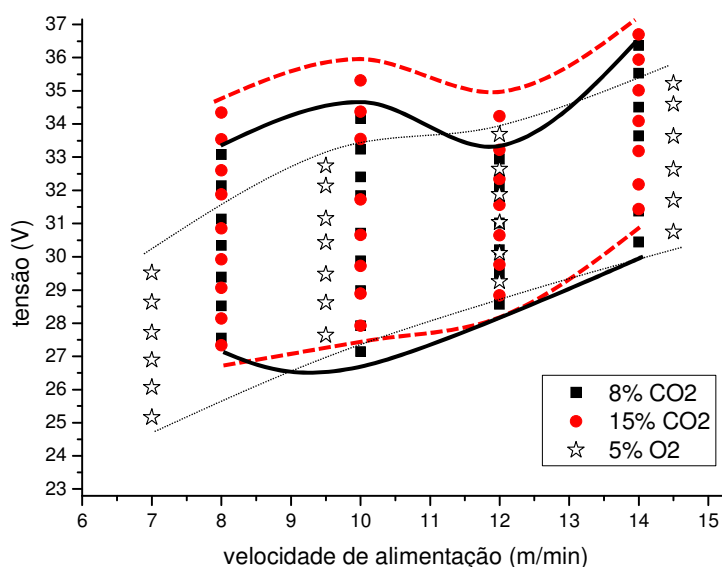


Figura 4.11 – Região de estabilidade operacional para o modo goticlar para o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e utilizando DBCP de 18 mm na polaridade CC+

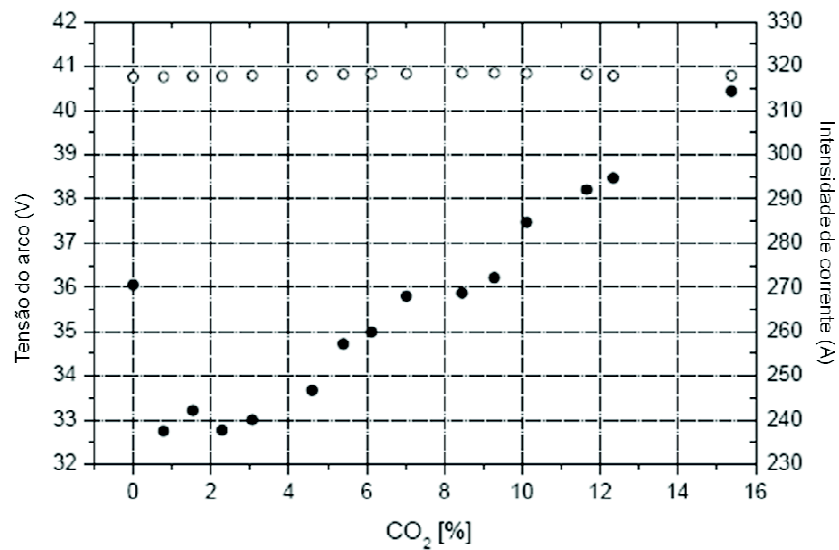


Figura 4.12 – Influência da adição de CO₂ em Ar na tensão de soldagem para o processo operando no modo corrente constante (≈ 318 A) com velocidade de alimentação de 9 m/min e DBCP de 20 mm, na soldagem de aço carbono (modificado ZIELINSKA et al, 2008)

4.2.6. Determinação do Efeito da Tensão de Soldagem sobre o Valor da Corrente, para Mesma Velocidade de Alimentação, no Modo de Transferência Goticular

Para verificar o comportamento da corrente em função da variação da tensão, construíram-se gráficos de tensão versus corrente para cada variação da tensão com velocidade de alimentação constante. Estas curvas são conhecidas por isoconsumo e são apresentadas na Fig. 4.13. Por estas curvas é possível observar a variação na corrente de soldagem em função da variação na regulação da tensão. Isto ocorre devido à variação do comprimento do arco, que é proporcional à variação na tensão, que provoca uma variação no comprimento energizado de eletrodo e conseqüentemente na corrente de soldagem.

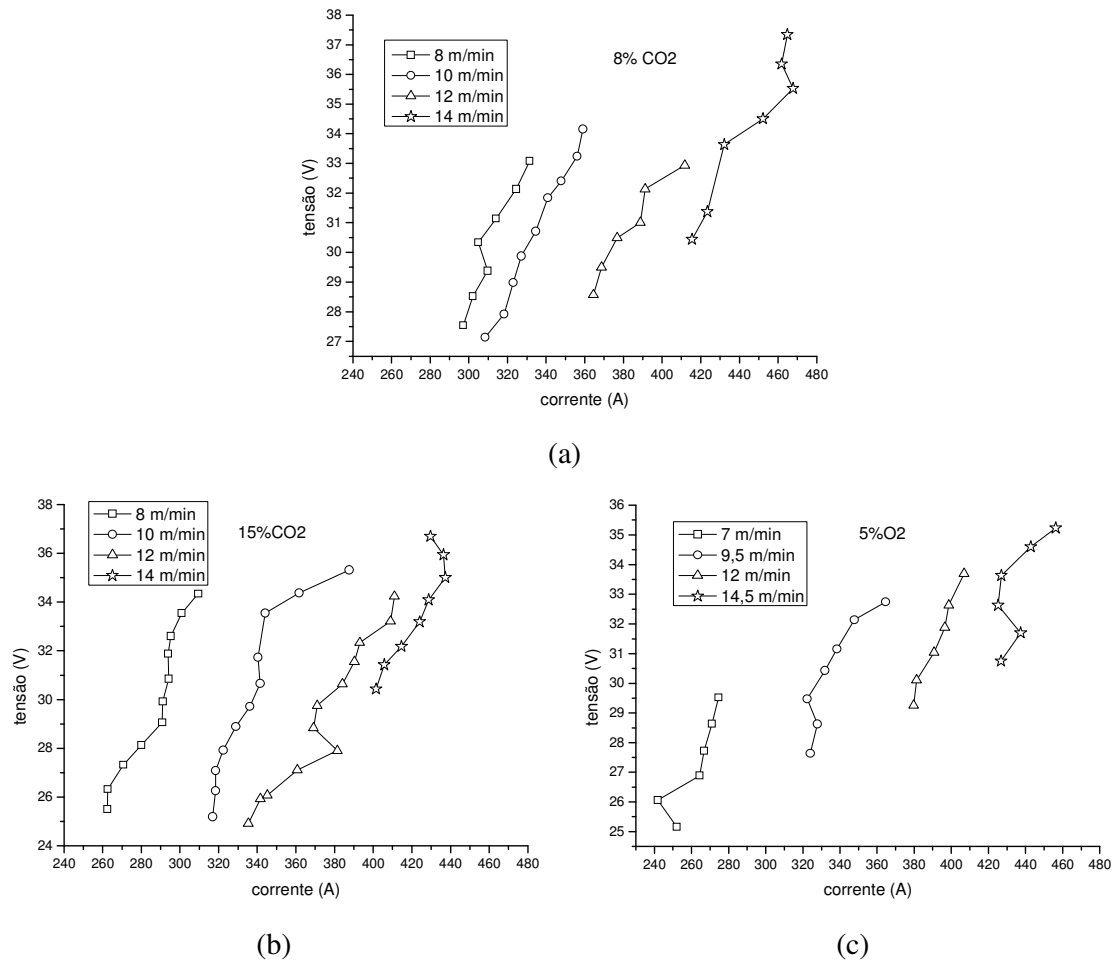


Figura 4.13 – Comportamento da corrente diante da variação da regulação da tensão mantendo-se a velocidade de alimentação fixa, utilizando DBCP de 18 mm. (a) Ar + 8%CO₂ (b) Ar + 15%CO₂ (c) Ar + 5%O₂

CAPÍTULO V

INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA BICO DE CONTATO-PEÇA (DBCP) SOBRE A REGIÃO DE ESTABILIDADE OPERACIONAL DOS MAPAS TRANSFERÊNCIA

Foram realizadas soldagens com objetivo de verificar a influência da DBCP nas regiões de estabilidade operacional dos mapas de transferência levantados. Nesta fase, as soldagens foram realizadas em sucatas para varredura dos valores de tensão, conforme metodologia proposta. A tocha foi posicionada de modo perpendicular à placa de teste (ângulos de trabalho e ataque iguais a zero). A indutância da fonte foi regulada na posição zero (indicado pela palavra *off* no painel de regulagem).

5.1. Influência do Aumento da DBCP no Modo de Transferência por Curto-Circuito

Para verificação da influência do aumento da DBCP na região de estabilidade operacional de transferência por curto-circuito, foram realizadas soldagens alterando-se a DBCP de 12 mm para 16 mm. O teste foi realizado somente para o gás de proteção Ar + 8%CO₂ e para uma corrente de 150 A, esta última escolhida por ser valor médio da faixa de corrente proposta para soldagem por curto-circuito.

O procedimento utilizado para a varredura da faixa de tensão para soldagem por curto-circuito utilizando a DBCP de 16 mm foi o mesmo utilizado para DBCP de 12 mm. Primeiro encontrou-se a velocidade de alimentação que proporcionava a corrente desejada (neste caso 150 A), para um dado valor de tensão. Depois, fixando-se a velocidade de alimentação encontrada, variou-se a tensão de referência para encontrar a tensão mínima e máxima que,

visualmente, promovia transferência por curto-circuito. Finalmente, foi utilizado o critério de estabilidade proposto para refinar a faixa de tensão, mantendo-se somente as tensões que proporcionavam transferência regular segundo o critério.

A Fig. 5.1 apresenta a influência da mudança na DBCP na região de estabilidade para o gás em questão. Pode-se verificar que o aumento da DBCP leva à diminuição da faixa de valores de tensão em que o processo opera estável. Isto indica que, na prática, quando se aumenta a somente a DBCP sem mexer em outros parâmetros/condições deve-se diminuir a tensão para manter o processo operando estável.

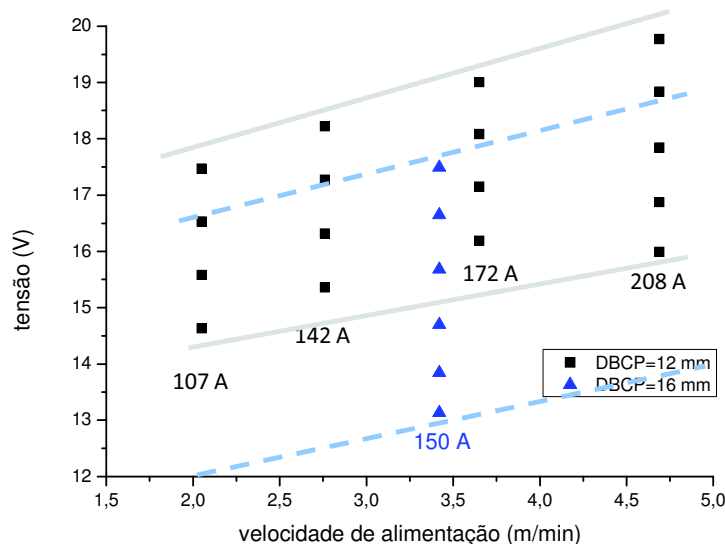


Figura 5.1 – Influência do aumento da DBCP na faixa de tensão de soldagem com o processo operando com proteção de Ar + 8%CO₂ na região de estabilidade operacional

Pode-se explicar o fato da queda da faixa de tensão em que o processo opera estável pela análise do que ocorre com o comprimento energizado do eletrodo (l), comprimento do arco (a) e corrente de soldagem (I). A DBCP é formada pelo somatório do comprimento do arco mais o comprimento energizado do eletrodo. O aumento da DBCP causa uma alteração nestas parcelas de comprimento. Com ajuda da Fig. 5.2, algumas suposições podem ser feitas com intuito de determinar, por meio da análise dos parâmetros, o que ocorre com os comprimentos do arco, do eletrodo energizado e com a corrente de soldagem.

Toma-se como primeira hipótese a de que o aumento da DBCP provoque a diminuição do comprimento do arco a₀, ou seja, que o comprimento do arco passasse da posição 0 para posição 1 (Fig. 5.2). Se esta diminuição do arco ocorresse, provocaria um aumento na

corrente de soldagem de I0 para I1. A velocidade de alimentação de arame não foi variada durante o experimento para determinação da faixa de tensão de operação e, por isso, o consumo ficou constante. Assim, se a corrente de soldagem aumentar, para manter o consumo constante o comprimento energizado de arame deve diminuir. Como a hipótese inicial assumiu que o comprimento de arco diminuiria, se o comprimento energizado de eletrodo diminuir também, a DBCP não poderia aumentar, tornando a hipótese de que o aumento da DBCP provocasse a diminuição do comprimento de arco falsa.

Agora, tomando-se como segunda hipótese de que o aumento da DBCP não afetaria o comprimento do arco, então, a corrente ficaria constante e, para o consumo constante, o comprimento de arame energizado também ficaria constante. Então, se o comprimento do arco ficar constante, o comprimento do eletrodo energizado também deveria ficar invariável, tornando esta hipótese falsa, pois a DBCP foi aumentada.

Finalmente, tomando como terceira hipótese de que o aumento da DBCP provocasse o aumento do comprimento do arco a0, ou seja, que o comprimento do arco passasse da posição 0 para posição 2. Se este aumento do arco ocorresse, provocaria uma diminuição na corrente de soldagem de I0 para I2. Assim, se a corrente de soldagem diminuir, para manter o consumo constante, o comprimento energizado de arame deve aumentar. Como a hipótese inicial foi de que o comprimento de arco aumentaria, se o comprimento energizado de eletrodo aumentar também, a DBCP poderia aumentar, tornando a hipótese de que o aumento da DBCP provocasse o aumento do comprimento de arco possível.

É aceitável admitir que exista uma relação entre o comprimento do arco e a estabilidade do processo. Portanto, acredita-se que o aumento do comprimento do arco devido ao aumento da DBCP, provoca a desestabilização do processo. Assim, para se corrigir o tamanho do arco deve-se diminuir a tensão de soldagem. Por isso, para maiores valores de DBCP é necessário a utilização de tensões mais baixas para manter o processo operando estável.

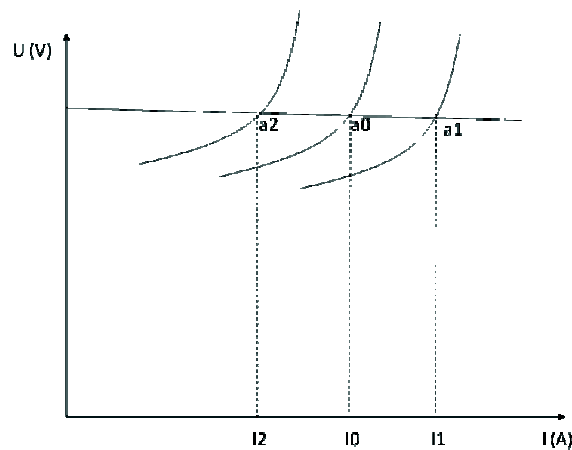


Figura 5.2 – Consequência da variação do comprimento de arco, na corrente e tensão de soldagem, em uma fonte de tensão constante

Para se comprovar a hipótese que o arco aumenta quando se aumenta a DBCP (lembrando que a tensão e a velocidade de alimentação não foram alteradas), realizou-se um experimento em que durante uma soldagem feita sobre chapa a DBCP foi alterada de 12 para 16 mm de forma contínua (sem que o arco fosse extinto para reiniciar a outra). A Fig. 5.3 ilustra a trajetória realizada pela ponta do bico de contato da tocha. As Figs. 5.4 e 5.5 mostram, respectivamente, os oscilogramas de tensão e corrente de soldagem para o experimento em questão. O oscilograma de tensão mostra que mesmo após a mudança na DBCP a tensão média não muda, como esperado de uma fonte operando no modo de tensão constante. Já no oscilograma de corrente, é possível verificar, pela linha que mostra a corrente média, que esta diminui quando a DBCP muda de 12 para 16 mm. Este resultado está de acordo com a hipótese levantada anteriormente. Porém, para validá-la totalmente seria necessário medir o comprimento do arco. Ferreira Filho e Ferraresi (2006) encontraram resultados que corroboram a hipótese acima, mostrando que o aumento da DBCP diminui o valor da corrente de soldagem (Fig. 5.6), quando todos os parâmetros são mantidos fixos e utilizando uma fonte eletrônica regulada para operar em tensão constante. Diante disto, toma-se como verdadeira a hipótese de aumento do comprimento do arco como consequência do aumento da DBCP.

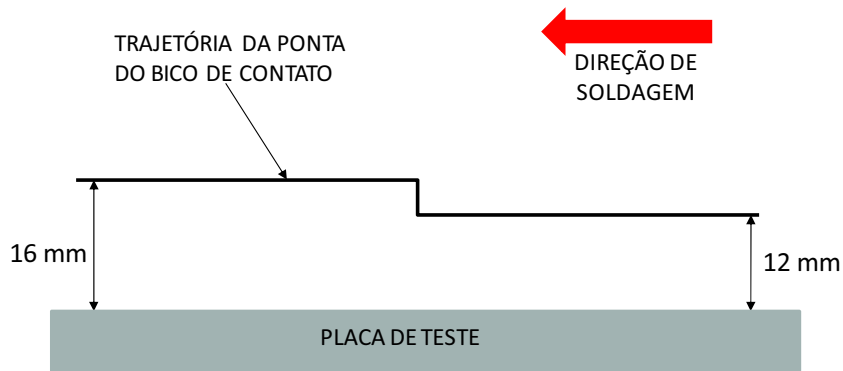


Figura 5.3 – Ilustração da trajetória realizada pela ponta do bico de contato da tocha durante a soldagem onde a DBCP foi alterada de 12 para 16 mm

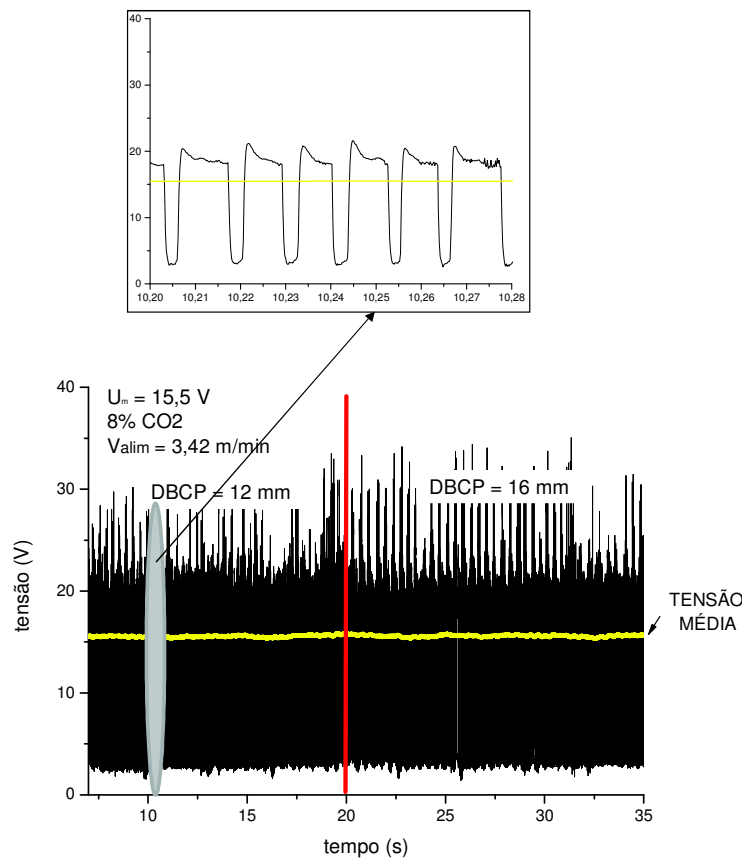


Figura 5.4 – Oscilograma de tensão em função do tempo para o teste de variação da DBCP. A linha vermelha indica o instante em que a mudança da DBCP ocorreu. Foi realizado um aumento no gráfico, por volta do instante de 10 s, para permitir a visualização do comportamento da tensão

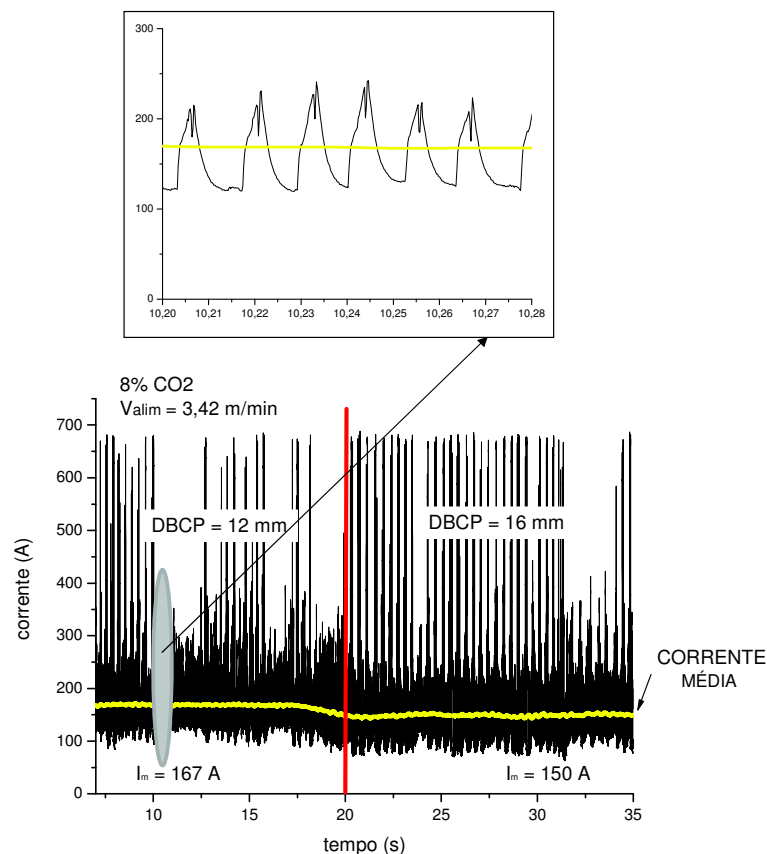


Figura 5.5 – Oscilograma de corrente em função do tempo para o teste de variação da DBCP, onde a linha vermelha indica o instante em que a mudança da DBCP ocorreu (foi realizado um aumento no gráfico, por volta do instante de 10 s, para permitir a visualização do comportamento da corrente

A Fig. 5.7 apresenta o gráfico de tensão versus corrente dos experimentos realizados com o gás de proteção em questão. Nesta figura, pode-se perceber que os experimentos realizados com DBCP de 12 mm, durante o levantamento dos mapas, apresentaram pouca variação da corrente de soldagem diante da variação da tensão de soldagem. Entretanto, para a DBCP de 16 mm, ocorreu significativa variação dos valores de corrente diante da variação da tensão. A explicação da diferença na resposta da corrente frente à variação da tensão, entre as duas DBCPs, está no comprimento energizado de eletrodo. Considerando que todas as faixas de tensão apresentadas na figura estão na região de estabilidade operacional e, por isso, com comprimentos de arco similares, a diferença da DBCP de 12 e 16 mm se traduz quase que totalmente em uma diferença no comprimento energizado do eletrodo. Assim, acredita-se que para um maior comprimento de arame energizado (DBCP de 16 mm) a variação de

comprimento (devido à mudança na tensão) fica mais pronunciada, obrigando uma variação significativa da corrente no sentido de manter o consumo constante.

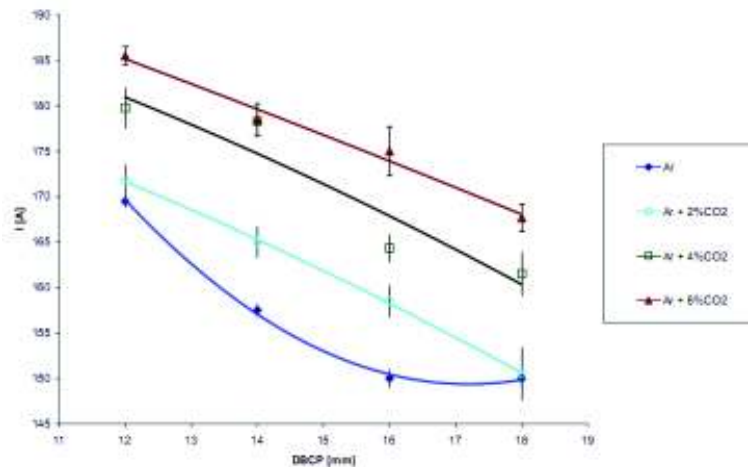


Figura 5.6 - Influência da DBCP na corrente para Ar e Ar + CO₂, utilizando arame-eletrodo ER430 de 1,2 mm de diâmetro, tensão de regulagem de 20 V, velocidade de soldagem de 20 cm/min e velocidade de alimentação de 5,3 m/min (FERREIRA FILHO; FERRARESI, 2006)

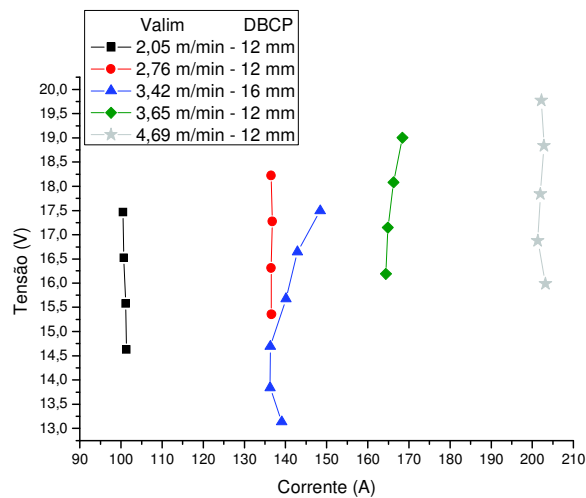


Figura 5.7 – Comportamento da corrente de soldagem para diferentes valores de tensão de soldagem dentro da faixa de estabilidade operacional

5.2. Influência da Variação da DBCP no Modo de Transferência Goticular

Para verificação da influência da variação da DBCP na região de estabilidade operacional do mapa de transferência no modo goticular, foram realizadas soldagens alterando-se a DBCP de 18 mm para 14 e 25 mm. Os testes foram realizados somente para o gás de proteção Ar + 8%CO₂ e para a velocidade de alimentação de 11 m/min, condição escolhida por ser valor médio de velocidade da faixa de corrente proposta para soldagem no modo goticular. O procedimento utilizado para encontrar a faixa de tensão para soldagem no modo goticular, para as DBCPs de 14 e 25 mm, foi o mesmo utilizado para DBCP de 18 mm. Fixando-se a velocidade de alimentação proposta, variou-se a tensão de referência para encontrar a tensão mínima que proporcionava curtos e a máxima que, visualmente, resultava em um arco de aproximadamente 8 mm.

Poderia-se esperar, por exemplo, que com o aumento da DBCP houvesse uma demanda por maior tensão (efeito joule ao longo do comprimento livre do eletrodo), já que o comprimento do arco é o critério principal para delimitar a região operacional, ou seja, os comprimentos de arco nos dois limites (superior e inferior) são praticamente os mesmos (maior DBCP mantendo-se mesmo comprimento de arco leva a maior comprimento livre do eletrodo). Porém, a Fig. 5.8 mostra que a mudança na DBCP altera pouca a faixa de tensão em que o processo opera no modo goticular; existe apenas uma pequena tendência de elevar os limites superiores da região de estabilidade operacional quando a DBCP torna-se maior.

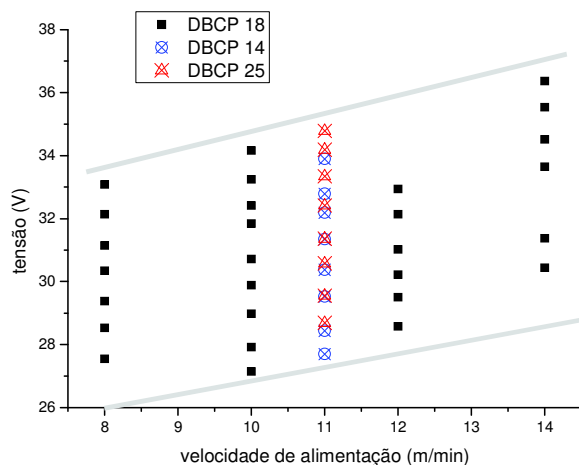


Figura 5.8 – Influência da variação da DBCP na região de estabilidade operacional com o processo operando com proteção de Ar + 8%CO₂ no modo goticular

Mas é importante apontar que, ao se mudar a DBCP para uma mesma velocidade de alimentação, a corrente de trabalho se reduz, como mostra a Fig. 5.9. A explicação para o

deslocamento da curva de corrente está na mudança do comprimento energizado de arame, devido à variação da DBCP. A mudança no comprimento energizado de eletrodo varia a resistência do circuito. Desta forma, a corrente precisa variar em uma fonte impondo tensão. De outra forma, por exemplo, o aumento da DBCP, provocaria o aumento do comprimento energizado de arame (calor gerado por efeito Joule mais pronunciado). Como a velocidade de alimentação é constante (taxa de fusão constante), para manter o consumo constante, a corrente diminui de valor, como mostrado na Fig.5.9 para DBCP de 25 mm.

Pelo exposto, pode-se concluir que apenas uma variação pequena na posição da região de estabilidade operacional para soldar com transferência goticular se justifica, pois, como a corrente se torna menor para maiores DBCP, a queda de tensão também se torna menor.

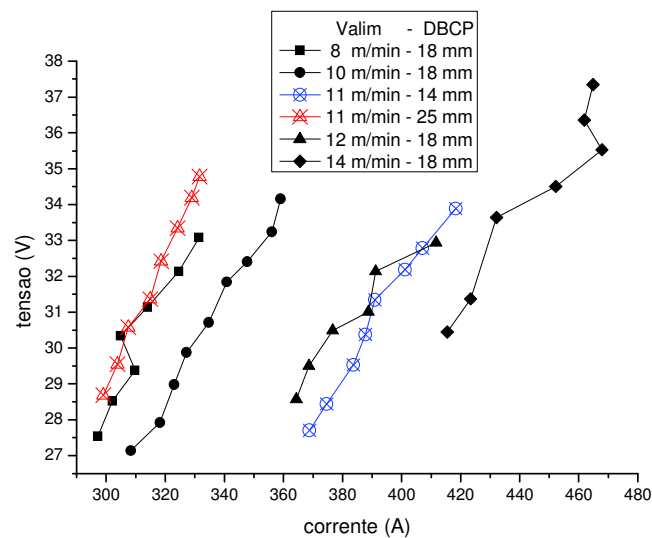


Figura 5.9 – Comportamento da corrente de soldagem para diferentes valores de tensão de soldagem com o processo operando no modo goticular

CAPÍTULO VI

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA INDUTÂNCIA SOBRE A REGIÃO DE ESTABILIDADE OPERACIONAL DO MAPA TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

Foram realizadas soldagens com objetivo de verificar a influência da indutância da fonte sobre a região de estabilidade operacional do mapa de transferência por curto-circuito. Nesta fase, as soldagens foram realizadas em sucatas para varredura dos valores de tensão, conforme metodologia proposta. A tocha foi posicionada de modo perpendicular à placa de teste (ângulos de trabalho e ataque iguais a zero).

6.1. Caracterização da Indutância do Equipamento de Soldagem

Para verificação da influência da variação da indutância na faixa de tensão em que o processo opera em curto-circuito estável, é necessário primeiro caracterizar a fonte, ou seja, medir o efeito da regulação do equipamento sobre a taxa de crescimento e decrescimento da corrente. O equipamento utilizado no trabalho possui uma regulação do efeito indutivo denominada de *pinch* (Fig. 6.1), que representa um efeito inverso ao efeito conhecido como indutância. Na verdade, uma melhor forma de mencionar a indutância de um equipamento é pelo termo “efeito indutivo”, já que as resultantes taxas de crescimento e decrescimento da corrente são uma função da indutância da fonte de energia (que nas fontes eletrônicas podem ser artificialmente controladas), dos cabos internos e externos à fonte e do próprio arco, já que estes componentes têm também características indutivas. Um exemplo disto pode ser visto na Fig. 6.2 e Tab. 6.1, as quais mostram que duas fontes diferentes reguladas para o valor mais

baixo de indutância (zero) promovem taxas de variação da corrente bem distintas (33 A/ms e 136,08 A/ms, respectivamente para a Maxtrom 450, Fig. 6.2, e Inversal 300, Tab. 6.1).



Figura 6.1 – Pannel auxiliar do alimentador de arame (controlador de forma de onda) do equipamento Power Wave 455/STT da Lincoln Electric, mostrando a opção de regulagem do efeito *pinch*

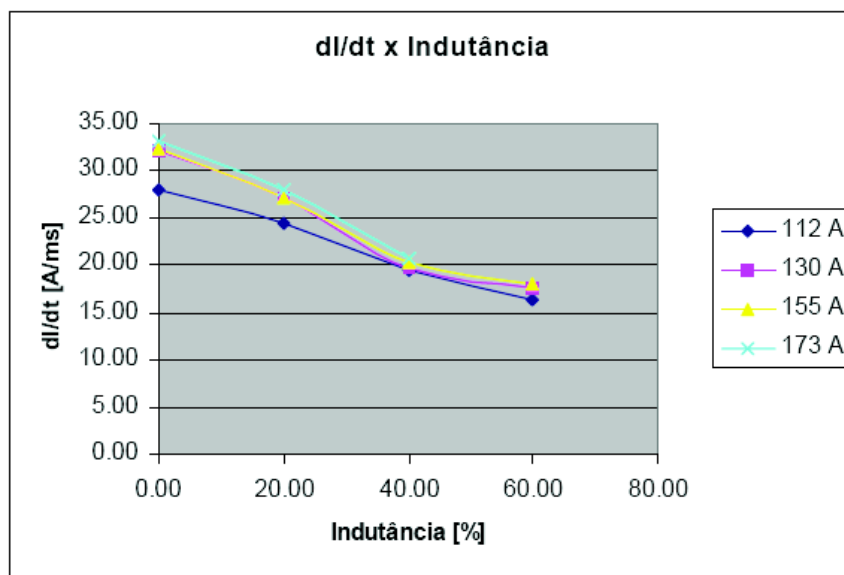


Figura 6.2 - Efeito da regulagem de indutância nas taxas de variação da corrente em função da corrente de soldagem, para uma fonte microprocessada multiprocesso da marca Miller, modelo MAXTRON 450, utilizando arame tubular E70C-6M de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Ar + 25%CO₂ (KOBAYASHI; ANASTÁCIO; NARDI, 2005)

Tabela 6.1 - Efeito da regulagem de indutância nas taxas de variação da corrente para uma fonte eletrônica multiprocesso da marca IMC Soldagem e modelo Inversal 300, utilizando o arame-eletrodo ER 4043 de diâmetro de 1,0 mm e gás de proteção Ar puro (SILVA; FERRARESI, 2003)

Posição de regulagem da indutância	di/dt (A/ms)
0	136,08
2,5	34,34
5	26,49
7,5	18,68
10	14,52

A variação do efeito indutivo do equipamento em questão é feita em posições de regulagem que tem amplitude de variação entre -10 e +10, com resolução de 0,1. Assim, para caracterização da regulagem do efeito indutivo da fonte (ou *pinch*), foi necessário realizar soldagens em algumas posições de regulagem e calcular a taxa de variação da corrente nas soldagens com cada uma destas regulagens, mantendo-se constantes a tensão de referência e a velocidade de alimentação. Foram realizadas soldagens em toda faixa de regulagem do efeito indutivo, variando-se as posições de regulagem em degraus de 2,5. A caracterização foi feita para as misturas de Ar + 8% CO₂ e Ar + 25% CO₂. A tensão de referência regulada no equipamento foi de 22 V, a velocidade de alimentação de 2,71 m/min e a DBCP de 12 mm para todos os testes.

A Fig. 6.3 apresenta o comportamento das taxas de subida e de descida das correntes para ambas as misturas de gases ao se alterar a posição de regulagem do efeito indutivo, caracterizando o aumento das taxas de subida e descida da corrente quando a regulagem do efeito indutivo passa de -10 para +10. Ou seja, na posição -10 é como se a indutância fosse maior (menor crescimento da corrente), reduzindo-se na direção de +10. Porém, o gás de proteção (pelo menos entre estes dois) não parece ter grandes influências sobre di/dt (vale lembrar que a fonte utilizada não permite que as taxas de subida e descida sejam reguladas separadamente). O cálculo da taxa de variação foi realizado por um programa desenvolvido no Laprosolda/UFU em ambiente MatLab e o critério utilizado pode ser encontrado no manual de utilização no Anexo I.

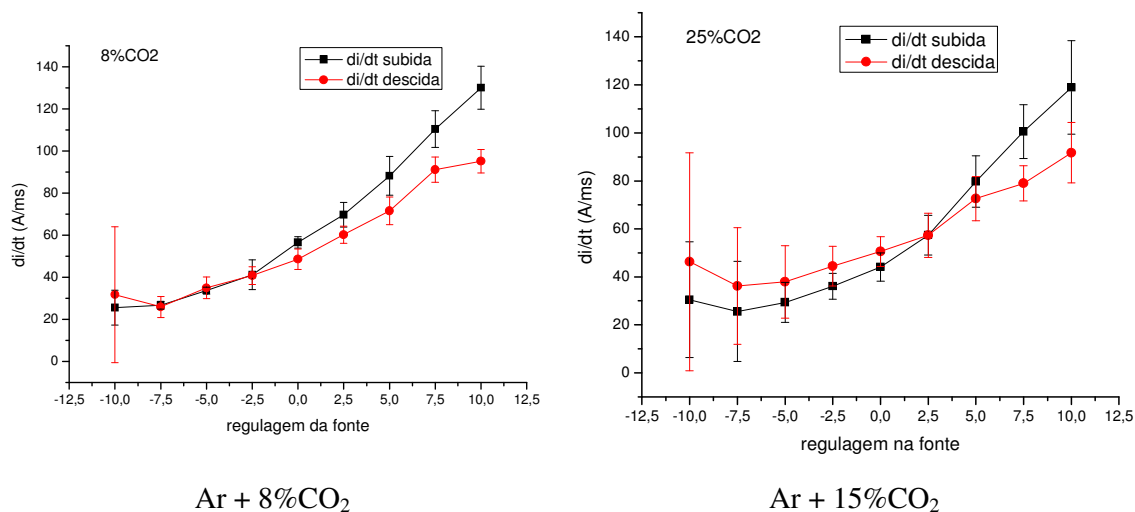


Figura 6.3 – Valores médios das taxas de subida e de descida da corrente (di/dt) em função da regulagem do efeito indutivo da fonte. Tensão regulada no equipamento de 22 V e velocidade de alimentação de 2,71 m/min

A Fig. 6.4 mostra os valores médios das medidas de frequência de curto-circuito, tensão e corrente em função da posição de regulagem do efeito indutivo, com todos os curtos-circuitos ou retirando-se os curtos incipientes (muito rápidos, que não transferem metal por tensão superficial, neste trabalho adotados como aqueles cuja duração fosse ≤ 2 ms). Pode-se verificar que a variação do valor regulado para o efeito indutivo não modifica significativamente a frequência de ocorrência dos curtos-circuitos, nem a tensão ou a corrente média. Entretanto, a frequência de curto-circuito é fortemente dependente do gás de proteção, passando de aproximadamente 20 para 60 Hz quando se mudou o teor de CO₂ de 8% para 25%, ao contrário da tensão e da corrente de soldagem que apresentaram mudanças muito pequenas. Baixo e Dutra (1995) obtiveram resultados que discordam dos apresentados neste estudo. Utilizando uma fonte que permitia a regulagem separada do efeito indutivo de subida (K_s) e de descida (K_d), gás de proteção CO₂ puro, mas o mesmo arame-eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e uma DBCP de 15 mm, os autores observaram o aumento do período de curto-circuito (diminuição da frequência) com a diminuição da taxa de crescimento da corrente e, praticamente, nenhuma mudança com variações na taxa de decrescimento da corrente. Em outro trabalho mais recente, Dutra (2008) apresenta oscilogramas de tensão e corrente nos quais pode se observar uma mudança na frequência de curto-circuito com a variação na taxa de decrescimento da corrente (Fig. 6.5), o que também contraria os resultados deste estudo (deve-se ressaltar que as fontes utilizadas são diferentes).

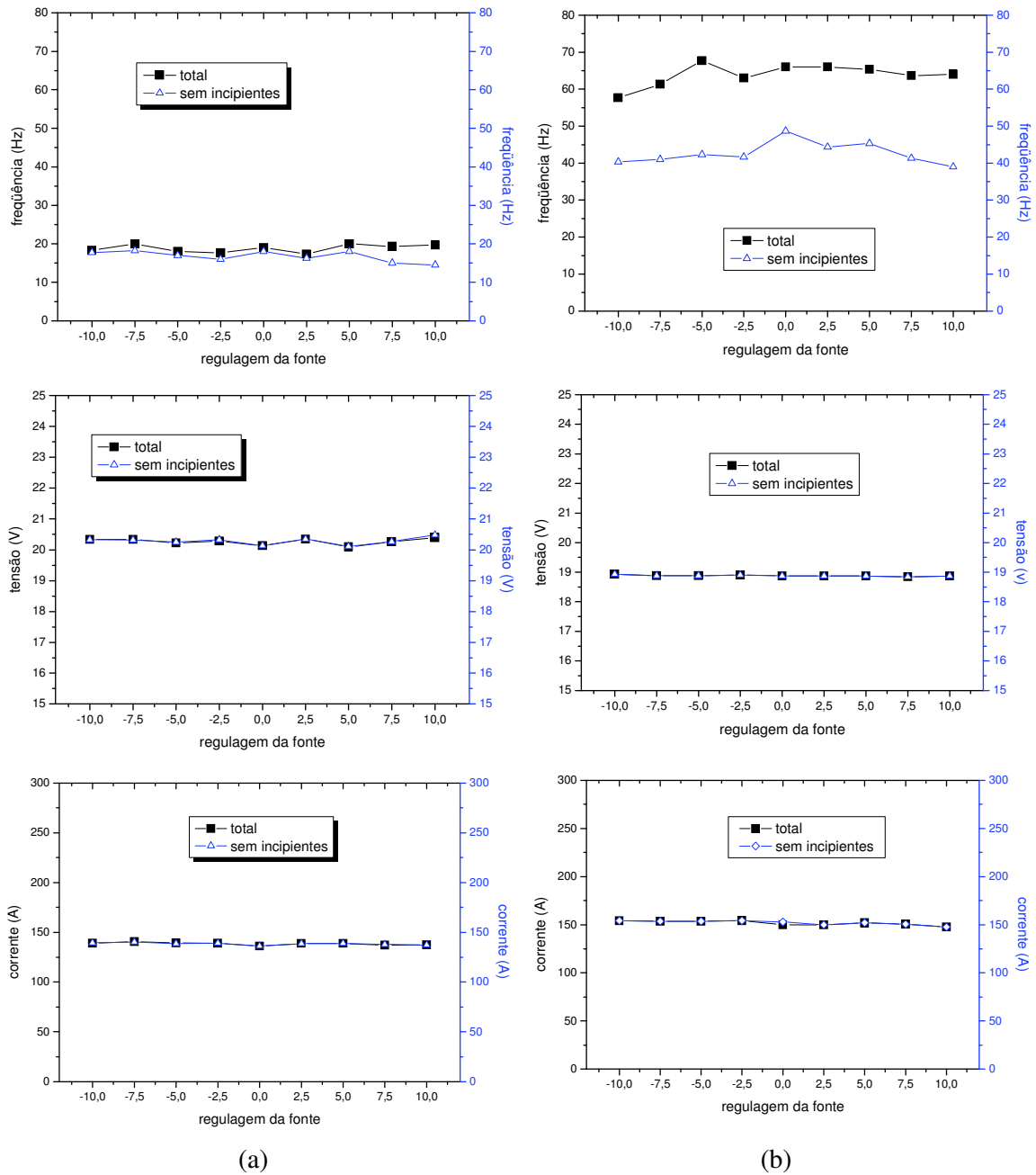


Figura 6.4 – Comportamento da frequência de curto-circuito, tensão média e corrente média ao se variar o efeito indutivo: (a) Ar + 8% CO₂ e (b) Ar + 25% CO₂, com tensão de referência regulada no equipamento de 22 V e velocidade de alimentação de 2,71 m/min

Ainda pode-se observar na Fig. 6.4, que os curtos incipientes ocorreram em maior número para a mistura com 25% de CO₂. Estes resultados concordam com os de Ponomarev et al (1997) (Tab. 6.2). Porém, como mostrado na Fig. 6.6, o aumento do valor regulado para efeito indutivo aumenta o valor alcançado da corrente de pico e diminui o valor do tempo em

que o processo fica em curto-circuito. Este efeito provavelmente mantém as áreas sob os gráficos de corrente de cada curto-circuito iguais, mantendo a corrente média invariável com a regulagem da indutância. Outra observação é que o aumento da quantidade de CO_2 no gás de proteção provocou curtos-circuitos mais rápidos e com menores correntes máximas.

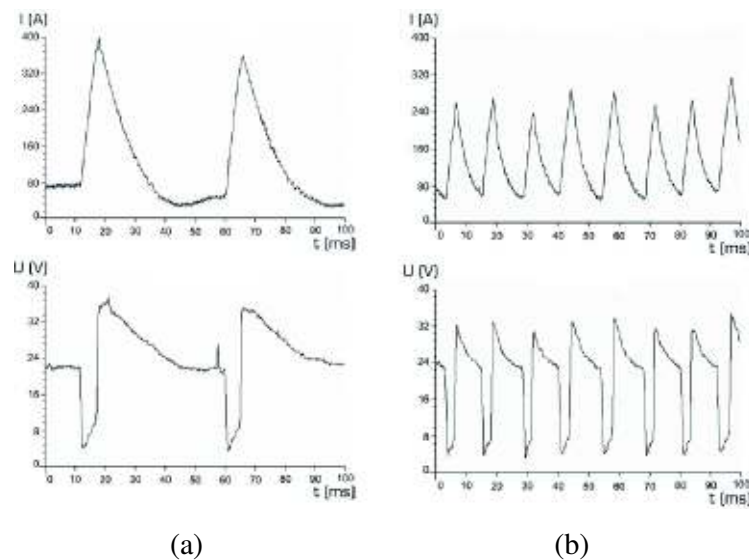


Figura 6.5 – Oscilogramas de corrente (superior) e tensão (inferior) para taxa de decrescimento da corrente de (a) 20 A/ms e (b) 44 A/ms utilizando uma fonte de fabricação IMC Soldagem, modelo MINITEC 200 com regulagem da taxa de subida e descida da corrente independente. Tensão regulada de 21 V e velocidade de alimentação de 3,5 m/min com proteção gasosa de CO_2 puro (DUTRA, 2008)

Tabela 6.2 - Valores médios de corrente, tensão e frequência de curto-circuito, utilizando arame-eletrodo de 1,0 mm de diâmetro (ER70S-6), gás de proteção Ar + 5% CO_2 + 5% O_2 , DBCP = 20 mm, velocidade de alimentação = 7 m/min e velocidade de soldagem = 0,9 m/min (adaptado de PONOMAREV et al, 1997)

di/dt (A/ms)	Um (V)	Im (A)	Fcc* (Hz)	Fcc (Hz)
160	21,26	140	27,6	40,1
40	21,22	152	30,0	50,1
25	21,25	144	27,8	42,2

U_m = tensão média; I_m = corrente média; F_{cc} = Frequência de curto-circuito; F_{cc}^* = Frequência de curto-circuito excluindo-se os curtos incipientes

O valor de corrente média invariável é justificável do ponto de vista energético, pois a taxa de fusão tem de ser a mesma (mesma velocidade de alimentação), assim como o tamanho das gotas em transferência estável deve ser muito similar, ou seja, a corrente, a tensão e a frequência de transferência não se alteram em valores médios. Porém, pela Fig. 6.7, pode-se observar que há indícios que, para manter o balanço energético, a fonte impõe um controle de corrente. Durante o tempo de curto-circuito (tempo de subida e descida da corrente), a fonte cria um “segundo pico de corrente” que mantém a corrente em valores mais altos, por mais tempo, quando a velocidade de subida e descida é menor para compensar os valores de pico mais baixos quando comparados com a situação em que a corrente sobe e desce rapidamente alcançando valores maiores de corrente de pico. Este comportamento da fonte não era esperado, pois a fonte foi regulada para trabalhar no modo tensão constante convencional (e não sinérgico ou controlado, como o STT).

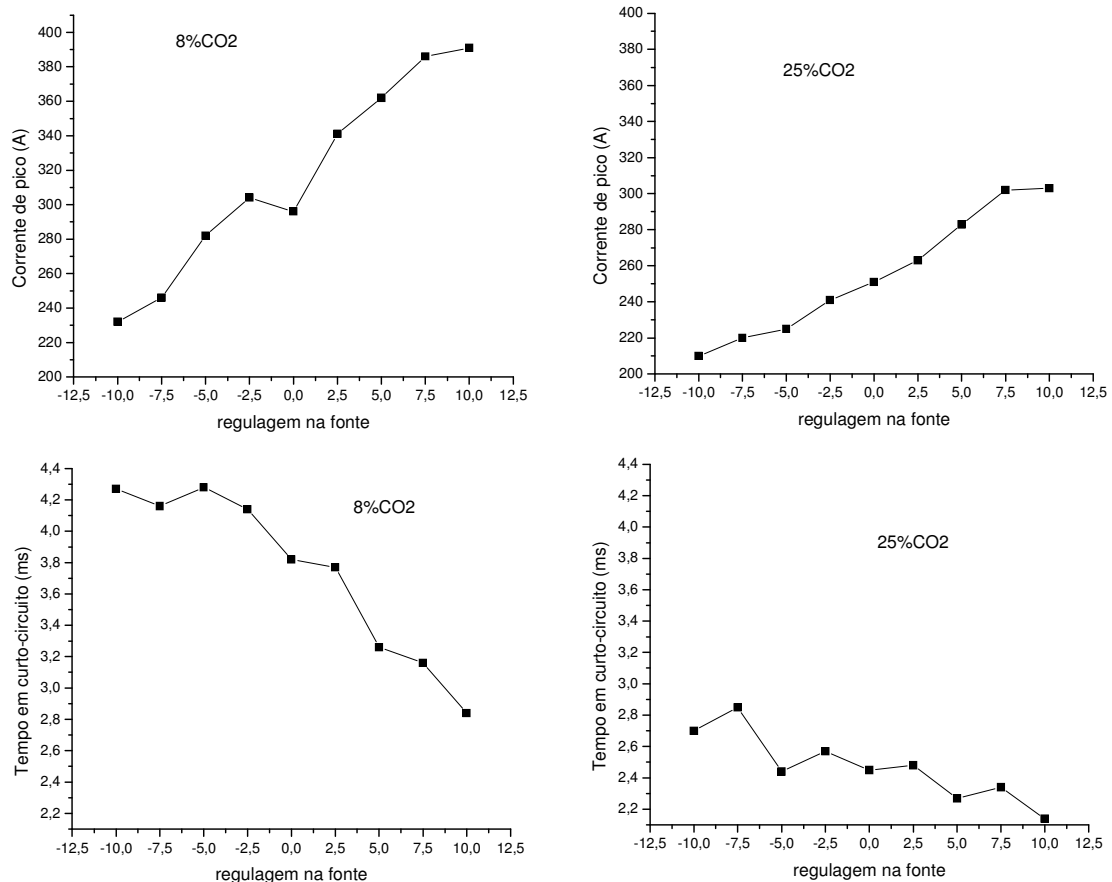


Figura 6.6 – Comportamento da corrente e do tempo em curto-circuito em função da variação do efeito indutivo. Tensão regulada no equipamento de 22 V e velocidade de alimentação de 2,71 m/min

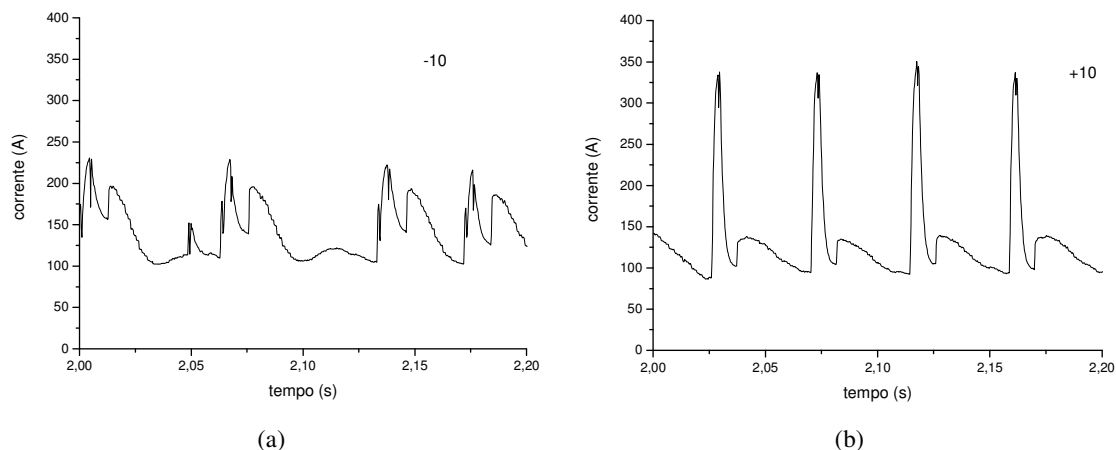


Figura 6.7 – Comportamento da corrente de soldagem em função da regulagem do efeito indutivo do equipamento em: (a) -10; e (b) +10. Tensão regulada no equipamento de 22 V, velocidade de alimentação de 2,71 m/min e gás de proteção Ar + 8%CO₂

6.2. Influência da Variação das Taxas de Crescimento e Decrescimento da Corrente na Região de Estabilidade Operacional do Mapa de Transferência

Para verificação da influência da variação da taxa de crescimento e decrescimento da corrente na região de estabilidade operacional em que o processo opera em curto-circuito, escolheram-se duas posições de regulagem do efeito indutivo da fonte, que sabidamente provocavam taxas distintas de crescimento e decrescimento da corrente. Assim, utilizaram-se as posições de regulagem -10 e +10 e realizaram-se soldagens empregando o mesmo procedimento e critério de estabilidade usado para encontrar a faixa de operação em curto-circuito estável (ver Capítulo IV), porém, neste caso, apenas para uma velocidade de alimentação. Os resultados dos testes são mostrados na Fig. 6.8 para mistura de Ar + 8% CO₂ e na Fig. 6.9 para mistura de Ar + 25% CO₂. Observando-se a Fig. 6.8, nota-se que a variação da taxa de crescimento e decrescimento da corrente não influenciou sensivelmente a faixa de tensão em que o processo opera em curto-circuito estável ao se usar Ar + 8% CO₂ como gás de proteção, o que não ocorre quando se usa Ar + 25% CO₂ (Fig. 6.9), na qual a regulagem da posição do efeito indutivo em -10 (menor taxa de crescimento e decrescimento da corrente) promovem uma diminuição dos valores de tensão em que o processo opera estável.