

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MAPEAMENTO DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA
SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de Uberlândia por:

KLÉBER MENDES DE FIGUEIREDO

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi – (UFU) – Orientador
Prof. PhD. Américo Scotti – (UFU)
Prof. PhD. Sadek C. Absi Alfaro (UnB)

Uberlândia, 18 de Fevereiro de 2000

À Deus

Aos meus filhos, Carolina e Augusto César

À minha esposa, Zélia

Aos meus pais, Lília e Laerte

Agradecimentos

Ao professor e orientador Valtair Antonio Ferraresi, pela amizade, orientação, apoio e confiança na realização deste trabalho.

Ao professor Américo Scotti, pela amizade, confiança e o apoio dados na realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelos conhecimentos e amizade que nos foi confiado e que somamos em mais esta etapa de nossa vida.

Aos amigos do LAPROSOLDA-UFU, Admilson, Alberto, André, Celina, Davi, Fábio, Hélio, Lázaro, Louriel, Márcio, Moisés, Paulo, Vinícius Vladimir e Warley, pelo apoio, o incentivo e o auxílio na realização deste trabalho.

Aos amigos da oficina da Engenharia Mecânica pelo apoio e auxílio durante a realização deste trabalho.

Ao amigo Leonardo, aluno de I.C., que nos incentivou na realização deste sonho, ingressar no programa de Pós-graduação, e depois nos apoiou, inclusive na realização deste trabalho.

Aos alunos de I.C. do LAPROSOLDA-UFU que direta ou indiretamente nos apoiaram.

À minha filha Carolina e ao meu genro Marlon, que além de nos incentivar e apoiar, tiveram a paciência de nos auxiliar na revisão do texto.

Ao meu filho Augusto César, que além de nos auxiliar na análise das imagens, junto com a sua noiva Carolina sempre nos incentivaram e apoiaram.

À minha esposa Zélia, pela paciência e apoio.

Aos meus pais, Lúgia e Laerte, por sempre nos ter mostrado que os sonhos podem ser realizados.

À toda a minha família que me apoiou durante a realização deste trabalho.

Ao meu compadre Alexandre, que juntamente com sua companheira Mitiko, nos incentivaram e apoiaram na realização deste trabalho.

Aos demais amigos que nos incentivaram e apoiaram para a realização deste trabalho.

À White Martins pelo fornecimento de gases, em especial aos Eng^{os} José Carlos e Kennedy da filial de Uberlândia (MG).

À FAPEMIG, pelo suporte financeiro através da concessão de bolsa e ao programa PADCT III - CEMAT, pelo financiamento dos materiais utilizados.

Sumário

Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xii
Simbologia	xiii
Resumo	xv
Abstract	xvi
 Capítulo I - Introdução	 01
 Capítulo II - Revisão Bibliográfica	 05
2.1 – O alumínio e suas ligas	05
2.1.1 – Propriedades das ligas de alumínio	06
2.2 – Soldabilidade do alumínio	07
2.2.1 – Influência do elemento de liga na soldagem do alumínio	08
2.2.2 – Processos de soldagem	10
2.3 – Processo de soldagem MIG/MAG	11
2.4 – Consumíveis	15
2.4.1 – Gases de proteção	16
2.4.2 – Metal de adição	18
2.5 – Transferência metálica	20
2.5.1 – Transferência por curto-circuito	21
2.5.2 – Transferência globular	23
2.5.3 – Transferência goticular	24
2.5.4 – Transferência controlada	26
2.6 – Fatores que influenciam a transferência metálica	27
2.6.1 – Força gravitacional	28
2.6.2 – Força de arraste (ou dragagem)	28
2.6.3 – Força eletromagnética	29
2.6.4 – Força de vaporização	29
2.6.5 – Tensão superficial	30
2.7 – Técnicas de determinação dos modos de transferência	30

Capítulo III - Procedimento Experimental	33
3.1 – Equipamentos de soldagem	33
3.1.1 – Fonte de soldagem	33
3.1.2 – Sistema de movimentação e fixação do corpo de prova	34
3.1.3 – Tocha de soldagem	36
3.1.4 – Shadowgrafia	36
3.1.5 – Sistema de aquisição de dados	36
3.2 – Materiais consumíveis	37
3.2.1 – Corpos de prova	37
3.2.2 – Eletrodos	37
3.2.3 – Gases	38
3.3 – Tratamento de imagem	38
3.3.1 – Medição do diâmetro da gota	38
3.3.2 – Medição do comprimento do arco	39
3.3.3 – Medição da frequência de destacamento das gotas	39
3.4 – Confecção dos mapas	40
3.5 – Procedimento de soldagem	41
 Capítulo IV - Resultados e Discussões	 43
4.1 – Testes realizados com gás argônio e eletrodo de diâmetro 1,0 mm	43
4.1.1 – Modos de transferência metálica	43
4.1.1.1 – Modo de transferência goticular	45
4.1.1.2 – Modo de transferência por curto-circuito	47
4.1.1.3 – Modo de transferência globular	50
4.1.1.4 – Modo de transferência globular/curto-circuito	52
4.1.1.5 – Modos de transição	53
4.1.2 – Mapas dos modos de transferência metálica	54
4.2 – Testes realizados com mistura de gases argônio + 25% hélio e eletrodo de diâmetro 1,0 mm	56
4.2.1 – Modos de transferência metálica	57
4.2.2 – Mapas dos modos de transferência metálica	58
4.3 – Testes realizados com gás argônio e eletrodo de diâmetro 1,2 mm	62
4.3.1 – Modos de transferência metálica	62
4.3.2 – Mapas dos modos de transferência metálica	62

Capítulo V - Conclusões	69
Capítulo VI - Proposta para Trabalhos Futuros	71
Capítulo VII - Referências Bibliográficas	73

Lista de figuras

Figura	página
2.1 – Detalhe da soldagem MIG/MAG	12
2.2 – Posicionamento da tocha na soldagem MIG	14
2.3 - Esquema do processo MIG/MAG	14
2.4 - Diferentes tipos de mecanismos de transferência metálica em MIG/MAG como classificado pelo IIW	22
2.5 – Esquema da sequência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG	22
2.6 – Variação do diâmetro e do número de gotas transferidas por unidade de tempo com a corrente de soldagem (esquemática)	24
2.7 - Efeito do gás de proteção na frequência de destacamento das gotas. Eletrodo de aço de diâmetro de 1,6 mm	26
2.8 – Balanço de forças atuando sobre uma gota	27
3.1 – Esquema geral da bancada experimental	34
3.2 – Sistema de fixação da placa de teste	35
3.3 – Esquema do sistema laser-filmadora e bancada de soldagem utilizados nos testes	35
3.4 – Critérios utilizados para a medição dos comprimentos de arco	40
4.1 – Diagramas de tensão e corrente com o tempo de uma transferência goticular (teste 19)	46
4.2 – Sequência de fotos de uma transferência goticular (teste 19)	46
4.3 – Sequência de fotos de uma transferência por curto-circuito (teste 8)	48
4.4 – Diagramas tensão e corrente com o tempo de uma transferência por curto-circuito (teste 8)	49
4.5 – Figura de uma transferência por curto-circuito mostrando uma repulsão (teste 3)	49
4.6 – Sequência de fotos de uma transferência no modo globular (teste 10)	51
4.7 – Diagramas da tensão e corrente com o tempo de uma transferência no modo globular (teste 10)	51
4.8 – Sequência de fotos de uma transferência no modo globular/curto-circuito (teste 1)	52
4.9 – Diagramas tensão e corrente com o tempo de uma transferência no modo globular/curto-circuito (teste 1)	53

4.10 – Mapa de velocidade de alimentação do arame eletrodo “versus” tensão de referência, utilizando gás argônio e eletrodo de 1,0 mm	55
4.11 - Correntes médias “versus” comprimentos médios de arco, utilizando gás argônio e eletrodo de 1,0 mm	55
4.12 - Mapa de correntes médias “versus” frequências de deposição das gotas, utilizando gás argônio e eletrodo de 1,0 mm	57
4.13 – Mapa velocidade de alimentação “versus” tensão de referência do arame eletrodo, utilizando mistura de gases (argônio + 25 % de hélio) e eletrodo de 1,0 mm	59
4.14 – Mapa corrente média “versus” comprimento médio do arco, utilizando mistura de gases (argônio + 25 % de hélio) e eletrodo de 1,0 mm	60
4.15 – Mapa da corrente média “versus” frequência de destacamento das gotas, utilizando mistura de gases (argônio + 25 % de hélio) e eletrodo de 1,0 mm	61
4.16 – Mapa velocidade de alimentação do arame eletrodo “versus” tensão de referência, utilizando eletrodo de 1,2 mm e gás argônio comercialmente puro	64
4.17 – Mapa corrente média “versus” comprimento médio do arco, utilizando eletrodo de 1,2 mm e gás argônio comercialmente puro	65
4.18 - Mapa corrente média “versus” frequência de deposição da gota, utilizando eletrodo de 1,2 mm e gás argônio comercialmente puro	66

Lista de tabelas

Tabela	página
2.1 – Designação das ligas de alumínio	06
2.2 - Classificação dos tipos transferência metálica feita pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW)	21
2.3 - Corrente de transição para arames de aço e de alumínio com diferentes diâmetros	25
4.1 – Valores de ajuste e monitoramento e resultados utilizando gás argônio e eletrodo com diâmetro de 1,0 mm	44
4.2 – Valores de ajuste e monitoramento e resultados utilizando mistura de gás argônio com 25% de hélio e eletrodo com diâmetro de 1,0mm	58
4.3 - Valores de ajuste e monitoramento e resultados utilizando gás argônio e eletrodo com diâmetro de 1,2 mm	63

Simbologia

ρ	densidade do gás
γ	tensão superficial
ρ_m	densidade da gota
a	constante de capilaridade
C'_d	coeficiente de dragagem
C_{arco}	comprimento médio do arco
CC	curto-circuito
CC ⁺	corrente contínua com eletrodo no positivo
D	máxima seção do arco medida na maior seção da gota
d	mínima seção ativa do eletrodo
DBCP	distância bico de contato peça
DP	desvio padrão
d_v	densidade de vapor
F	freqüência de deposição da gota
F_γ	tensão superficial
F_d	força de arraste (ou dragagem)
F_{em}	forças eletromagnéticas
F_g	força gravitacional
F_v	força de vaporização
g	aceleração devido à gravidade
g_z	componente vertical da aceleração da gravidade
GL	globular
GL-CC	globular/curto-circuito
GT	goticular
I	corrente
I_m	corrente média
J	densidade de corrente
K	constante de proporcionalidade – é função do meio
LOX	oxigênio líquido
m	massa da gota
m_0	massa vaporizada por volume por ampere
MAG	metal active gas

MIG	metal inert gas
Modtrans	modo de transferência metálica
N°	número do teste
r	raio do eletrodo
R_d	raio da gota
TIG	tungsten inert gas
U_m	tensão média
U_{ref}	tensão de referência
v	velocidade do plasma
V_{alim}	velocidade de alimentação do arame
V_{sol}	velocidade de soldagem

Figueiredo, K. M., 2000, "Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de Alumínio", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Resumo

Dentre os processos de soldagem do alumínio, o processo MIG é o preferido, pois pode ser automatizado com facilidade, possui alta produtividade e grande versatilidade quanto ao tipo e espessura dos materiais empregados em soldagem. A possibilidade de mudar o modo de transferência para se adequar às diferentes espessuras, tipos de juntas, entre outros, é um outro atrativo importante. Entretanto, pouco se conhece sobre os modos de transferência da soldagem MIG de alumínio. Desta forma, neste trabalho foi proposto um estudo sobre os modos de transferência metálica na soldagem do alumínio. O objetivo deste estudo foi gerar mapas que identifiquem os modos de transferência metálica e suas respectivas regiões em função do gás de proteção e do diâmetro do eletrodo. Com isso, espera-se contribuir com novas informações para a melhoria da qualidade e produtividade em soldagem MIG de alumínio. O procedimento experimental utilizado foi a realização de soldagens em chapa de alumínio na posição plana, utilizando uma fonte eletrônica no modo de tensão constante, variando-se a tensão e a velocidade de alimentação do arame eletrodo. Para efeito comparativo, a razão velocidade de soldagem/velocidade de alimentação do eletrodo foi mantida constante (mantendo cordões com o mesmo volume). Foram feitos estudos utilizando-se eletrodo de 1,0 mm com Ar comercialmente puro e com uma mistura Ar + 25% He e eletrodo de 1,2 mm com Ar comercialmente puro. A metodologia utilizada foi a da Shadowgrafia por laser conjugado com filmadora de alta velocidade (2000 quadros por segundo), para a filmagem das transferências metálicas e posterior análise. Assim, foi possível traçar os mapas com as três combinações eletrodo/gás, onde determinou-se quatro modos de transferência metálica (curto-circuito, globular, goticular ("spray") e globular/curto-circuito) e as respectivas faixas de transição. Verificou-se alterações nas regiões dos modos de transferência quando se alterou o gás e/ou o diâmetro do eletrodo. Os mapas permitiram, também, determinar as faixas de corrente de transição entre o modo globular e o goticular, apresentando uma faixa para cada situação testada.

Figueiredo, K. M., 2000, "Mapping of Metal Transfer Modes in the Aluminum MIG Welding", M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Abstract

Among the aluminum welding processes, the MIG process is the preferred one, because it can be easily made self-operating, it has high productivity and great versatility regarding the material type and thickness in welding. The possibility to change the transfer mode to adapt to different thickness, joint types, among other aspects, another important and attractive feature. However, little is known about the transfer modes in the aluminum MIG welding. For this reason, in this study an analysis about the metal transfer modes in the aluminum welding was proposed. The objective of this study was to generate maps which could identify the metal transfer modes and their regions due to the shielding gas and the wire diameter. In this sense, it is expected that new information can contribute to the quality and productivity improvement of the aluminum MIG welding. The experimental procedure was the execution of weldings in aluminum plate in a flat position with the electronic source in a constant voltage and with variation of the voltage as well as the wire feed speed. So that the effect could be compared, the travel speed/wire feed speed ratio was maintained constant (were beads with the same volume maintained). Studies with wire of 1.0 mm and pure Ar and mixture Ar + 25% He and wire of 1.2 mm with pure Ar were carried out. The methodology used for recording and further analysis of the metal transfers was the laser Shadowgraphy combined with high speed recording machine (2000 scenes per second). Therefore, it was possible to design the maps with the three wire/gas combinations, when four metal transfer modes (short circuit, globular, spray and globular/short circuit) and their respective transition zones were determined. Changes in the regions of the transfer modes were noticed when the gas and/or the wire diameter was altered. The maps also permitted to determine the transition current zones between the globular and the spray mode showing a zone for each tested situation.

Keywords: MIG welding, Metal transfer, Aluminum

CAPÍTULO I

Introdução

O alumínio, na crosta terrestre, é um elemento metálico abundante e a transformação de seus minérios em ligas metálicas atinge uma alta produção. O alumínio e suas ligas possuem um campo de aplicação vasto que abrange desde utensílios de cozinha até aplicações aeroespaciais. Um dos processos de fabricação mais importante na união de peças é a soldagem e, em determinadas aplicações, requer soldas com qualidade. Com isso, torna-se importante o estudo da sua soldagem, principalmente com relação a métodos e técnicas.

Quando comparado com outros metais, o alumínio é um metal caracterizado pela baixa densidade (da ordem de $2,8 \text{ g/cm}^3$), elevada relação resistência/peso, excelente resistência à corrosão, elevadas condutividades térmicas e elétricas, alta refletividade tanto para o calor quanto para a luz visível, por não ser magnético e por possuir um coeficiente de expansão térmica de aproximadamente o dobro do aço (Marques, 1991 e Biloni et. al., 1981).

Quanto às propriedades mecânicas, o alumínio puro (99,99% de pureza) no estado recozido apresenta uma excelente ductilidade, permitindo a produção de peças de formas bastante diversificadas. Entretanto, ele apresenta uma baixa resistência mecânica (aproximadamente $6,0 \text{ kgf/mm}^2$), que é um fator que limita sua aplicação industrial (Reis, 1996). O alumínio puro combinado com outros metais (Mn, Mg, Cu, Si, etc.), aliado à tratamento mecânico ou termo-mecânico, produz ligas que apresentam alta resistência mecânica (até 60 kgf/mm^2), sendo tão elevadas quanto às dos aços estruturais, com a grande vantagem de serem mais leves. Este fato ampliou a utilização do alumínio e suas ligas para aplicações nas indústrias aeroespaciais, automobilísticas, navais, etc. Antes, suas aplicações eram restritas à utilização em indústrias alimentícias, fabricação de estruturas decorativas ou pouco solicitadas e condutores elétricos (Weingaertner e Schroeter, 1991 e Biloni et. al, 1981).

Com o crescente uso do alumínio e as vantagens que ele apresenta na área de transporte, o seu emprego na construção de superestruturas de navios, carrocerias de ônibus e caminhões, caçambas, vagões ferroviários, etc., e o seu uso em indústrias químicas e petroquímicas e estruturas em geral, aumenta-se a necessidade de estudos na área de fabricação, principalmente na soldagem desse material. Contudo, historicamente o alumínio é considerado um material de difícil soldabilidade devido ao fato dos pioneiros na arte da soldagem do mesmo empregarem técnicas de soldagem semelhantes às empregadas para

materiais ferrosos, obtendo soldas de baixa qualidade (Reis, 1996, Saunders, 1989 e Biloni et. al., 1981).

Com a evolução tecnológica ocorrida nas últimas décadas, o alumínio e suas ligas passaram a ser soldados por vários processos, como por exemplo a soldagem com Eletrodo Revestido, MIG (Metal Inert Gas), TIG (Tungsten Inert Gas), Plasma, etc. Cada um destes processos apresentam vantagens e limitações, sendo escolhido de acordo com a qualidade exigida para a junta a ser soldada (Reis, 1996).

Na maioria das aplicações estruturais o processo MIG é preferido em relação ao TIG, pois pode ser mecanizado com facilidade, sendo utilizado tanto num sistema semi-automático como automático. Ele se destaca, também, por ser um processo de alta produtividade, pois possui uma elevada taxa de deposição e alto fator de trabalho do soldador. Entretanto, o processo MIG apresenta algumas dificuldades, tais como: maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de soldagem e a exigência de um ajuste rigoroso dos parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para a solda (Blewett, 1982 e Biloni et. al., 1981).

A forma com que a gota é transferida do eletrodo para a poça de fusão (modos de transferência metálica) é muito importante na soldagem MIG, pois afeta muitas características do processo, como por exemplo: a quantidade de gases (principalmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvidos pelo metal fundido, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados. De uma forma simplificada, pode-se considerar que existem quatro formas básicas de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência goticular (também conhecida por “spray” ou aerossol) e transferência controlada.

Na literatura corrente os modos de transferência metálica na soldagem de alumínio são pouco estudados, em função do desenvolvimento dos processos de soldagem para o alumínio serem recentes. A maioria dos trabalhos que existem na literatura são para os aços. Os seus campos de trabalho são diferentes, tendo em vista que o ponto de fusão do alumínio é menor que o do aço, e as suas condutividades térmica e elétrica são maiores.

Na literatura pesquisada não foi encontrado dados sobre os modos de transferência metálica na soldagem MIG do alumínio, principalmente quando se precisa saber sobre os efeitos que a mudança do diâmetro do eletrodo ou de gases provocam nestes modos de transferência, por exemplo a mudança do argônio puro para uma mistura de argônio mais hélio.

Desta forma, este trabalho propõem estudar estes modos de transferência metálica, levantando mapas de transferências para soldagens com Ar e mistura Ar + He e diferentes diâmetros de eletrodo. Com isto, espera-se não só entender o mecanismo de transferência em alumínio, mas também fornecer informações tecnológicas que possam ser usadas na prática

quando se pretende estabelecer procedimentos de soldagem MIG de alumínio, aumentando, assim, o conhecimento na área de soldagem deste elemento metálico, de forma a obter melhorias de qualidade e produtividade.

Além deste capítulo de introdução, este trabalho foi dividido em mais 6 capítulos, assim distribuídos:

- O Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica. Ele apresenta o suporte técnico e teórico necessários para o entendimento deste trabalho. Disserta sobre o alumínio e suas ligas, a sua soldabilidade, os processos de soldagem detalhando o processo MIG/MAG, a transferência metálica e os fatores que a influenciam e as técnicas de determinação destes modos de transferência metálica;
- O Capítulo 3 apresenta o procedimento experimental, detalhando as técnicas, os equipamentos, os materiais, bem como a sequência dos ensaios empregados na execução dos testes;
- O Capítulo 4 disserta sobre os resultados e as discussões dos testes que foram realizados neste trabalho, apresentando os modos de transferência metálica e os mapas obtidos;
- No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho.
- No Capítulo 6 são apresentadas as propostas para a realização de trabalhos futuros que possam complementar este estudo;
- O Capítulo 7 mostra as referências bibliográficas citadas neste trabalho e que auxiliaram na realização do mesmo.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1 – O alumínio e suas ligas

O alumínio é um elemento metálico com um grande campo de aplicação que vai desde utensílios de cozinha até aplicações aeroespaciais. É empregado nas indústrias química e elétrica bem como na arquitetura, transporte e armazenagem de diferentes produtos. O alumínio e suas ligas, por terem baixo peso específico, pertencem à classe das chamadas ligas leves (Okumura e Taniguchi, 1982).

Do ponto de vista de sua obtenção, as ligas de alumínio podem ser classificadas em ligas fundidas e produtos acabados. Do ponto de vista do seu tratamento térmico em ligas termicamente tratáveis ou não (Okumura e Taniguchi, 1982).

As ligas não tratáveis termicamente são aquelas cujas propriedades mecânicas podem ser obtidas por meio de um encruamento a frio, enquanto que as ligas termicamente tratáveis conseguem as suas propriedades através de uma têmpera seguida de um revenido. Esta têmpera não consiste na obtenção de uma estrutura martensítica e sim num endurecimento por precipitação (Okumura e Taniguchi, 1982).

As ligas de alumínio são classificadas em sete grupos, de acordo com os elementos básicos de sua composição química: alumínio puro, Al-Cu, Al-Mn, Al-Si, Al-Mg, Al-Mg-Si e Al-Zn. Existem diversas nomenclaturas para identificar estas ligas e a mais comum é a da Aluminum Association (AA). Ela é adotada, também, por outras entidades tais como: ASTM, SAE, ABNT, etc. Na ABNT corresponde à norma ABNT 6834.

Esta classificação se baseia num sistema numérico de 4 dígitos, sendo que o primeiro indica o grupo de elementos que determinam as características da liga, conforme indicado na Tabela 2.1. Nas ligas do grupo 1XXX, os dois últimos dígitos indicam a porcentagem de alumínio que excede a 99%. Nos grupos de 2XXX a 8XXX, os dois últimos dígitos apenas diferenciam ligas de um mesmo grupo; o segundo dígito, quando diferente de zero, indica que uma liga é derivada daquela com o segundo dígito zero (por exemplo, a liga 5315 deriva da liga 5015) (Alcan, 1993, Póvoa, 1988 e Biloni et. al., 1981).

Algumas ligas normalizadas pela Aluminum Association têm limites de composição química similares mas não idênticos aos adotados em alguns países. Nestas adiciona-se uma

letra após a identificação numérica indicando uma variante. Ligas com composição química experimental têm uma letra X precedendo a sua identificação.

Tabela 2.1 – Designação das ligas de alumínio

Designação	Componente Majoritário da Liga
1XXX	Alumínio – 99% mínimo
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros
9XXX	Série não utilizada

2.1.1 – Propriedades das ligas de alumínio

Neste item são relacionadas algumas características e propriedades das ligas de alumínio, retiradas de Okumura e Taniguchi (1982):

- a. Alumínio puro para uso industrial – série 1000 – Apresenta uma pureza compreendida entre 99,0% e 99,9%. Este material é dotado de boa resistência à corrosão, altas condutibilidades térmica e elétrica e excelente flexibilidade. Sua soldabilidade e usinabilidade são bastante satisfatórias, apesar de sua baixa resistência mecânica.
- b. Liga de Al-Cu – série 2000 – Esta é uma série típica de ligas tratadas termicamente. Suas propriedades mecânicas são comparáveis às do aço doce, graças ao tratamento de endurecimento por precipitação após a solubilização. Sua resistência à corrosão, entretanto, é inferior à das outras séries. Sua soldabilidade também deixa muito a desejar, razão pela qual esta liga é empregada quase que exclusivamente em estruturas rebitadas. As especificações 2017 (duralumínio) e 2024 (superduralumínio) são bastante conhecidas como materiais empregados em estruturas de aeronaves.
- c. Liga de Al-Mn – série 3000 – As ligas Al-Mn não são termicamente tratadas e os diferentes níveis de resistência mecânica são conseguidos mediante encruamento a frio. As vantagens principais desta série repousam na resistência à corrosão, na boa usinabilidade e soldabilidade, que são tão boas quanto as do alumínio puro, aliada ainda às suas altas propriedades mecânicas.
- d. Liga Al-Si – série 4000 – Esta série também não é tratável termicamente. Devido ao silício, a temperatura de fusão desta liga é mais baixa, o metal possui uma excelente fluidez e

difícilmente ocorrem problemas de trincas, razões que tornam esta liga bastante indicada como material de enchimento, na soldagem de fundidos e de ligas tratadas termicamente.

- e. Liga Al-Mg – série 5000 – As ligas desta série são às vezes combinadas com manganês, e também não são tratadas termicamente. Têm uma resistência à ruptura superior à da liga Al-Mn, são facilmente soldáveis e resistentes à corrosão, principalmente em atmosfera marítima. Uma liga típica desta série é representada pela especificação 5038-O, cujo emprego engloba não somente as estruturas soldadas em geral, mas também os tanques de armazenamento de gases liquefeitos, como o oxigênio líquido (LOX).
- f. Liga Al-Mg-Si – série 6000 – Esta série reúne ligas de alumínio tratáveis termicamente e apresentam características satisfatórias de usinabilidade, resistência à corrosão e soldabilidade. No entanto, este tipo de liga pode sofrer uma perda de dureza na zona de solda, devido ao insumo de calor. Um exemplo típico desta série é a liga 6063, largamente empregada em esquadrias de alumínio para construções civis.
- g. Liga Al-Zn – série 7000 – Esta série também é termicamente tratada e as ligas podem conter magnésio como elemento químico suplementar, ou ainda pequenas porcentagens de cobre e cromo. As ligas têm um limite de ruptura da ordem de 50 kgf/mm^2 , sendo também conhecidas como ultraduralumínio. Por outro lado, sua resistência à corrosão, bem como sua soldabilidade, deixam muito a desejar.

Ligas de Al-Zn-Mg, que não contém cobre, têm sido empregadas em estruturas soldadas e apresentam uma boa resistência à corrosão e soldabilidade satisfatória, quando comparadas às demais ligas da série. Caso ocorra uma diminuição da dureza na zona de solda, esta pode ser recuperada através de um envelhecimento natural.

2.2 – Soldabilidade do alumínio

O termo soldabilidade está associado à facilidade com que uma liga pode ser soldada, produzindo uma junta com adequada resistência mecânica, resistência à corrosão e outras propriedades quando necessárias (Póvoa, 1988).

Como o uso do alumínio vem sendo largamente expandido em diversas áreas de aplicações, aumenta a necessidade de estudos na área de fabricação desse material, principalmente na soldagem. Contudo, no início, o alumínio foi considerado um material de difícil soldabilidade devido ao fato de se empregar técnicas de soldagem semelhantes às empregadas para materiais ferrosos, obtendo soldas de baixa qualidade (Reis, 1996, Saunders, 1989 e Biloni et al, 1981).

Um grande problema na soldagem do alumínio está relacionado com a facilidade do mesmo em reagir com o oxigênio, formando a alumina (Al_2O_3). Este óxido tem a dureza próxima à do diamante e alto ponto de fusão (2038°C). A alumina é muito tenaz, refratária e insolúvel no alumínio líquido, impedindo a molhagem deste. Além disso, esta camada de alumina é porosa, podendo reter umidade e sujeira que podem contaminar o cordão de solda. Desta forma é importante a remoção da alumina para que o material possa ser soldado satisfatoriamente por processos de soldagem a arco elétrico. A remoção da camada de alumina pode ser feita de 3 formas distintas (Alcan, 1993): por ação mecânica, limpeza química e ataque catódico. A remoção por ação mecânica é a mais simples porém pouco eficiente, é feita por meio de esmerilhamento ou escovamento, momentos antes da soldagem. A limpeza química é feita pela aplicação de bases e ácidos alternadamente, a temperaturas variadas, intercaladas por lavagem com água. O ataque catódico consiste em alternar o sentido da corrente elétrica de soldagem, sendo muito utilizado no processo TIG.

Outro fator que exerce uma grande influência na soldabilidade é a condutividade térmica. No alumínio ela é quase cinco vezes maior do que no aço, significando assim que para elevar localmente a temperatura de uma mesma massa é requerido cinco vezes mais calor para o alumínio do que para o aço (AWS, 1996 e Alcan, 1993).

Como o ponto de fusão do alumínio é menor que o do aço, tem-se a impressão inicial que o calor requerido para soldar alumínio é menor do que para o aço. Entretanto, a alta condutividade térmica do alumínio compensa a diferença entre as temperaturas de fusão e, por isso, o alumínio necessita tanto quanto ou provavelmente mais calor do que o aço para ser soldado (Alcan, 1993).

Conforme mencionado na literatura (Alcan, 1993), a alta condutividade térmica, o alto coeficiente de expansão linear e a necessidade de maior aporte de calor podem causar consideráveis distorções durante a soldagem se não forem utilizadas as velocidades de trabalho mais altas possíveis, quando da soldagem do alumínio com fontes de calor mais intensas. E que esta alta condutividade térmica torna a soldagem do alumínio mais rápida que a do aço pois ela proporciona uma rápida solidificação da poça de solda.

2.2.1 – Influência do elemento de liga na soldagem do alumínio

Como citado anteriormente, a adição de elementos de liga no alumínio tem a função de fornecer propriedades ao mesmo. Os principais elementos que são adicionados são: cobre, silício, manganês, magnésio e zinco.

A adição de cobre fornece alta resistência. O silício diminui o ponto de fusão e dá fluidez à liga. O manganês atua no sentido de oferecer um aumento moderado na resistência mecânica aliado a uma excelente ductilidade. Já o magnésio oferece as maiores resistências mecânicas e mantém boa resistência à corrosão (Alcan, 1993, Póvoa, 1988 e Biloni et. al., 1981).

Busca-se uma combinação dos elementos de liga no alumínio visando uma melhora e/ou combinação das propriedades que os mesmos oferecem individualmente. Quando se combina o magnésio com o silício tem-se ligas com boa resistência mecânica, plasticidade e extrudabilidade. O zinco com o magnésio e o cobre oferecem resistências muito elevadas. Já as ligas combinando zinco e magnésio são capazes de recuperar parte da resistência mecânica perdida através da soldagem por meio de envelhecimento em temperatura ambiente (Alcan, 1993, Póvoa, 1988 e Biloni et. al., 1981).

O alumínio puro para uso industrial tem uma soldabilidade bastante satisfatória pelos processos de fusão a arco, embora as faixas de fusão estreitas possam causar falta de fusão e outros tipos de defeitos (Alcan, 1993). Quando se acrescenta elementos de liga, estes podem alterar a soldabilidade, melhorando-a ou piorando-a. Conforme Alcan (1993) e Okumura e Taniguchi (1982), analisando cada um dos grupos de liga de alumínio, verifica-se qual a reação da soldabilidade na presença de cada elemento de liga, conforme descrito abaixo:

- Liga Al-Cu – a soldabilidade desta liga pelos processos a arco deixa muito a desejar em virtude de serem muito suscetíveis à fissuração a quente. Portanto, a sua união pelo processo MIG é difícil. Recentemente foram desenvolvidas ligas desta série com boa soldabilidade tais como as ligas 2219 e 2519. Nesta série, para se conseguir melhores valores de propriedades mecânicas após a soldagem, deve-se usar uma relação de alta velocidade de soldagem com alta taxa de resfriamento com o fim de se conseguir uma transferência máxima de calor através do metal base;
- Liga Al-Mn – esta liga tem uma boa soldabilidade e não são suscetíveis à ocorrência de trincas de solidificação;
- Liga Al-Si – esta liga possui excelente fluidez e dificilmente ocorrem problemas de trincas na solda. Normalmente é utilizada como material de enchimento;
- Liga Al-Mg – as ligas desta família, em geral, são facilmente soldáveis. Quando tem teor de Mg abaixo de 2,5% e são soldadas com os processos de fusão a arco, ficam sujeitas à fissuração a quente durante a fase de solidificação, caso o metal de adição tenha a mesma composição química do metal de base;
- Liga Al-Mg-Si – esta família de ligas tem soldabilidade satisfatória, mas pode sofrer uma perda de dureza na zona de solda. Para recuperar a resistência na zona termicamente

afetada é necessário executar um tratamento térmico completo pós-soldagem. É possível obter maior resistência mecânica após a solda com um aumento na velocidade de soldagem. Isto ocorre mais em chapas finas, já em chapas grossas este aumento de resistência não é significativo. Embora sejam propensas à fissuração a quente, isto pode ser superado pela escolha correta do metal de enchimento e do perfil da junta;

- Liga Al-Zn – assim como a liga Al-Cu, a soldabilidade por processo de fusão a arco desta liga deixa muito a desejar, mas também possui ligas soldáveis;
- Liga Al-Zn-Mg – esta liga tem uma soldabilidade satisfatória e a diminuição da dureza na zona da solda pode ser recuperada através de envelhecimento natural.

O alumínio puro (série 1xxx) e a liga Al-Mn (série 3xxx), apesar de terem boa soldabilidade, não possuem a resistência necessária exigida para uso estrutural.

2.2.2 – Processos de soldagem

A maioria dos processos de soldagem podem ser utilizados na soldagem do alumínio, como por exemplo a soldagem com Eletrodo Revestido, MIG (Metal Inert Gas), TIG (Tungsten Inert Gas), Plasma, etc., como fruto da evolução tecnológica ocorrida nas últimas décadas. Cada um destes processos apresenta vantagens e limitações, sendo escolhido de acordo com a qualidade exigida para a junta a ser soldada (Reis, 1996).

Conforme a literatura(Altshuller, 1998, Blewett, 1982, Biloni et al, 1981, entre outros), os processos de soldagem MIG e TIG são os mais empregados na soldagem do alumínio, sendo que quando utilizados em aplicações estruturais o processo MIG é preferido em relação ao TIG, pois pode ser mecanizado com facilidade, sendo utilizado tanto num sistema semi-automático como automático. O processo MIG se destaca também por ter alta produtividade, pois possui uma elevada taxa de deposição e alto fator de trabalho do soldador. Além disso, possui as seguintes vantagens: grande versatilidade quanto ao tipo e espessura dos materiais a serem aplicados, solda em todas as posições, não tem a necessidade de fluxos de soldagem, não exige grande habilidade do soldador, permite maiores profundidades de penetração e estreitas zonas afetadas termicamente. O arco do processo MIG é uma fonte muito eficiente e concentra mais o calor em comparação com outros arcos de soldagem.

Entretanto, o processo MIG, quando comparado com os processos de soldagem TIG e eletrodo revestido, apresenta algumas dificuldades, tais como: maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de soldagem, exige um ajuste rigoroso dos parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para a solda, possui uma menor variedade de

consumíveis e o equipamento e a sua manutenção são de maior custo (Blewett, 1982 e Biloni et. al., 1981).

2.3 – Processo de soldagem MIG/MAG

A soldagem é o método mais simples de união permanente de peças e pode ser utilizado em conjunto com outros processos de fabricação. Sua importância está no fato de que se pode unir quase todos os metais e ligas comerciais e até recuperar produtos manufaturados, permitindo flexibilidade de projeto, redução de custos e facilidade de aplicação em qualquer local. Os processos de soldagem, por apresentarem praticamente um campo de aplicação irrestrito, são empregados para fabricação de produtos diversos, tais como estruturas metálicas, navios, aeronaves, veículos terrestres, equipamentos espaciais, etc. (Miranda, 1999).

O processo MIG/MAG, pela qualidade da solda, aliada com uma maior produtividade, que normalmente é uma das necessidades das indústrias, é um dos principais processos utilizados em soldagem a arco voltaico. Pode ser operado nos modos semi-automático e automático, sendo aplicado praticamente em todos os metais comercialmente importantes (aço comum ao carbono, aços baixa liga, aços inox e resistente ao calor, alumínio, cobre, titânio e suas ligas). É capaz de executar soldas em todas as posições se forem escolhidos gases de proteção, arames eletrodos e parâmetros de soldagem apropriados (Miranda, 1999). É utilizado na fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas, na recuperação de peças desgastadas e no recobrimento de superfícies metálicas com materiais especiais (Marques, 1991).

O processo MIG/MAG é a soldagem à arco metálico com atmosfera gasosa onde a união das peças metálicas ocorre pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. O arco e a região da solda são protegidos contra contaminações da atmosfera por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos (Marques, 1991).

No processo de soldagem MIG/MAG, para materiais de fácil oxidação, o gás deve ser inerte quimicamente, que é quando o gás ou mistura de gases utilizados não reagem de forma significativa com a poça de fusão, de onde vem a denominação MIG (Metal Inert Gas), e pode ser ativo para os aços, que é quando ocorre reação do gás com a poça de fusão, de onde provém a denominação MAG (Metal Active Gas). O argônio e o hélio são exemplos de gases inertes e, o oxigênio e o CO₂ dissociado no arco, são exemplos de gases ativos. A Figura 2.1 descreve esquematicamente este processo de soldagem (Miranda, 1999).

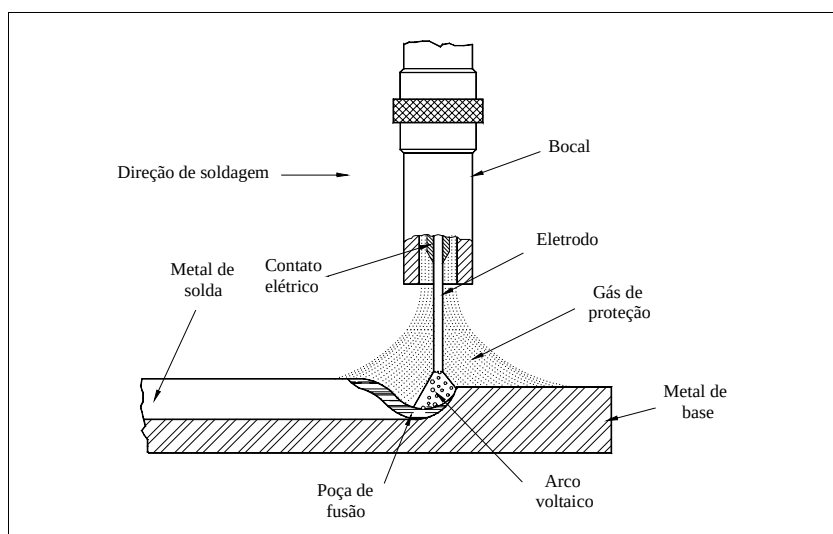


Figura 2.1 - Detalhe da soldagem MIG/MAG.

Na soldagem de materiais ferrosos normalmente são utilizados gases ativos misturados com gases inertes, buscando com isso melhores estabilidade do arco e transferência metálica. Na soldagem de metais não-ferrosos, principalmente os mais reativos como o alumínio e o magnésio, são utilizados gases inertes puros. Para a soldagem MIG em alumínio normalmente se utilizam os gases argônio ou hélio, ou uma mistura destes gases.

Na soldagem do alumínio e suas ligas é preciso inicialmente limpar a camada de óxido, pois a mesma tem alto ponto de fusão e é muito tenaz. No processo MIG consegue-se solucionar este problema utilizando corrente contínua com eletrodo no positivo (CC^+). Nesta situação o arco remove a camada de óxido de alumínio e permite a coalescência das bordas da junta e do metal de enchimento (Altshuller, 1998). Este tipo de remoção da camada de óxido é chamada de limpeza catódica. Quando a soldagem é feita em CC^+ o principal mecanismo de emissão de elétrons é chamado de emissão por campo, ou seja, os elétrons são emitidos da peça de trabalho para o eletrodo.

As principais vantagens do processo MIG/MAG citados na bibliografia (Miranda, 1999, AWS, 1991, Marques, 1991, entre outros) são:

- soldagem de todos os metais e ligas comerciais;
- alimentação contínua do eletrodo;
- soldagem em todas as posições;
- elevadas taxas de deposição;
- elevadas velocidades de soldagem;
- obtenção de cordões extensos sem muitas interrupções;
- como não existe escória, mínima limpeza após a soldagem é exigida;
- permite a automatização industrial, possibilitando a utilização de robôs;

- exigência de menor habilidade do soldador, quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos.

As principais limitações do processo MIG/MAG citadas na literatura (Miranda, 1999, AWS, 1991, Marques, 1991, entre outros) são:

- maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem;
- equipamentos de soldagem complexos, relativamente caros e menos portáteis;
- utilização mais restrita em locais de difícil acesso, devido à maior complexidade e dimensões dos equipamentos;
- o arco deverá ser protegido das correntes de ar, para garantir a eficiência de proteção realizada pelos gases empregados;
- os altos níveis de radiação e calor gerado fazem com que o operador ponha resistência à utilização deste processo.

Conforme Biloni et. al. (1981), no processo MIG em alumínio, dependendo da espessura do material e do gás de proteção, as velocidades de soldagem podem variar entre 500 e 1000 mm/min e a velocidade de deposição pode chegar a 4,5 kg/h. De acordo com o Manual da Alcan (1993), é muito comum velocidades de soldagem na faixa de 300 a 800 mm/min e, na soldagem automática, tem sido registradas velocidades da ordem de 2500 mm/min.

Durante a soldagem MIG do alumínio, com o intuito de assegurar a proteção adequada do arco e da poça de solda com relação a contaminações externas, a tocha deve ser posicionada inclinada em relação à vertical em um ângulo de 10 a 15° e apontar no sentido do deslocamento ("forehand angle"), conforme pode ser visto na Figura 2.2. No processo MIG do alumínio a tocha nunca deve ser arrastada, ou seja, apontar no sentido contrário ao deslocamento ("backhand angle"), pois neste caso o gás de proteção está sendo jogado para traz da poça de solda, o que pode facilitar a contaminação da mesma pela atmosfera. O valor do ângulo deve ser ajustado de acordo com a velocidade de soldagem, posição da junta, tamanho do cordão e corrente de soldagem empregada (Alcan, 1993, AWS, 1991 e Biloni et al, 1981).

O equipamento exigido para a soldagem MIG do alumínio consiste basicamente de uma fonte de energia, um sistema de alimentação de arame, uma tocha, um suprimento de gás protetor, um fluxímetro e um regulador-reductor de pressão do gás e, no caso de pistola refrigerada a água, um sistema de água de refrigeração (Póvoa, 1988). A Figura 2.3 mostra um esquema do processo.

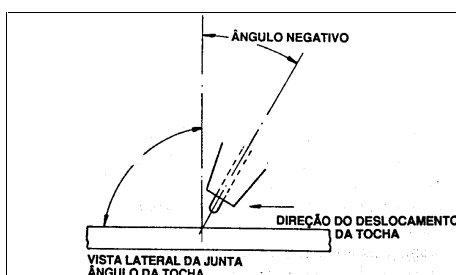


Figura 2.2 – Posicionamento da tocha na soldagem MIG (Alcan, 1993)

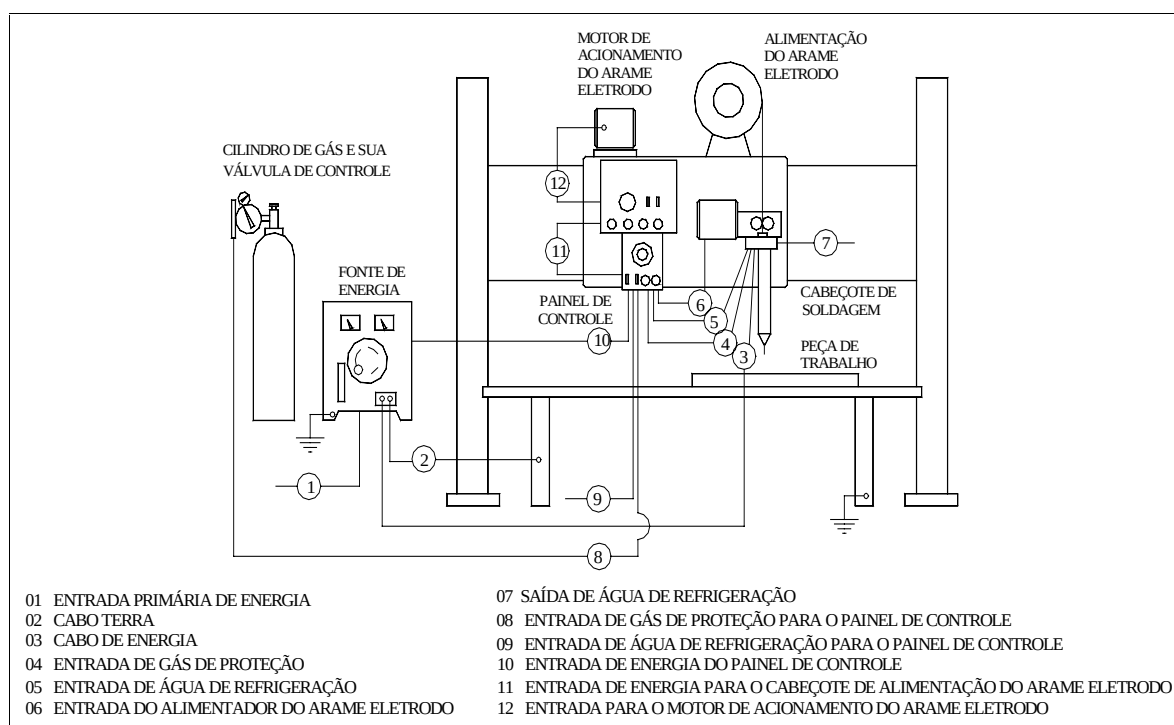


Figura 2.3 - Esquema do processo MIG/MAG (AWS, 1991).

A tocha de soldagem é constituída de um conduíte responsável pela condução do arame eletrodo até o bico da tocha onde ocorre o contato elétrico (o trecho do arame eletrodo localizado entre este contato e o arco elétrico é denominado de comprimento do eletrodo), de uma canalização, que com o bocal, conduz o gás de proteção à poça de fusão, de um bico de contato e, finalmente, de um sistema de refrigeração, geralmente a água, para manter a temperatura da tocha de soldagem controlada (Miranda, 1999).

O bico de contato é fabricado em cobre ou liga de cobre e o conduíte deve prevenir o amassamento do eletrodo e é confeccionado em aço, nylon ou teflon, sendo que, quando se utiliza eletrodo de alumínio, o conduíte deve ser de nylon, teflon ou outro material de baixo coeficiente de atrito, pois o atrito é indesejável.

O sistema de alimentação do arame eletrodo é constituído por um conjunto de roletes tracionadores e por um motor de corrente contínua com velocidade de rotação ajustável,

comandado pela fonte. Este conjunto de roletes pode ser montado em uma unidade de transporte de arame afastada da pistola, neste caso diz-se que a alimentação é por impulsão (“push”). Outro sistema de alimentação é por tração (“pull”), onde os roletes de alimentação são montados na pistola. Outro modo de proceder a alimentação do arame é uma combinação dos dois sistemas, que é o impulsão-tração (“push-pull”).

Os roletes podem ser simples (2 roletes) ou duplos (4 roletes) e recartilhados ou não. Para a soldagem de alumínio ele deve estar o mais próximo à tocha, ou seja, preferencialmente deve-se usar o sistema de alimentação por tração, ou o sistema impulsão-tração.

A fonte de energia fornece a tensão e a corrente elétrica necessárias para estabelecer e manter o arco elétrico entre o eletrodo e o material a ser soldado. Se a mesma apresenta controle de tensão (tensão constante), a velocidade de alimentação do arame eletrodo deverá ser ajustada em um valor constante. Este modo de atuação é denominado de controle interno, apresenta menor custo, porém é limitado à utilização de arames eletrodo de pequenos diâmetros (até 1,2 mm). A fonte de energia com controle de corrente (corrente constante e corrente pulsada), necessita de um sistema de retroalimentação que permita ajustes instantâneos da velocidade de alimentação do arame eletrodo durante a soldagem, a fim de manter constante a corrente. Este modo de atuação é denominado de controle externo, o seu custo é mais elevado e é mais adequado para arames eletrodo de diâmetros maiores (a partir de 1,6 mm) (Miranda, 1999).

A fonte de tensão constante é um equipamento mais simples e barato do que o de corrente constante. Na fonte de tensão constante, a corrente é função do comprimento do eletrodo e da velocidade de alimentação, enquanto na fonte de corrente constante, a tensão que é função destes parâmetros.

Para que o processo de soldagem com eletrodo consumível seja estável, é necessário que a velocidade de consumo (fusão) do eletrodo seja, em média, igual à velocidade de alimentação deste, de modo que o comprimento do arco permaneça relativamente constante (Marques, 1991).

2.4 – Consumíveis

Na soldagem MIG, são considerados materiais consumíveis o eletrodo e o gás de proteção. As demais peças, tais como bico, bocal, mangueiras, etc., são consideradas peças de reposição e/ou sobressalentes do equipamento MIG.

2.4.1 – Gases de proteção

A primeira função do gás de proteção é proteger o metal fundido de oxidações, quando é transferido do arame para a peça de trabalho (Lyttle e Stapon, 1990). Ele tem como requisitos básicos: a formação do arco plasma e a proteção da poça de fusão. Além disso, o gás de proteção deve ajudar a proporcionar um arco estável e uma transferência metálica uniforme, visando aumentar o desempenho e produtividade e reduzir os riscos de defeitos tais como porosidade e falta de fusão (Cunha e Grundmann, 1995 e Lyttle e Stapon, 1990). De acordo com Wainer et. al. (1992), o tipo de gás de proteção influi no modo de transferência e nos formatos do arco e do cordão.

No geral, a maioria dos gases inertes, tais como o argônio, criptônio, neônio, xenônio ou hélio, poderiam ser utilizados com o fim de proteção no processo de soldagem MIG em alumínio. Entretanto, por uma questão de custo, os gases utilizados são o argônio e o hélio ou uma mistura desses dois gases, sendo que o argônio, por ser o mais barato, é o de uso mais geral no Brasil. Algumas vezes se justifica a utilização de uma mistura de argônio e hélio. O argônio é usado na maioria das soldagens semi-automáticas e algumas automáticas porque permite uma boa penetração e limpeza da solda. Como o potencial de ionização do hélio é mais alto do que o do argônio, ele proporciona um perfil de fusão de solda mais largo no contorno de penetração, enquanto que o argônio produz um cordão mais estreito com uma maior penetração (Altshuller, 1998, Póvoa, 1988 e Biloni et al., 1981).

Outros gases, tais como oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono, ou por serem reativos ou por serem de difícil difusão, mesmo presentes em quantidades ínfimas no gás de proteção não são desejáveis, pois causam problemas como a formação de óxidos, e poros na solda do alumínio (Alcan, 1993).

As três principais características de um gás de proteção são o seu potencial de ionização, sua condutividade térmica e o seu potencial de oxidação. O potencial de ionização de um gás é a tensão necessária para remover um elétron de um átomo, fazendo dele um íon. O acendimento e a estabilidade do arco sofrem grande influência do potencial de ionização dos gases de proteção utilizados nos processos de soldagem. Por exemplo, o argônio tem um potencial de ionização mais baixo que o hélio, ou seja, o argônio tem maior facilidade em transformar átomos em íons e, com isso, ajuda a manter um arco suave e estável (Lyttle e Stapon, 1990).

As diferenças na condutividade térmica dos componentes do gás de proteção geram diferenças nas características do depósito de solda resultante. Os gases que tem alta condutividade térmica transferem mais calor para a peça, influenciando, deste modo, na forma e no perfil de penetração da solda. Uma melhor transferência de calor para o metal de base

promove uma melhor penetração na junta e maior fluidez da poça de solda. Quando se solda metais altamente condutores como alumínio e cobre, a alta condutividade térmica se torna crítica. Hélio e dióxido de carbono têm condutividade térmica maior do que a do argônio e eles transferem calor facilmente para o metal base (Lyttle e Stapon, 1990).

Outra propriedade do gás de proteção que afeta o desempenho e as propriedades do depósito de solda resultante é a sua natureza oxidante. Obviamente, uma mistura de gases mais oxidantes ou “ativa”, tais como 100% de CO_2 ou argônio com adição de alta porcentagem de CO_2 ou O_2 , utilizados na soldagem de aço, transferem menos quantidade de elementos de liga presentes no eletrodo de soldagem para o depósito de solda. Esta perda de manganês, silício e outros elementos reativos, tal como o titânio, podem afetar as propriedades da solda (Lyttle e Stapon, 1990).

Normalmente, a escolha do gás de proteção é baseada em custo e qualidade da solda desejada. Muitas vezes justifica-se o uso de um gás de alto custo em vista dos benefícios que ele pode trazer, como uma maior taxa de deposição ou uma redução nos reparos de soldagem. Outros fatores que definem a escolha do gás de proteção são, por exemplo, material de base a ser soldado, tipo de transferência metálica desejada, o diâmetro do eletrodo e o tipo e posição de soldagem. Às vezes, uma mistura de gases de proteção é necessária para uma aplicação específica. (Lyttle e Stapon, 1990 e Pierre, 1987). A seguir, descreve-se as características dos gases normalmente utilizados em soldagem MIG de alumínio:

- Argônio (Ar): é um gás inerte, com baixo potencial de ionização (≈ 16 eV), baixo potencial de oxidação e baixa condutividade térmica. A densidade do argônio em relação ao ar é aproximadamente 1,38 vezes maior, com isso, um fluxo moderado deste gás promove uma efetiva ação protetora, pois ele substitui o ar em volta da solda facilmente e é menos susceptível a reações. O argônio comercialmente puro normalmente é utilizado como gás de proteção nas soldagens de alumínio, magnésio, cobre e suas ligas, conforme pode ser visto na literatura corrente (Altshuller, 1998, Young, 1995, Lyttle e Stapon, 1990, Pierre, 1987, Dillenbeck e Castagno, 1987, entre outros). De acordo com Lyttle e Stapon (1990) e Pierre (1987), o argônio produz uma coluna de arco estreita, e uma atmosfera rica em argônio é necessária para se alcançar transferência goticular em soldagens em geral. Além disso, devido ao seu baixo potencial de ionização, o argônio produz um arco mais estável e suave, gerando menos respingos. Entretanto, o seu baixo potencial de ionização reduz a tensão do arco, criando uma baixa energia no mesmo e portanto, gerando uma baixa penetração (Dillenbeck e Castagno, 1987).
- Hélio (He): também é um gás inerte. De acordo com a literatura (Altshuller, 1998, Young, 1995, Lyttle e Stapon, 1990, Pierre, 1987, Dillenbeck e Castagno, 1987, entre outros) o hélio tem um alto potencial de ionização (≈ 25 eV) e baixa densidade em relação ao ar

($\approx 0,138$). Devido ao alto potencial de ionização, o hélio requer mais tensão para ionizar, com isso, produz um arco mais quente e temperaturas mais altas. Quanto a baixa densidade, o hélio requer uma vazão maior do que a do argônio para proteger adequadamente a região do arco. Caracteristicamente o hélio transfere mais calor para a peça de trabalho do que o argônio, resultando em penetrações maiores, com um perfil arredondado de penetração, ou seja, cordão mais largo e mais plano, utiliza velocidades de soldagem mais rápidas e gera alta qualidade de solda em muitas aplicações. Isto é particularmente importante em metais de alta condutividade térmica, tais como alumínio e cobre.

Conforme Little e Stapon (1990) e Pierre (1987), o hélio produz transferência globular, em soldagens em geral, quando se tem baixas densidades de corrente. De acordo com Altshuller (1998), para o alumínio, a escolha do gás de proteção para soldagens automáticas em chanfro é baseado principalmente na espessura do metal a ser soldado. Como o hélio produz um arco mais quente que o argônio, normalmente é utilizado para soldar metais mais espessos. Para espessuras até $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm) normalmente é utilizado o argônio, pois o hélio ou mistura argônio/hélio não traz nenhuma vantagem que justifique o aumento de custo. Para espessuras entre $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm) e 1" (25,4 mm) é usado argônio ou misturas hélio/argônio. Para espessuras acima de 1" (25,4 mm), uma mistura argônio/hélio ou hélio puro são preferidos.

- Mistura de gases: quando da soldagem de alumínio, pode-se usar misturas Ar + He, visando uma mistura de suas qualidades. Pequenas variações na composição da mistura de gases tem um efeito relativamente pequeno na taxa de fusão do arame, quando comparado com sua influência nas características de transferência arco/metall e no comportamento da poça de solda. Nem sempre é possível especificar com precisão faixas de composição para mistura de gases para materiais ou aplicações específicas (Lucas, 1992). De acordo com Wainer et. al. (1992), se o teor de hélio for maior que 50%, não se obtém transferência goticular.

2.4.2 – Metal de adição

De acordo com a literatura (Altshuller, 1998, Alcan, 1993, Póvoa, 1988, Biloni et al., 1981, entre outros), o arame eletrodo é um componente crítico na soldagem MIG, pois atua com duas funções importantes no processo. A primeira é atuar como o anodo do arco de solda e a segunda é ser o metal de enchimento na soldagem. Como anodo, deve estar centralizado no bocal de gás e ter um ajuste perfeito no bico de contato para se obter perfeita ação de

fricção entre os mesmos, de modo que a corrente de soldagem tenha uma transferência consistente. Como metal de enchimento, deve estar isento de compostos a base de hidrogênio, evitando com isso problemas de qualidade do cordão de solda.

Os fabricantes de metal de adição, na grande maioria, seguem a Seção II, parte C do ASME que trata da especificação de materiais para varetas de solda, eletrodos e metal de adição. Para a soldagem MIG de alumínio, a norma da ASME é a SFA 5.10-83, que é idêntica a A5.10 da AWS (Altshuller, 1998, Alcan, 1993 e Póvoa, 1988).

Os eletrodos e as varetas de solda são classificados com base na composição química da liga utilizada nas suas fabricações. A nomenclatura utilizada pela SFA 5.10 é composta de quatro dígitos, idêntico à “Aluminum Association”, para especificar a liga, precedidos das letras E e R, onde o prefixo R indica que o metal de adição é apropriado para ser usado como vareta de solda e o prefixo E, como eletrodo. Todo metal de adição que for classificado como eletrodo pode ser classificado como vareta de solda, porém, o contrário não é verdadeiro (Alcan, 1993 e Póvoa, 1988).

Conforme o Manual da Alcan (1993), a escolha do metal de adição pode ser simples ou complexa, dependendo da circunstância de soldagem. De acordo com AWS (1996) e Alcan (1993), os fatores que influenciam na escolha do metal de adição são os seguintes:

- composição química do metal base;
- geometria da junta;
- diluição;
- resistência mecânica e ductilidade do metal de solda;
- tendência ao fissuramento a quente;
- resistência à corrosão em serviço;
- comportamento da solda em temperaturas elevadas;
- fluidez do metal de solda;
- alimentação do eletrodo no processo MIG;
- diferença de tonalidade entre o metal de solda e o metal base após a anodização.

De acordo com o citado em Alcan (1993), Póvoa (1988) e Blewett (1982), descreve-se a seguir um pequeno resumo sobre os grupos de metal de adição e suas aplicações.

As ligas 5356, 5183 e 5556 foram desenvolvidas, inicialmente, para soldar as ligas da série 5000. A liga de adição 5356 é a mais usual, pois é compatível com a maioria dos metais de base, apresenta boa resistência mecânica e boa alimentabilidade quando empregada no processo MIG. As outras duas ligas (5183 e 5556) são alternativas à liga 5356 e possuem resistência mecânica ligeiramente maior. Estas ligas são indicadas tanto para soldar ligas da

série 5000 entre si, como para soldagem formando juntas com as séries 6000 e 7000. Entretanto, elas apresentam como limitação a sua aplicação em juntas que são solicitadas sob tensão por períodos prolongados e temperaturas de serviço acima de 65 °C.

Para soldar a liga de base 5454, que foi especialmente desenvolvida para aplicações em alta temperatura, sem ser sensível à corrosão sob tensão, foi desenvolvida a liga de adição 5554, com estas mesmas características. Esta liga de adição também é recomendada para a soldagem de juntas formadas entre o metal base 5454 com metais base das ligas da série 6000.

A liga de adição 4043, que foi desenvolvida para a soldagem de ligas tratáveis termicamente, quando comparada com as ligas da série 5000, possui ponto de fusão menor e fluidez melhor, sendo portanto, a preferida da maioria dos soldadores, pois “molha e flui melhor” e é menos sensível ao fissuramento da solda com metais de base da série 6000.

A liga 4643 é indicada para a soldagem de juntas de metal base da série 6000, com espessuras superiores a 9,5 mm, que serão submetidas a tratamento térmico de solubilização após a operação.

Para soldar as ligas base 2014, 2036, 2219 e as ligas fundidas de Al-Cu, normalmente é utilizada a liga de adição 2319, que é tratável termicamente, obtendo resistência mecânica e ductilidade maiores do que as ligas de adição da série 4000, quando as juntas soldadas são submetidas a tratamento térmico após a operação de soldagem.

De acordo com Altshuller (1998), Alcan (1993) e Póvoa (1988), para diminuir a probabilidade de ocorrência de defeitos na soldagem e garantir melhor qualidade do metal de solda, deve-se tomar alguns cuidados com relação ao eletrodo, tais como:

- os eletrodos devem estar isentos de oleosidade, sujeira e imperfeições superficiais;
- a embalagem deve proteger o eletrodo contra o risco de contaminação por umidade, poeira, agentes agressivos do meio ambiente e danos superficiais;
- antes de utilizar o eletrodo, deve-se conservar a embalagem fechada em ambiente limpo e seco e com a mínima variação de temperatura;
- quando em uso, deve-se procurar proteger o arame da umidade, poeira e outros agentes agressivos do meio ambiente, procurando mantê-lo coberto.

2.5 – Transferência metálica

A forma com que a gota é transferida do eletrodo para a poça de fusão (modos de transferência metálica) é muito importante na soldagem MIG, pois afeta muitas características

do processo, como por exemplo: a quantidade de gases (principalmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvidos pelo metal fundido, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados. De uma forma simplificada, pode-se considerar que existem quatro formas básicas de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência goticular (também chamada de “spray” ou aerossol) e transferência controlada.

O Instituto Internacional de Soldagem (IIW) classifica os tipos de transferência conforme a Tabela 2.2. Esta classificação foi baseada nas técnicas de identificação e estudo dos mecanismos de transferência. Exemplo destas técnicas são: fotografias de alta velocidade, imagem ótica, emissão acústica, monitoramento do som do arco, monitoramento da luz do arco, etc. A Figura 2.4 mostra um esquema dos tipos de transferência.

Tabela 2.2 - Classificação dos tipos transferência metálica feita pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

Designação do Tipo de Transferência	Processos de Soldagem (exemplos)
1. Transferência pôr vôo livre	
1.1. Globular	
- Gotas	MIG/MAG baixa corrente
- Repelido	MIG/MAG protegida por CO ₂
1.2. Goticular (“spray”)	
- Projetado	MIG/MAG com corrente intermediária
- Com alongamento (“streaming”)	MIG/MAG com corrente média
- Rotacional	MIG/MAG com corrente alta
- Explosiva	Eletrodos revestidos
2. Transferência por Contato	
- Curto-circuito	MIG/MAG com curto-circuito
- Contato sem Interrupção	Soldagem com adição de metal
3. Transferência protegida por escória	
- Fluxo guiado pela parede	Arco Submerso
- Outros modos	Eletrodo Revestido, Eletrodo tubular, Eletroescória

2.5.1- Transferência por curto-circuito

A transferência por curto-circuito acontece quando a velocidade de alimentação do eletrodo excede a taxa de fusão até tocar na poça de fusão e a gota metálica que se forma na ponta do eletrodo é transferida para a poça de solda. Quando a gota toca a poça de solda, o sistema fecha um curto-circuito, de modo que a corrente aumenta, sendo esta gota rapidamente atraída para a poça, como consequência da ação da tensão superficial (Figuras 2.4G e 2.5); em seguida o arco se restabelece, abaixando a corrente abruptamente. Este tipo

de transferência é possível de ser usada em todas as posições de soldagem ou em chapas finas e ocorre quando se tem baixos valores de tensão e corrente de soldagem (Marques, 1991, Norrish e Richardson, 1988 e Biloni et al., 1981).

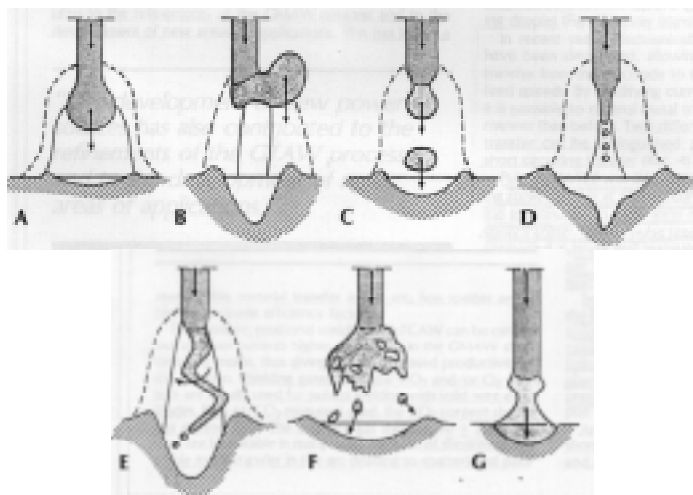


Figura 2.4 - Diferentes tipos de mecanismos de transferência metálica em MIG/MAG como classificado pelo IIW (Stenbacka & Persson, 1989); A - globular; B - globular repelida, C - gotícula projetada, D – com alongamento (“streaming”); E - goticular rotacional; F - goticular explosivo; G - curto-circuito

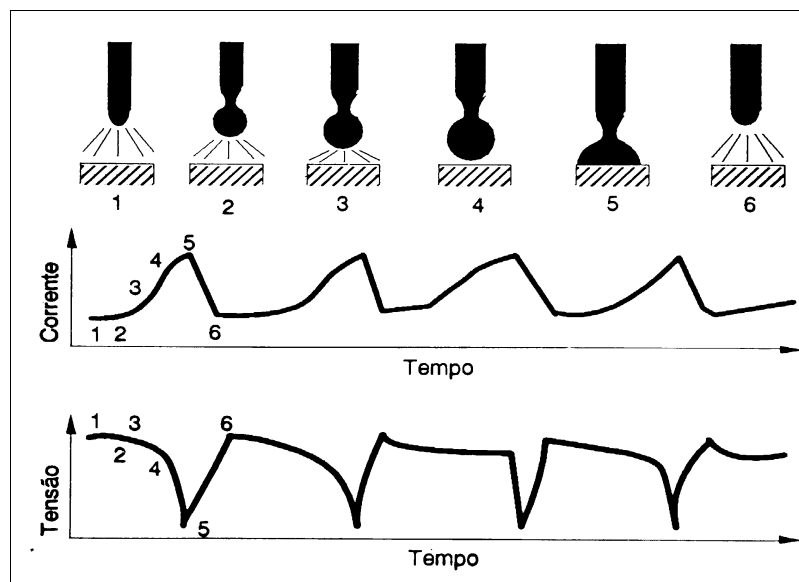


Figura 2.5 – Esquema da seqüência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG - (Marques, 1991).

Este modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar a formação intensa de respingos. Entretanto, a quantidade de respingos pode ser limitada pela seleção adequada de parâmetros de soldagem e ajuste da fonte de

energia, de forma que os curtos ocorram de forma suave. A utilização de uma reatância indutiva para controlar a velocidade de aumento da corrente de curto-circuito auxilia na diminuição dos respingos. A taxa de transferência da gota é da ordem de 20 a 200 vezes por segundo e fornece ao arco um zumbido típico (Marques, 1991, Póvoa, 1988 e Biloni et al., 1981).

Conforme Norrish e Richardson (1988), a frequência de curtos-circuitos é muitas vezes usada como um guia para otimizar a seleção dos parâmetros do processo. Sob condições otimizadas o tempo entre curtos-circuitos é uma função estatisticamente variável e a condição mais estável é obtida quando a variação deste tempo é minimizada.

2.5.2- Transferência globular

De acordo com a literatura (Marques, 1991, Norrish e Richardson, 1988, Póvoa, 1988 e Biloni et al., 1981), a transferência globular ocorre para valores intermediários de tensão e corrente de soldagem e resulta em arco mais estável que na transferência por curto-circuito. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta, normalmente sendo maior que o diâmetro do eletrodo (Figura 2.4A). O glóbulo de metal fundido no eletrodo aumenta de tamanho, até se separar do eletrodo sob efeito da ação da gravidade. Isto causa como consequência, a deposição de grandes gotas e o fornecimento de baixo aporte de calor à junta, resultando em uma solda de baixa penetração.

Quando da soldagem de aços ocorrem algumas circunstâncias em que a gota formada na ponta do eletrodo pode ser defletida para o lado e ainda ser forçada para fora da peça conforme mostrado pela Figura 2.4B. Este modo de transferência metálica é chamado de transferência globular repelida e tem sido observada em soldagem MAG com eletrodo negativo e com eletrodos tubulares auto-protegidos (Norrish e Richardson, 1988).

A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado e, como as gotas de metal fundido se transferem principalmente por ação da gravidade, sua utilização é limitada à posição plana. As velocidades de soldagem, mesmo em materiais de pouca espessura, são muito baixas. Este modo de transferência é raramente empregado em soldagem de alumínio (Póvoa, 1988 e Biloni et al., 1981).

De acordo com Biloni et al. (1981), para o alumínio, as fontes de soldagem eletrônicas tem tornado possível a utilização deste tipo de transferência para pequenas espessuras (< 3 mm), ou quando se deseja controlar o aporte de energia, com a vantagem de se empregar baixas densidades de corrente e tensão.

2.5.3- Transferência goticular

A transferência goticular é mais conhecida pela sua denominação inglesa, ou seja, “spray”. De acordo com a literatura (Marques, 1991, Norrish e Richardson, 1988 e Biloni et al., 1981), à medida que se aumenta a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a peça diminui, até que acima de uma certa faixa, há uma mudança no modo de transferência, que passa de globular para goticular (Figura 2.4C). Neste modo, as gotas de metal são extremamente pequenas e seu número bastante elevado. O arco é bastante estável, não há ocorrência de respingos e o cordão obtido é suave e regular. No alumínio, este modo de transferência geralmente ocorre com corrente contínua e eletrodo na polaridade positiva. A corrente (faixa) na qual ocorre esta mudança no modo de transferência é conhecida como “corrente de transição” (Figura 2.6).

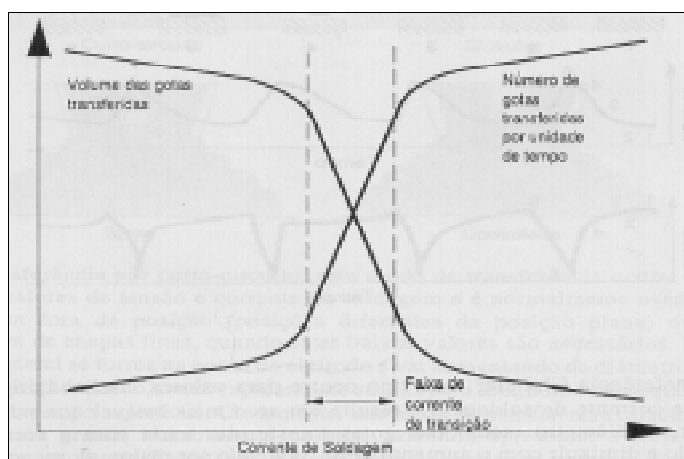


Figura 2.6 – Variação do diâmetro e do número de gotas transferidas por unidade de tempo com a corrente de soldagem (esquemática) – (Marques, 1991)

A Figura 2.6 mostra que antes da faixa de corrente de transição o volume das gotas formadas é grande e a frequência de transferência é baixa, observando-se que com o aumento da corrente as suas variações são muito pequenas. Na faixa de corrente de transição tem-se variações bruscas e significativas, ou seja, um pequeno aumento na corrente gera um grande aumento na frequência de transferência das gotas e uma queda acentuada no volume das gotas. Acima da corrente de transição as suas variações voltam a ser pequenas.

Na transferência goticular, a ação das forças de origem eletromagnética sobrepõem-se às gravitacionais e assim, em princípio, este método poderia ser aplicado a qualquer posição de soldagem. Entretanto, como esta transferência só é possível em correntes elevadas, ela não pode ser usada na soldagem de chapas finas e sua utilização fora da posição plana pode ser problemática (Norrish e Richardson, 1988).

Póvoa (1988) cita que a densidade da corrente de transição varia com o tamanho do eletrodo e o tipo de liga. Com corrente contínua e eletrodo positivo, utilizando o eletrodo da liga de alumínio 5356 com 1,6 mm de diâmetro e corrente de 175 ampéres ele encontrou o modo de transferência goticular. Póvoa (1988), no mesmo trabalho, diz também que com densidades de corrente ainda maiores, o arco torna-se mais estável e os procedimentos de soldagem manual com densidades de correntes até 155 A/mm^2 são comuns.

A transição entre os modos de transferência metálica globular e goticular é dependente de um número de variáveis, às quais incluem a composição, diâmetro e comprimento do eletrodo e a composição do gás de proteção. A corrente de transição é aproximadamente proporcional ao diâmetro do eletrodo. A Tabela 2.3 mostra como a corrente de transição para o aço carbono e alumínio altera-se em função do diâmetro do eletrodo (AWS, 1987).

Tabela 2.3 - Corrente de transição para arames de aço e de alumínio com diferentes diâmetros (AWS, 1987)

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Corrente de Transição (A)	
	Aço (Ar + 2% O ₂)	Alumínio (Argônio)
0,75	155	90
0,90	170	95
1,15	220	120
1,6	275	170

Conforme Scotti (1998a), existem importantes trabalhos sobre transferência em MIG que tem conduzido à opinião clássica de que a transição do modo de transferência globular para goticular é abrupta e quase descontínua. A composição do gás influencia a corrente de transição globular/goticular que é indicada pela mudança na frequência média de transferência das gotas de metal fundido (Figura 2.7) e só ocorre para determinados gases ou misturas de gases de proteção.

A Figura 2.7 mostra que, na faixa de corrente apresentada, quando se utilizou CO₂ puro ou hélio, não se conseguiu atingir a corrente de transição. Quando se utilizou argônio puro, a faixa da corrente de transição oscilou, aproximadamente, entre 260 e 310 A, o mesmo ocorrendo quando se adicionou 5% de CO₂. Quando alterou-se o percentual de CO₂ para 15%, observa-se que houve um deslocamento na faixa da corrente de transição com aumento da mesma. Aumentando este percentual para 25%, o deslocamento para um nível mais alto foi ainda mais significativo.

Existe um limite superior de corrente acima do qual se produzem respingos, rotação do arco e porosidade, que são características indesejáveis na soldagem. Este tipo de

transferência é chamada de transferência goticular rotacional (Figura 2.4E). A transferência goticular é amplamente utilizada (Biloni et al., 1981).

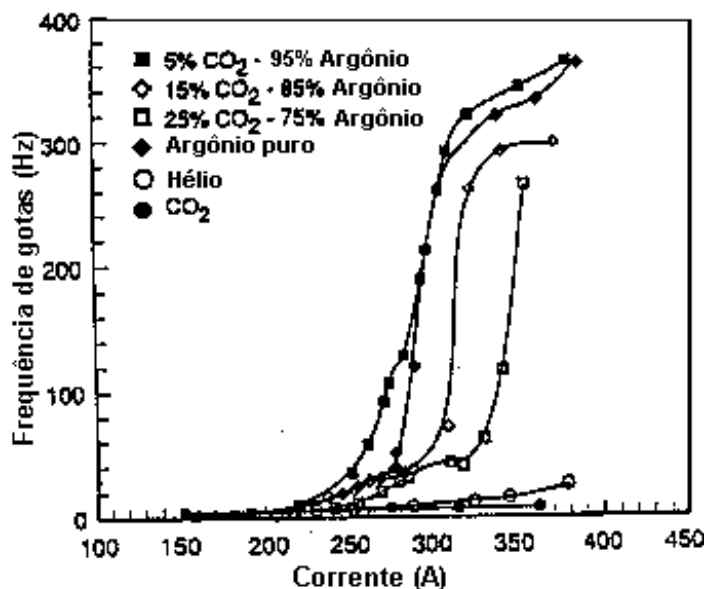


Figura 2.7 - Efeito do gás de proteção na frequência de destacamento das gotas. Eletrodo de aço de diâmetro de 1,6 mm (Rhee e Kannatey-Asibu Jr.'s, 1992 citado por Scotti, 1998a).

2.5.4- Transferência controlada

Sob a denominação de transferência controlada estão agrupados outros modos de transferência que podem ser obtidos pela introdução de perturbações controladas na corrente de soldagem e/ou na alimentação do arame. Estas perturbações têm como objetivo obter uma transferência controlada de metal de adição com as características desejáveis da transferência goticular, mas a níveis bem mais baixos de corrente média, de forma a permitir sua utilização na soldagem de chapas finas ou fora da posição plana (Marques, 1991).

De acordo com a literatura (Lucas, 1992, Stenbacka e Persson, 1989, Norrish e Richardson, 1988, entre outros) a transferência controlada mais usada é a transferência pulsada, que é um tipo de transferência onde se busca o modo goticular, mas com correntes médias abaixo da corrente de transição, juntando as qualidades da transferência por curto circuito com as do modo goticular. Isto é conseguido pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares, um inferior à corrente de transição e outro superior a esta, de modo que durante o período de tempo em que a corrente é baixa, uma gota se forma e cresce na ponta do arame e é transferida quando o valor da corrente é elevado. Este mecanismo de transferência é ideal quando se consegue uma gota por pulso. Para se obter este modo de transferência deve-se usar fontes de energia especiais, capazes de fornecer corrente pulsada,

com parâmetros de pulso controláveis. Uma limitação deste modo de transferência é a introdução de novas variáveis (de pulsação) no processo MIG/MAG, dificultando ainda mais a seleção e otimização de parâmetros para soldagem.

2.6- Fatores que influenciam a transferência metálica

Segundo Norrish e Richardson (1988), o modo de transferência metálica é influenciado pelo tipo de eletrodo e pela corrente, mas a polaridade do eletrodo, os elementos constituintes do fluxo, o gás de proteção e a pressão ambiente podem influir significativamente.

As forças que atuam na transferência metálica dependem de uma série de fatores que na prática são difíceis de quantificar. Por exemplo, a tensão superficial é uma função da temperatura, da composição e da forma da gota fundida. Diversos autores têm examinado o destacamento da gota como um balanço de forças estáticas atuando na gota, conforme mostrado na Figura 2.8, e que no momento do destacamento pode ser representado pela seguinte equação (Norrish e Richardson, 1988):

$$F_g + F_d + F_{em} = F_\gamma + F_v \quad (1)$$

onde: F_g = força gravitacional

F_d = força de arraste (ou dragagem)

F_{em} = forças eletromagnéticas

F_γ = tensão superficial

F_v = força de vaporização

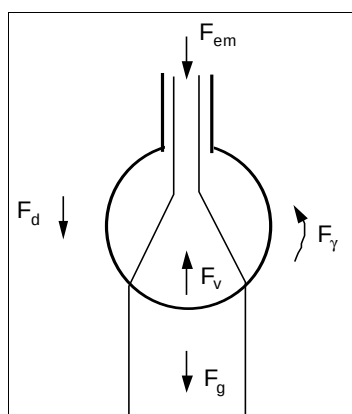


Figura 2.8 – Balanço de forças atuando sobre uma gota.

2.6.1- Força gravitacional

A força gravitacional simplificada é dada pela equação:

$$F_g = m g_z \quad (2)$$

onde: m é a massa da gota

g_z é a componente vertical da aceleração da gravidade

A importância deste termo está no fato da influência que ele exerce no destacamento da gota entre as soldas feitas na posição plana e a sobre-cabeça. A força gravitacional muitas vezes pode ser dominante sobre outras forças de destacamento, particularmente em baixas correntes, quando o termo da força eletromagnética é pequeno. Quando a força gravitacional é dominante, ocorre o modo de transferência globular (Norrish e Richardson, 1988).

2.6.2- Força de arraste (ou dragagem)

A força de arraste exercida sobre a gota metálica, de acordo com Norrish e Richardson (1988), é devido ao escoamento do gás de proteção, dependente da velocidade do jato de plasma, da composição do gás e do tamanho da gota. Ela é expressa pela seguinte fórmula:

$$F_d = 0,5\pi v^2 \rho R_d^2 C'_d \quad (3)$$

onde: v é a velocidade do plasma

ρ é a densidade do gás

R_d é o raio da gota

C'_d é o coeficiente de dragagem

A força de dragagem, na maioria dos casos, é pequena e ela será significativa quando o tamanho da gota for grande, ou seja, em baixa corrente (Norrish e Richardson, 1988).

2.6.3- Força eletromagnética

A força eletromagnética depende do percurso da corrente. Ela é dada pela seguinte fórmula (empírica):

$$F_{em} = \frac{I^2}{100} \ln \frac{D}{d} \quad (4)$$

onde: $D = K\sqrt{I}$

d = mínima seção ativa do eletrodo

D = máxima seção do arco medida na maior seção da gota

K = constante de proporcionalidade – é função do meio

I = corrente

A força eletromagnética tende a prevalecer sobre as forças de destacamento em correntes tipicamente requeridas em soldagens com modo de transferência goticular (Norrish e Richardson, 1988).

2.6.4- Força de vaporização

Em altas correntes pode ocorrer uma significativa vaporização metálica na superfície da gota, na área de contato com o arco. Uma aceleração térmica das partículas de vapor na coluna de plasma resulta em uma força opondo ao destacamento da gota. A força de vaporização é expressa pela seguinte fórmula:

$$F_v = \frac{m_0}{d_v} IJ \quad (5)$$

onde: m_0 = massa vaporizada por volume por ampère

d_v = densidade de vapor

I = corrente

J = densidade de corrente

Em geral, a vaporização somente será significativa em altas correntes (Norrish e Richardson, 1988).

2.6.5- Tensão superficial

Conforme Norrish e Richardson (1988), a tensão superficial tem um importante papel no procedimento do processo de transferência metálica. Muitos fatores se combinam para determinar o efeito deste parâmetro sobre o modo de transferência. Dentre eles se inclui a composição e homogeneidade da gota, a temperatura da gota, o gradiente de temperatura da superfície, a composição do gás e a forma da gota. A tensão superficial é calculada pela seguinte fórmula empírica:

$$F_{\gamma} = \frac{m \cdot g}{f(r/a)} \quad (6)$$

onde: $f(r/a) = 1 - 0,4(r/a)$ e $a = (2\gamma/\rho_m g)^{1/2}$

m = massa da gota

g = aceleração devido à gravidade

γ = tensão superficial

r = raio do eletrodo

a = constante de capilaridade

ρ_m = densidade da gota

2.7 – Técnicas de determinação dos modos de transferência

De acordo com a literatura (Stenbacka e Persson, 1989, Norrish e Richardson, 1988, entre outros), a eficiência do processo de soldagem MIG/MAG é dependente do tipo de transferência metálica. O modo pelo qual ocorre a transferência metálica determina a estabilidade do processo, a adequabilidade quanto à posição de soldagem, a quantidade de respingos, a aparência superficial, a qualidade e a geometria do cordão de solda. Com isso, torna-se importante o controle do modo de transferência metálica, na busca de qualidade, produtividade, estabilidade do arco e diminuição de custos.

De acordo com a colocação de Miranda e Ferraresi (1999), as características dos modos de transferência metálica com relação à frequência e flutuações de tensão, corrente e intensidade luminosa e sonora, podem ser assim colocadas:

- A transferência por curto-circuito ocorre para tensões baixas e correntes moderadas. É caracterizada pelo contato da gota com a poça de fusão durante a transferência, com uma frequência de transferência de baixa para alta, o que causa flutuações relevantes nos sinais de tensão e corrente, na intensidade luminosa do arco e nos ruídos sonoros. Os soldadores experientes utilizam os ruídos sonoros para ajuste das condições ótimas de soldagem.
- A transferência globular ocorre para tensões altas e correntes não muito elevadas. A frequência de transferência das gotas é baixa. Como no curto-circuito, as oscilações nos sinais luminosos e sonoros são consideráveis, mas em menor intensidade.
- A transferência goticular ocorre para tensões moderadas e correntes elevadas. As gotas são transferidas em alta frequência. Este tipo de transferência é a que menos provoca flutuações relevantes nos sinais elétricos, sonoros e luminosos durante a soldagem.

Ainda conforme Miranda e Ferraresi (1999), para se ter um controle efetivo da transferência metálica, o mesmo deve ser realizado baseando-se nas observações dos fenômenos associados à transferência metálica e na atuação sistemática dos parâmetros de soldagem em função das possíveis variações ocorridas.

Dentre os sistemas de monitoramento dos modos de transferência metálica tem-se a shadowgrafia (filmagem em alta velocidade combinada com laser) que é eficiente, principalmente quando combinado com os sinais de tensão e corrente do arco, mas tem um alto custo e exige equipamentos de processamento avançados.

Outros meios de se controlar os modos de transferência metálica são: os sinais de tensão e corrente do arco, os sensores acústicos e os sensores de luminosidade. Os dois primeiros tem aplicação na determinação dos modos curto-circuito e globular, porém, para a transferência goticular estes sensores não são eficientes devido ao baixo valor da razão sinal/ruído deste modo de transferência. Já os sensores de luminosidade possuem sensibilidade para detecção dos três modos de transferência (curto-circuito, globular e goticular), pois para cada modo de transferência o comprimento do arco e a quantidade de íons metálicos emitidos variam para cada gota transferida, de modo que acarreta em modificações na luminosidade (Miranda e Ferraresi, 1999).

CAPÍTULO III

Procedimento Experimental

No capítulo procedimento experimental é mostrado, em detalhes, as técnicas, os equipamentos, os materiais, bem como a seqüência dos ensaios empregados na execução dos testes. Este detalhamento é de suma importância para que se possa ter uma padronização dos testes e com isso garantir a validade dos resultados obtidos, bem como fornecer informações para uma perfeita compreensão dos ensaios e poder facilitar a reprodução dos mesmos.

3.1 - Equipamentos de soldagem

Este item aborda os equipamentos e dispositivos empregados na realização dos ensaios, inclusive os utilizados na coleta de dados. A Figura 3.1 mostra um esquema geral da bancada experimental. A seguir será feita uma explanação detalhada de cada um dos componentes empregados no desenvolvimento dos testes.

3.1.1 - Fonte de soldagem

Para a realização dos testes foi utilizada uma fonte eletrônica multiprocesso, ou seja, pode ser operada nos processos MIG/MAG (convencional ou pulsado), eletrodo revestido, arame tubular, TIG e por plasma, transistorizada, chaveada no secundário, cujas principais características são:

- Corrente contínua ou alternada (convencional ou pulsada)
- Corrente nominal de 300 A para um fator de serviço de 100 %
- Corrente máxima de 450 A
- Tensão em vazio de 56 V
- Potência máxima consumida de 12 KW
- Fator de potência de 0,94

Para a realização destes experimentos a fonte foi ajustada para trabalhar com processo MIG/MAG convencional, operando no modo tensão constante.

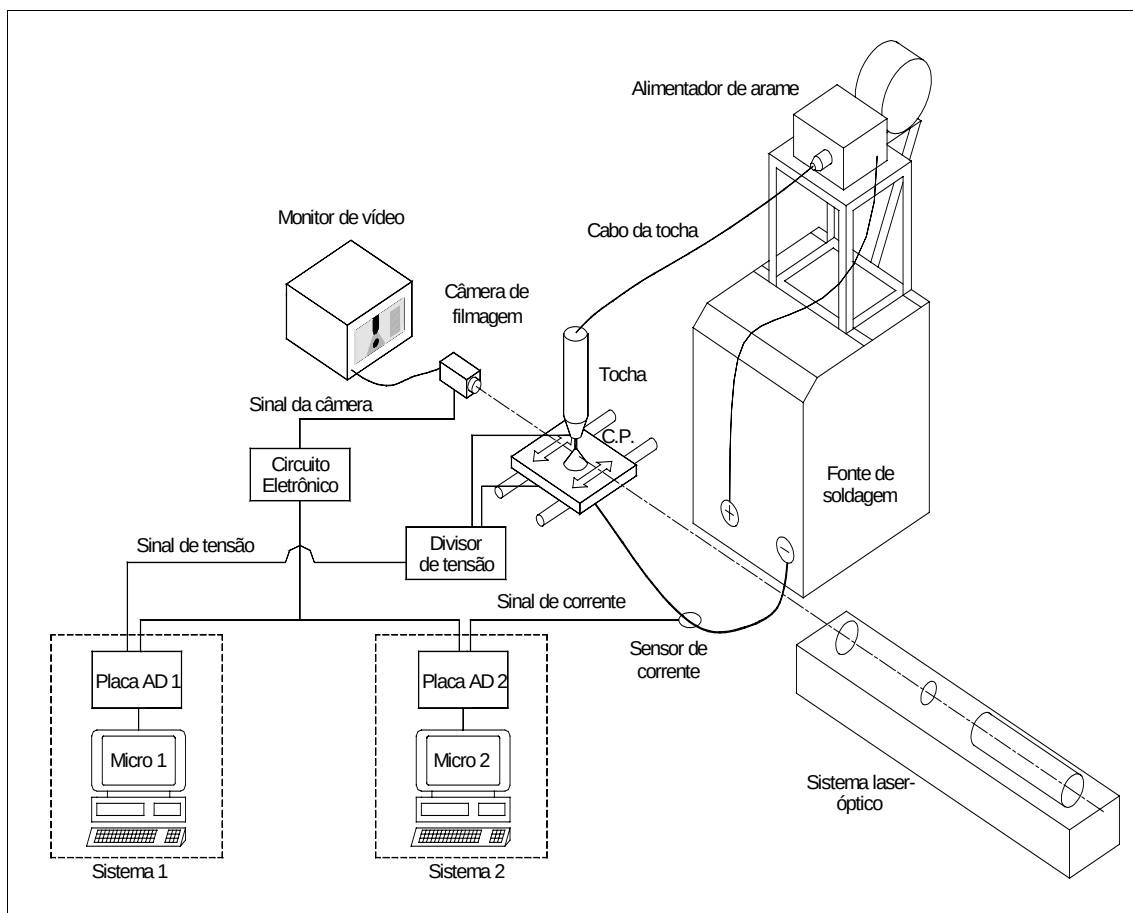


Figura 3.1 – Esquema geral da bancada experimental (Vilarinho, 2000)

3.1.2 - Sistema de movimentação e fixação do corpo de prova

As soldagens foram realizadas de modo automatizado, sendo que a tocha ficava fixa e inclinada em 10° com a vertical e posicionada no sentido de soldar empurrando, visando com isso que o gás de proteção fosse jogado à frente da poça de solda, a fim de realizar a proteção necessária da mesma, para evitar a absorção de gases da atmosfera.

O corpo de prova foi fixado em um suporte (mostrado na Figura 3.2) montado em um fuso que é acionado por um conjunto moto-redutor que pode ser visto na Figura 3.3. Este conjunto é controlado por um dispositivo eletrônico que permite o controle do sentido do movimento e da velocidade do fuso, ou seja, da velocidade de soldagem. A velocidade máxima atingida pelo sistema é de 80 cm/min.

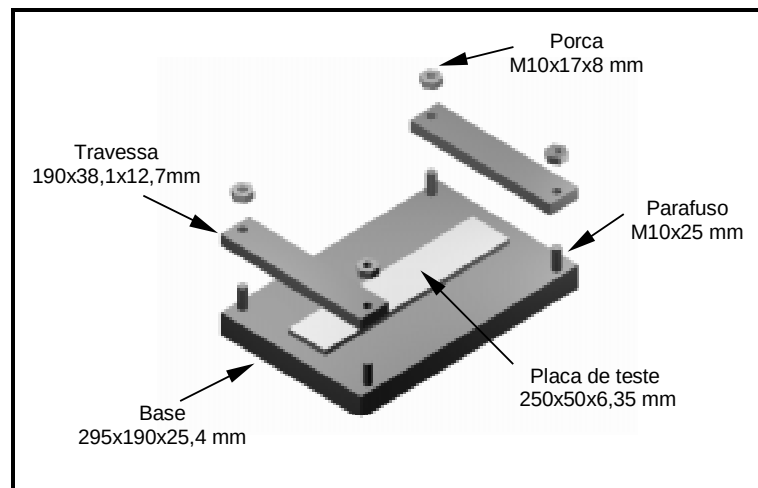


Figura 3.2 – Sistema de fixação da placa de teste (Vilarinho, 2000)

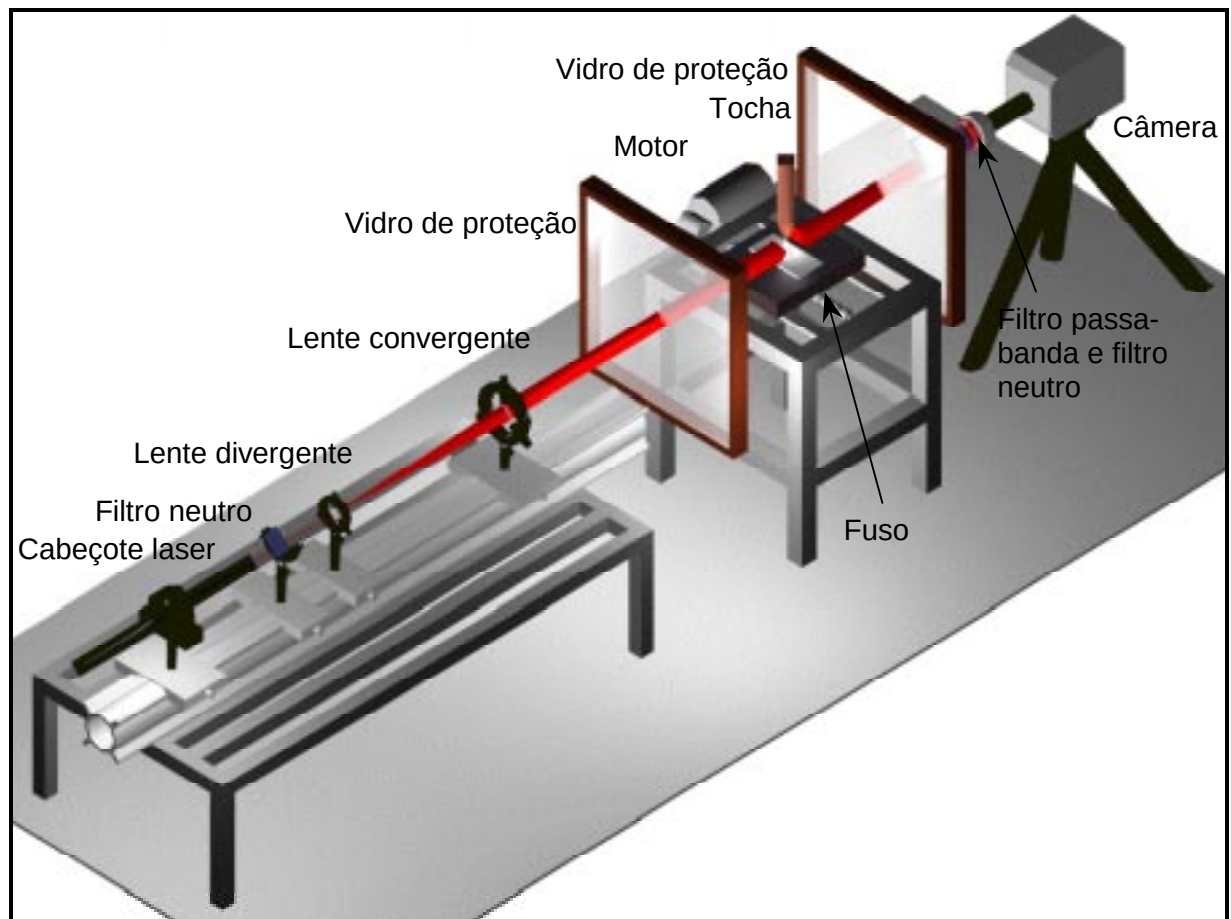


Figura 3.3 – Esquema do sistema laser-filmadora e bancada de soldagem utilizados nos testes (Vilarinho, 2000)

3.1.3 - Tocha de soldagem

Foi utilizada uma tocha refrigerada a ar, equipada com conduíte de nylon, próprio para eletrodo de alumínio. Quando da montagem da tocha, tomou-se o cuidado de mantê-la esticada e que as curvas ficassem bem abertas, a fim de não interferir na alimentação do arame eletrodo, que é um ponto crítico na soldagem do alumínio.

3.1.4 - Shadowgrafia

A shadowgrafia é um sistema óptico utilizado para obter a sombra da imagem, que é gravada em uma câmera de filmagem, ou seja, é a fotografia da sombra. O sistema consiste de um cabeçote laser, conjunto de lentes e câmera de filmagem. Na Figura 3.3 pode ser visualizado este esquema.

Para o sistema de shadowgrafia foi utilizado um cabeçote de laser de 20 mW que emite um feixe de diâmetro de 1,2 mm, que passa por um conjunto de filtros e lentes, a fim de se obter o diâmetro e a luminosidade adequados para a visualização da imagem. Usou-se, também, uma filmadora com capacidade de filmagem de 2.000 quadros por segundo, sistema de gravação de imagem em super VHS e monitor de vídeo para visualização e ajuste do sistema. Maiores detalhes deste sistema podem ser encontrados no trabalho de Vilarinho (2000).

3.1.5 - Sistema de aquisição de dados

Para o sistema de aquisição de dados foi utilizado um sensor de corrente por efeito Hall com opção de operação na faixa de 300 A ou 500 A. Este sensor faz a leitura da corrente e envia o sinal para a placa de aquisição.

Para a leitura de tensão, foi utilizado um redutor de tensão isolado com fator de 60V:10V e 100V:10V. As medições de tensão foram realizadas entre o bico de contato e a peça de trabalho. Os sinais de tensão lidos, depois de passados pelo redutor, eram enviados para a placa de aquisição.

Como as placas de aquisição eram de dois canais, foram utilizados dois microcomputadores, conforme mostrado na Figura 3.1. No primeiro foi instalado o programa "Ubmig" para capturar os sinais de corrente da soldagem e tensão da câmara, fornecendo com isso o valor da corrente média, não necessitando de tratamento de dados por outro software.

No segundo microcomputador foi instalado o programa “Solda”, para capturar os sinais de tensão da soldagem e da câmara. Neste caso, os sinais de tensão da soldagem foram tratados e utilizados no software Statistica para o cálculo da tensão média com o seu respectivo desvio padrão.

A captura do sinal de tensão da câmara, tinha o intuito, caso necessário, de poder ser feito o sincronismo dos sinais de tensão e corrente com o respectivo quadro do filme, no instante em que estava ocorrendo o evento.

3.2 - Materiais consumíveis

Neste item são relacionados e detalhados os materiais consumíveis que foram utilizados para a realização dos testes.

3.2.1 - Corpos de prova

Os corpos de prova foram retirados de uma chapa de alumínio laminada, com especificação ABNT 5052 (liga AlMg) e espessura de $\frac{1}{4}$ ” (6,35 mm). Eles foram cortados com as dimensões de 250 x 50 mm através de corte a plasma e, em seguida, foi feita a limpeza das rebarbas. Estas medidas foram baseadas nas dimensões do suporte de fixação (Figura 3.2) e num plano de corte para melhor aproveitamento da chapa.

Antes de proceder a soldagem, os corpos de prova foram limpos com escova de cerdas de aço inoxidável e, em seguida, com acetona, com o intuito de realizar uma descontaminação das mesmas.

3.2.2 - Eletrodos

Foram utilizados arames eletrodo com diâmetros de 1,0 mm e 1,2 mm, com especificação AWS ER-4043 (liga AlSi). Esta escolha foi baseada em especificação da Alcan (1993) e levando em consideração que é um eletrodo muito usado. Esta liga propiciou uma melhor visualização da transferência metálica, principalmente das gotas, pois ela fornece uma imagem mais “limpa”, o que facilitava as medições. Um eletrodo a base de liga de AlMg (ABNT 5052), também indicado para esta soldagem, em testes preliminares apresentou algumas dificuldades para visualização e medição das gotas. Isto ocorre devido a grande

quantidade de fumos produzidos, além do que, os gases a base de magnésio que se formam no interior da gota provocam microexplosões da mesma, o que ocasiona distorções e dificulta a realização das medições.

3.2.3 - Gases

Com o intuito de se fazer uma comparação e verificar as diferentes variações que podem ocorrer quando se muda o gás, foram feitos testes utilizando gás argônio comercialmente puro e uma mistura de argônio com 25 % de hélio. Estes dois gases foram usados com o arame eletrodo de 1,0 mm. Com o eletrodo de 1,2 mm foi utilizado apenas o gás argônio comercialmente puro. A vazão de gás empregada foi de 15 l/min para todos os testes.

3.3 - Tratamento de imagem

Para realizar as medições de comprimento de arco e diâmetro de gota, foi utilizado o software de tratamento de imagens Global Lab Image, onde o filme gravado durante a realização das soldagens era rodado em vídeo e visualizado em um monitor para posterior captura da imagem pelo software.

3.3.1 - Medição do diâmetro da gota

Para realizar a medição do diâmetro das gotas foram utilizados os seguintes critérios: as imagens eram passadas quadro a quadro e, no caso de curto-circuito, eram capturadas antes de tocar a poça de solda e, então, a gota fundida na ponta do eletrodo era marcada para a realização da medição. Nos demais modos de transferência, as imagens eram capturadas após o destacamento da gota da ponta do eletrodo e antes de tocar a poça de solda, depois as gotas eram marcadas e realizava-se as medições. O programa mede a área; portanto, para se ter o diâmetro aplicava-se a fórmula da área da circunferência.

Após tomar-se o cuidado de verificar se o período amostrado era representativo de toda a amostra, por uma análise prévia de todo o material filmado, foi realizado um total de 10 medições para cada teste, em gotas sequenciais,. Depois de calculado os diâmetros, os valores foram transferidos para o software Statistica onde se calculou o diâmetro médio com o seu respectivo desvio padrão.

3.3.2 - Medição do comprimento do arco

Conforme Scotti et al. (1999), existe uma dificuldade experimental nos trabalhos publicados no que se refere à definição e medição do comprimento do arco, tornando esta medição subjetiva, ou seja, dependente dos critérios adotados por cada autor. Nestes testes específicos foi utilizada uma variação dos critérios adotados por Scotti (1998b) que serão descritos a seguir.

Como a tocha estava inclinada em 10° em relação à vertical, manteve-se esta inclinação e utilizou-se a linha de centro do eletrodo para realizar as medições. O ponto inicial das medidas era a maior seção do eletrodo mais próxima da extremidade, incluindo, inclusive, a gota que estivesse sendo formada na ponta. Traçava-se uma linha reta, caso esta caísse sobre a poça de solda considerou-se este o comprimento do arco, caso contrário o comprimento considerado ia até a chapa de teste, conforme mostrado na Figura 3.4 (a,b,d,e). Caso a gota já estivesse se destacando do eletrodo, formando uma estricção bem acentuada, mesmo que o seu diâmetro fosse maior do que o do eletrodo, a medição do comprimento iniciou-se na maior seção da ponta do eletrodo (Figura 3.4 c,f).

Para realizar as medidas do comprimento do arco, foram utilizados um total de 30 quadros, sendo que, inicialmente, os mesmos 10 quadros utilizados na medição do diâmetro das gotas foram aproveitados e, as 20 medições restantes foram realizadas em quadros aleatórios, ou seja, não foi utilizada nenhuma sequência lógica. Estes valores foram tratados no programa Statistica, onde foram calculadas as médias com os seus respectivos desvios padrões.

3.3.3 - Medição da frequência de destacamento das gotas

No cálculo da frequência de destacamento das gotas, foram consideradas as gotas destacadas durante a medição do diâmetro e o tempo que levou para ocorrer estes destacamentos. Este tempo constava nos quadros da filmagem. Foi levado em consideração, sempre que possível, uma sequência de 10 (dez) gotas.

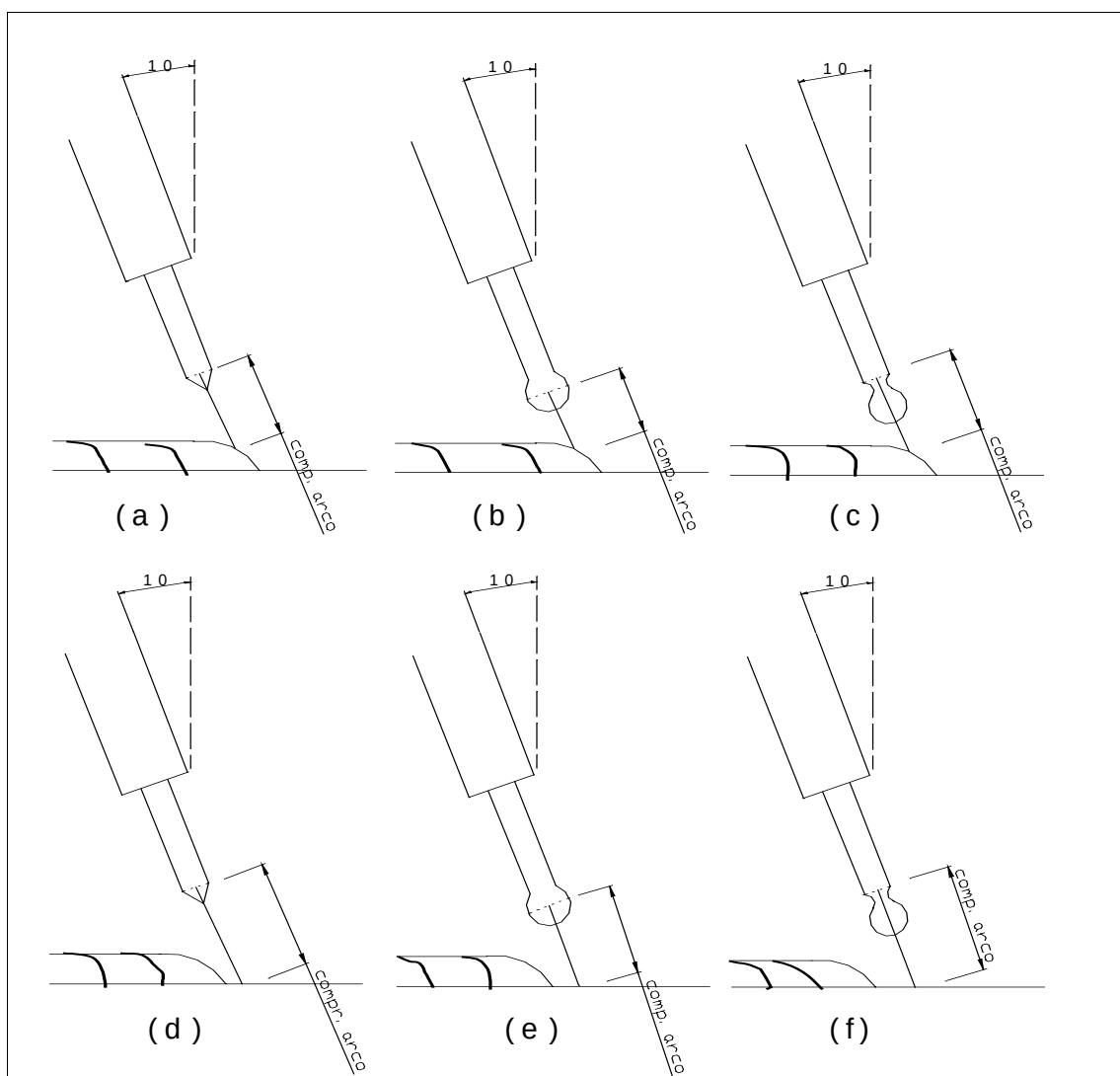


Figura 3.4 – Critérios utilizados para a medição dos comprimentos de arco. (a) sem formação de gota com eletrodo sobre a poça de solda, (b) com formação de gota e eletrodo sobre a poça de solda, (c) com formação de gota e pescoço e eletrodo sobre a poça de solda, (d) sem formação de gota e eletrodo à frente da poça de solda, (e) com formação de gota e eletrodo à frente da poça de solda, (f) com formação de gota e pescoço e eletrodo à frente da poça de solda.

3.4 - Confecção dos mapas

Com os valores médios calculados e os valores de referência, utilizou-se o programa Statistica para traçar os mapas com os modos de transferência metálica que são apresentados no capítulo IV (resultados e discussões).

3.5 – Procedimento de soldagem

- Preparação da chapa, fazendo a marcação para o corte dos corpos de prova (com medidas de 250 x 50 mm), visando um melhor aproveitamento da mesma;
- Realização do corte da chapa utilizando sistema a plasma;
- Rebarbação dos corpos de prova utilizando lima;
- Montagem da bancada de teste consistindo nas seguintes etapas:
 1. Montagem do sistema de laser;
 2. Montagem do sistema de movimentação dos corpos de prova;
 3. Montagem da câmara de filmagem;
 4. Posicionamento da máquina de soldagem;
 5. Colocação do rolo de arame eletrodo;
 6. Montagem da tocha de soldagem, incluindo a verificação do bico de contato e do conduíte e, caso necessário, realização da troca destes acessórios;
 7. Verificação dos roletes de tração. Caso necessário proceder a troca dos mesmos;
 8. Montagem do arame eletrodo, passando manualmente pelo conduíte até sair pelo bico de contato, procedendo então ao travamento dos roletes de tração;
 9. Montagem do sistema de gases, realizando a aferição da vazão.
- Aferição dos equipamentos de controle e medição, tais como: velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame eletrodo;
- Escovação, limpeza com acetona e identificação do corpo de prova;
- Fixação do corpo de prova no sistema de movimentação do corpo de prova, no conjunto de fixação da placa de teste;
- Ajuste da tocha de soldagem com distância bico de contato peça (DBCP) igual a 15 mm e inclinação de 10° no sentido empurrando;
- Ajuste do foco do sistema de shadowgrafia;
- Regulagem da velocidade de alimentação do arame eletrodo, da tensão de referência e da velocidade de soldagem;
- Ajuste da vazão de gás em 15 l/min;
- Realização de pré-testes para ajuste do sistema;
- Início da soldagem, deixando um intervalo de tempo para que a soldagem entrasse em regime, dando, então, início à aquisição de dados da tensão e corrente e da filmagem;
- Gravação do filme em fita de vídeo super VHS;

- Análise dos filmes utilizando o software de tratamento de imagens “Global Lab Image”, fazendo as análises e medições;
- Tratamento de dados e análise das leituras de tensão e corrente.

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutido os resultados dos testes que foram realizados neste trabalho com o objetivo de obter mapas de transferência metálica do processo de soldagem MIG de alumínio, variando-se o diâmetro do eletrodo e o tipo de gás de proteção.

4.1 - Testes realizados com gás argônio e eletrodo de diâmetro 1,0 mm

Para obter o mapa da transferência metálica utilizando chapa de liga de alumínio ABNT 5052, de espessura de $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm) e arame eletrodo de liga de alumínio ABNT ER-4043, com diâmetro de 1,0 mm, foram realizados testes variando-se a tensão de referência da máquina e a velocidade de alimentação do arame eletrodo (consequentemente a corrente de soldagem).

Foram mantidos constantes a vazão de gás (argônio comercial) em 15 l/min, distância bico de contato peça (15 mm) e inclinação da tocha (10 graus). Os testes foram realizados, conforme o procedimento experimental descrito no Capítulo 3, Item 3.5. A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos testes realizados nesta fase.

Para fazer uma análise das filmagens, da forma mais adequada possível e evitar que a quantidade de material depositado por comprimento de solda interferisse nas análises, e com o intuito de se ter um referencial em comum entre os testes, foi mantida uma relação constante entre a velocidade de soldagem (em cm/min) e a velocidade de alimentação do arame eletrodo (em m/min) de aproximadamente 4,57, isto é, a quantidade de metal depositado por comprimento de solda se manteve constante.

4.1.1 - Modos de transferência metálica

Conforme visto na Tabela 4.1, foi possível detectar 4 (quatro) modos de transferência metálica nas condições avaliadas: curto-circuito (CC), globular (GL), goticular (GT) e globular/curto-circuito (GL-CC). Para a classificação desses modos de transferência foi levado

em consideração as definições encontradas na literatura que são listados a seguir, para cada modo de transferência especificamente.

Tabela 4.1 – Valores de ajuste e monitoramento e resultados utilizando gás argônio e eletrodo com diâmetro de 1,0 mm

N ^o	U _{ref} [V]	V _{alim} [m/s]	V _{sol} [cm/min]	I _m [A]	U _m [V]	DP	C _{arco} [mm]	DP	D _{gota} [mm]	DP	F [Hz]	Modtrans
1	16	7	32,0	69	15,96	4,09	2,84	0,63	2,16	0,38	16	GL-CC
2	16	9	41,1	114	15,84	5,80	1,61	0,50	1,59	0,19	56	GL-CC
3	16	11	50,3	141	15,98	6,71	1,20	0,32	1,39	0,16	129	CC
4	18	7	32,0	93	17,70	3,07	3,06	0,75	2,12	0,18	21	GL-CC
5	18	9	41,1	125	17,51	4,54	1,90	0,41	1,60	0,13	43	GL-CC
6	18	11	50,3	126	17,97	5,80	1,56	0,39	1,70	0,18	50	CC
7	20	8	36,6	117	19,32	2,54	2,81	0,53	1,59	0,18	62	GL e GL-CC
8	20	12	54,8	169	19,01	3,72	1,43	0,32	1,07	0,20	196	CC
9	20	14	64,0	182	18,97	4,48	1,13	0,34	1,21	0,12	154	CC
10	22	8	36,6	128	21,20	0,66	6,51	0,46	1,43	0,16	68	GL
11	22	10	45,7	146	21,27	1,14	2,79	0,35	1,15	0,04	189	GL e GT
12	24	13	59,4	200	22,15	0,65	3,31	0,28	1,08	0,05	257	GT
13	24	14	64,0	174	22,69	0,65	5,12	0,32	1,07	0,04	234	GT
14	24	10	45,7	153	22,87	0,61	5,33	0,45	1,12	0,04	182	GT
15	24	8	36,6	128	23,04	0,74	7,94	0,56	1,28	0,16	76	GL
16	26	14	64,0	209	24,41	0,55	4,29	0,54	1,09	0,08	327	GT
17	26	12	54,8	179	24,59	0,60	7,44	0,49	1,07	0,04	257	GT
18	26	16	73,1	231	24,31	0,56	3,19	0,52	1,00	0,04	429	GT
19	28	16	73,1	235	26,04	0,56	6,01	0,44	1,07	0,05	450	GT
20	28	18	77,5	254	26,00	0,58	4,93	0,51	1,03	0,06	563	GT
21	20	10	45,7	143	19,65	3,91	1,14	0,35	1,51	0,27	119	CC
22	22	12	54,8	168	21,19	2,77	0,96	0,32	1,37	0,16	161	CC
23	22	13	59,4	178	21,10	3,56	0,69	0,23	1,37	0,20	191	CC
24	24	14	64,0	193	22,50	1,77	0,59	0,22	1,22	0,07	290	CC
25	24	9	41,1	144	22,81	0,66	4,21	0,90	1,28	0,14	148	GL
26	25	14	64,0	216	23,23	0,54	2,60	0,51	1,12	0,07	360	GT
27	18	8	36,6	112	17,74	3,33	1,76	0,41	1,74	0,46	45	GL-CC
28	20	9	41,1	132	19,29	2,23	2,06	0,61	1,44	0,29	105	GL e GL-CC
29	20	11	50,3	154	19,68	4,38	0,82	0,28	1,23	0,17	231	CC
30	21	9	41,1	134	20,34	3,02	1,41	0,38	1,53	0,28	86	GL e GL-CC
31	22	11	50,3	161	21,32	2,65	0,94	0,39	1,34	0,11	188	CC
32	23	13	59,4	182	21,86	2,78	0,82	0,23	1,19	0,10	281	CC

Onde: N^o = número do teste, I_m = corrente média, U_{ref} = tensão de referência, U_m = tensão média, DP = desvio padrão, V_{alim} = velocidade de alimentação do arame, V_{sol} = velocidade de soldagem, C_{arco} = comprimento médio do arco, F = frequência de deposição da gota, Modtrans = modo de transferência metálica, CC = curto-circuito, GL = globular, GT = goticular, GL-CC = globular/curto-circuito.

4.1.1.1 - Modo de transferência goticular

Para classificar as transferências que se enquadrariam no modo goticular usou-se inicialmente o seguinte critério adaptado de Scotti et. al. (1999): a transferência goticular ocorre quando as gotas são destacadas antes que o seu diâmetro alcance o diâmetro do eletrodo. A ponta do eletrodo pode se tornar afunilada durante a formação das gotas, mas o comprimento deste afunilamento é curto (menor ou igual a 1 vez o diâmetro do eletrodo). A taxa de transferência é normalmente maior que nos outros modos de transferência.

Entretanto, nos testes realizados neste trabalho não foi possível obter gotas menores que o diâmetro do eletrodo para a faixa de corrente estudada, de 60 A a 254 A. Isto ocorreu em função da limitação do cabeçote MIG utilizado, que fornece velocidade de alimentação do arame eletrodo de no máximo 18 m/min (teste 20 da Tabela 4.1). Este foi o teste com menor diâmetro médio de gota (1,03 mm) e máxima corrente (254 A).

Desta forma, após serem feitas as análises, considerou-se como transferência goticular as transferências que tinham gotas com diâmetro médio de até 15% acima do diâmetro do eletrodo (diâmetros menores ou iguais a 1,15 mm) e um pequeno desvio padrão (abaixo de 0,08). Outras condições que foram consideradas na caracterização deste tipo de transferência são: oscilogramas de corrente e tensão com oscilações mínimas, níveis de tensão e corrente mais elevados e alta frequência de transferência. Os testes 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20 e 26 da Tabela 4.1 foram considerados apresentando este modo de transferência.

A Figura 4.1 mostra um trecho dos oscilogramas do tempo com a tensão e a corrente da transferência metálica no modo goticular do teste 19, onde pode verificar-se que tanto a corrente quanto a tensão de soldagem apresentaram-se de uma forma aproximadamente linear, que é uma das características desse modo de transferência metálica.

A Figura 4.2 apresenta uma seqüência de fotos da transferência ocorrida no teste 19, mostrando a ocorrência de uma transferência metálica no modo goticular. O primeiro quadro (GT01) mostra a gota chegando na chapa, enquanto que na ponta do eletrodo já se inicia a formação da nova gota. No quadro GT02, observa-se a gota que está sendo formada, com o diâmetro um pouco maior do que no quadro anterior, enquanto que a gota do GT01 já atingiu a chapa. No quadro GT03, verifica-se um afunilamento na ponta do eletrodo no instante de destacamento da gota. O quadro GT04 mostra a gota já destacada da ponta do eletrodo, que apresenta um afunilamento. A partir do quadro GT05 até o GT08 é a seqüência de um novo ciclo. Os quadros foram adquiridos em intervalos de 0,5 ms, ou seja, as aquisições foram feitas na seqüência, sem saltar quadros, tendo em vista que o intervalo de filmagem entre quadros é de 0,5 ms, pois a filmagem foi realizada em 2000 quadros por segundo.

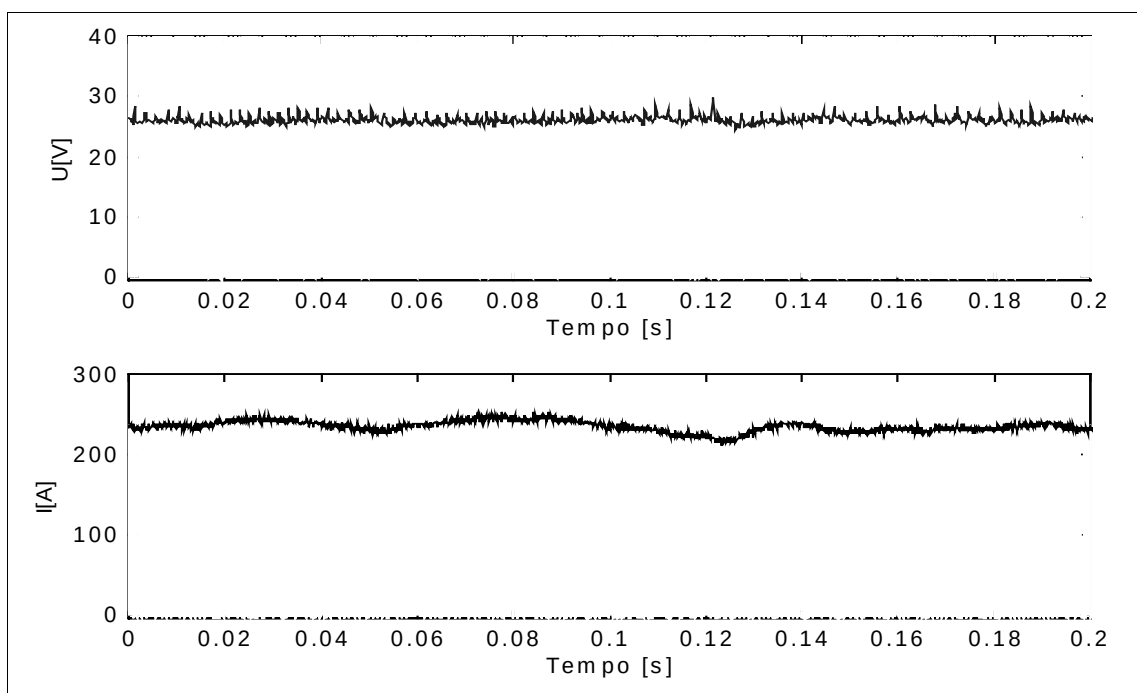


Figura 4.1 – Diagramas de tensão e corrente com o tempo de uma transferência giclar (teste 19).

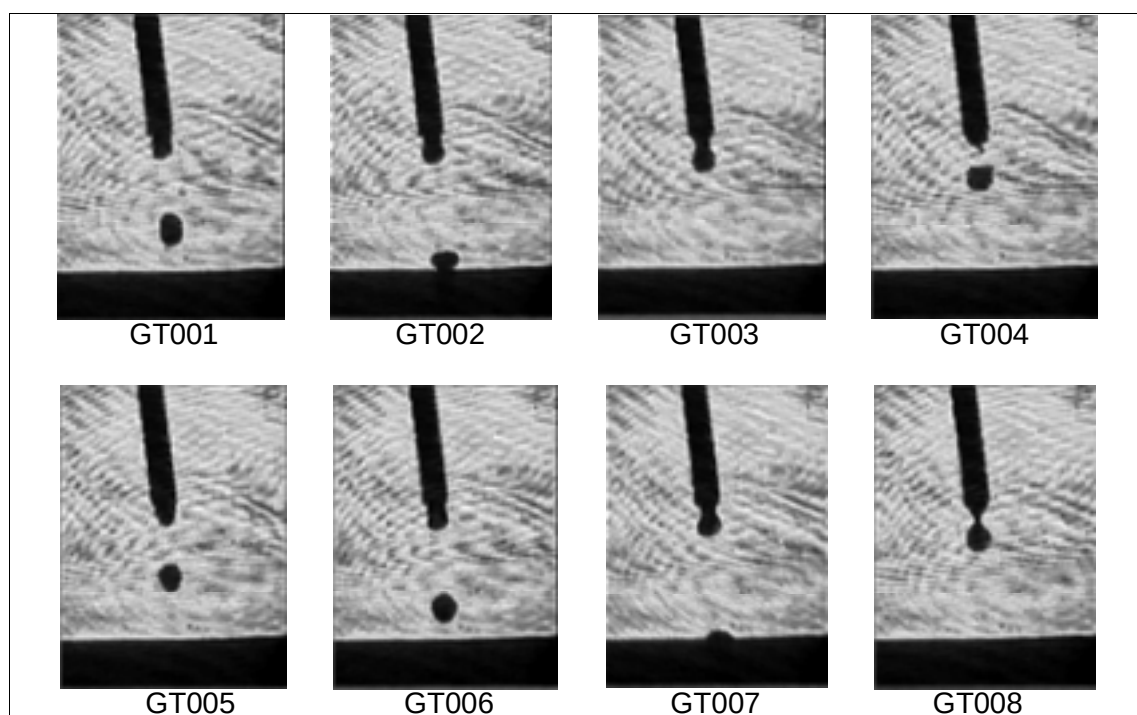


Figura 4.2 – Seqüência de fotos de uma transferência giclar (teste 19).

É importante ressaltar que para a faixa de corrente estudada nesse trabalho, não se conseguiu atingir transferências no modo giclar com alongamento nem giclar rotacional.

4.1.1.2 - Modo de transferência por curto-circuito

De acordo com o citado na literatura (Scotti et. al., 1999, AWS, 1991 e Norrish e Richardson, 1988), a transferência por curto-circuito é um modo no qual as gotas em transferência tocam a poça antes do destacamento. As gotas são, então, sugadas para a poça pelas forças de tensão superficial, formando um menisco entre a ponta sólida do eletrodo e a poça de fusão. A transferência é completada após o rompimento desta conexão. A taxa de transferência é maior que no modo globular e os comprimentos de arco são pequenos, para que a gota possa tocar a poça antes de se destacar. Estas características foram utilizadas como critério para classificar uma transferência como sendo por curto-circuito.

Na Tabela 4.1 os testes 3, 6, 8, 9, 21, 22, 23, 24, 29, 31 e 32 apresentaram as características de curto-circuito, onde é verificado que o comprimento de arco ficou entre 0,58 mm e 1,55 mm, bem menores que os testes que apresentaram o modo de transferência goticular ou globular. A frequência de transferência, em média, foi maior que no modo globular e menor que no modo goticular.

A Figura 4.3 apresenta uma seqüência de quadros da filmagem no modo curto-circuito que ocorreu no teste 8, onde é verificado o contato da gota com a poça de fusão. O quadro CC410, que ocorreu no tempo 41,0 ms após o início da aquisição de dados, mostra o eletrodo iniciando a formação da gota. O quadro CC415, no tempo 41,5 ms, apresenta o eletrodo mais próximo da poça de fusão. No quadro CC420 (42,0 ms), visualiza-se o eletrodo entrando em contato com a poça de solda e continua a formação da gota. O quadro CC425 (42,5 ms), mostra, ainda, um crescimento da gota. No quadro CC435 (43,5 ms), observa-se a gota começando a se desprender do eletrodo. O quadro CC445 (44,5 ms) mostra a gota em sua fase final de desprendimento da ponta do eletrodo. No quadro CC450 (45,0 ms) vê-se, após a transferência, uma espécie de repulsão de parte da gota, gerando bastante respingos, o que pode ser confirmado na seqüência dos quadros CC455 (45,5 ms), CC460 (46,0 ms) e CC465 (46,5 ms).

Como citado por Norrish e Richardson (1988), quando se tem o contato da gota com a poça, as forças de tensão superficial passam a atuar no sentido de sugar a gota para a poça de solda e apresentam diagramas de tensão e corrente com características bem definidas, como o da Figura 2.6, que apresenta a seguinte forma: quando a gota toca a poça da solda fecha um curto-circuito, com uma queda rápida da tensão, ou seja, tendendo a zero, o que tenderia a provocar um apagamento do arco. Devido ao fechamento do curto-circuito, a corrente aumenta. Logo após a transferência, a tensão aumenta, ocorrendo um novo pico no sentido de reacender o arco e ao mesmo tempo, tem-se uma queda na corrente.

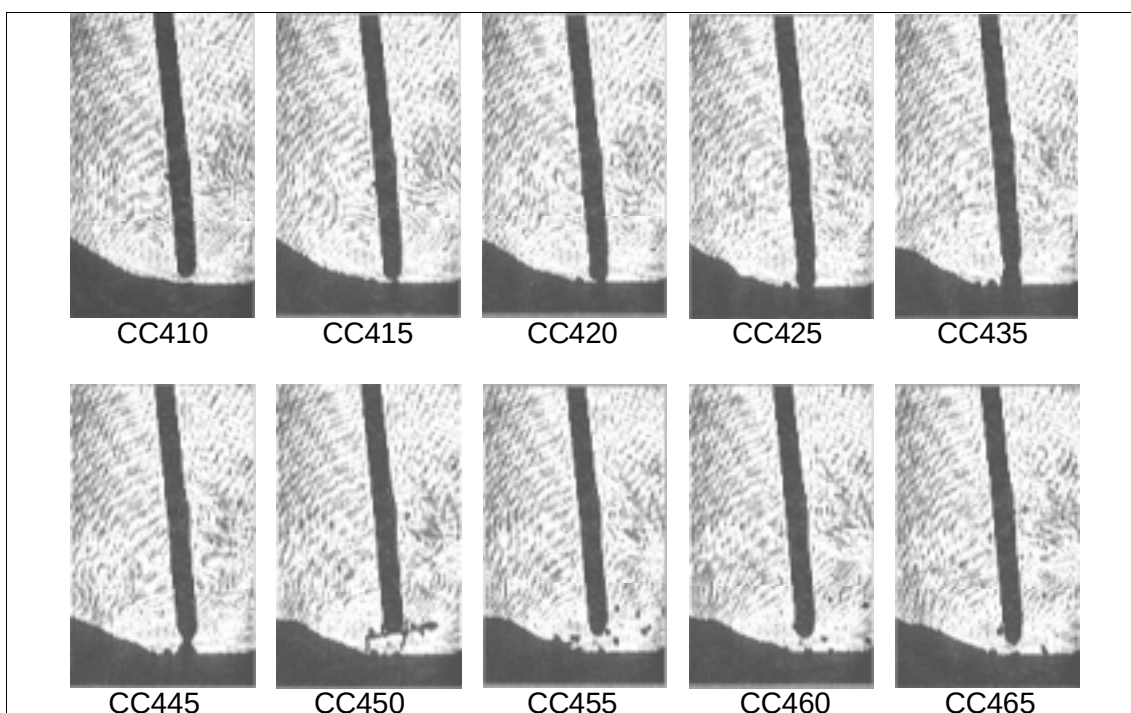


Figura 4.3 – Seqüência de fotos de uma transferência por curto-circuito (teste 8).

Isto não ocorreu de uma forma clara para os testes realizados neste trabalho com alumínio. A Figura 4.4 mostra um oscilograma de tensão e corrente em função do tempo para um modo de transferência por curto-circuito ocorrido no teste 8. Observa-se que os oscilogramas sofrem grande oscilações e não são bem definidos como o da Figura 2.6 (citado pela literatura). Isto provavelmente pode ter ocorrido porque nos testes realizados foi utilizado uma fonte eletrônica, onde ao tentar fazer a tensão do arco igual a tensão de referência, ela diminui a corrente mesmo antes do destacamento da gota.

A Figura 4.5 mostra uma seqüência de fotos do teste 3, onde pode-se verificar a repulsão da gota antes do contato. No quadro CC080, que ocorreu no tempo de filmagem de 8,0 ms após o início da aquisição, observa-se a formação da gota, o mesmo ocorrendo no quadro seguinte, o CC090, no tempo de 9,0 ms. O quadro CC100 (no tempo 10,0 ms) mostra a gota tocando a poça de solda. No quadro CC105 (tempo 10,5 ms) vê-se a interação da gota com a poça de solda, dando a impressão de que a poça de solda iria sugar a gota, mas o que se observa é a gota sendo repelida, conforme pode ser visto na seqüência dos quadros de filmagem, onde o quadro CC110 ocorreu no tempo de filmagem de 11,0 ms, o quadro CC115 no tempo 11,5 ms, o quadro CC120 no tempo 12,0 ms. No quadro CC125 (12,5 ms) a gota já esta prestes a ser transferida. Na seqüência, quadro CC130 (13,0 ms), vê-se que a gota já foi transferida. Os quadros CC135 (13,5 ms) e CC140 (14,0 ms) mostram o término da transferência e o CC145 (14,5 ms) mostra o início da formação de uma nova gota.

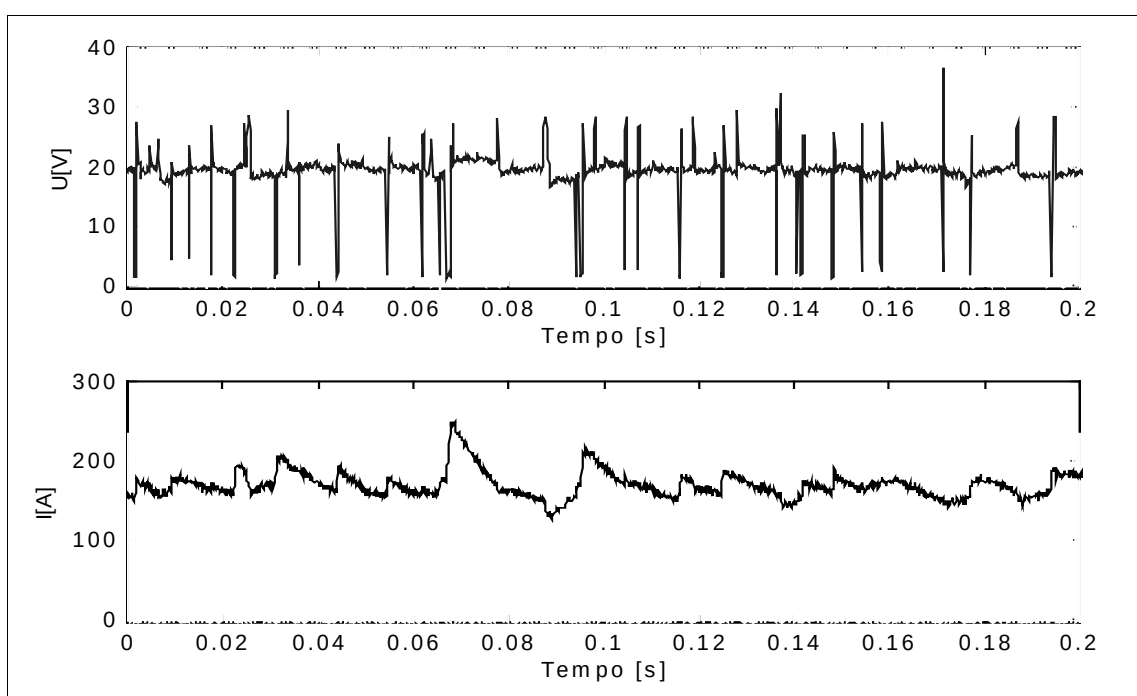


Figura 4.4 – Diagramas tensão e corrente com o tempo de uma transferência por curto-circuito (teste 8).

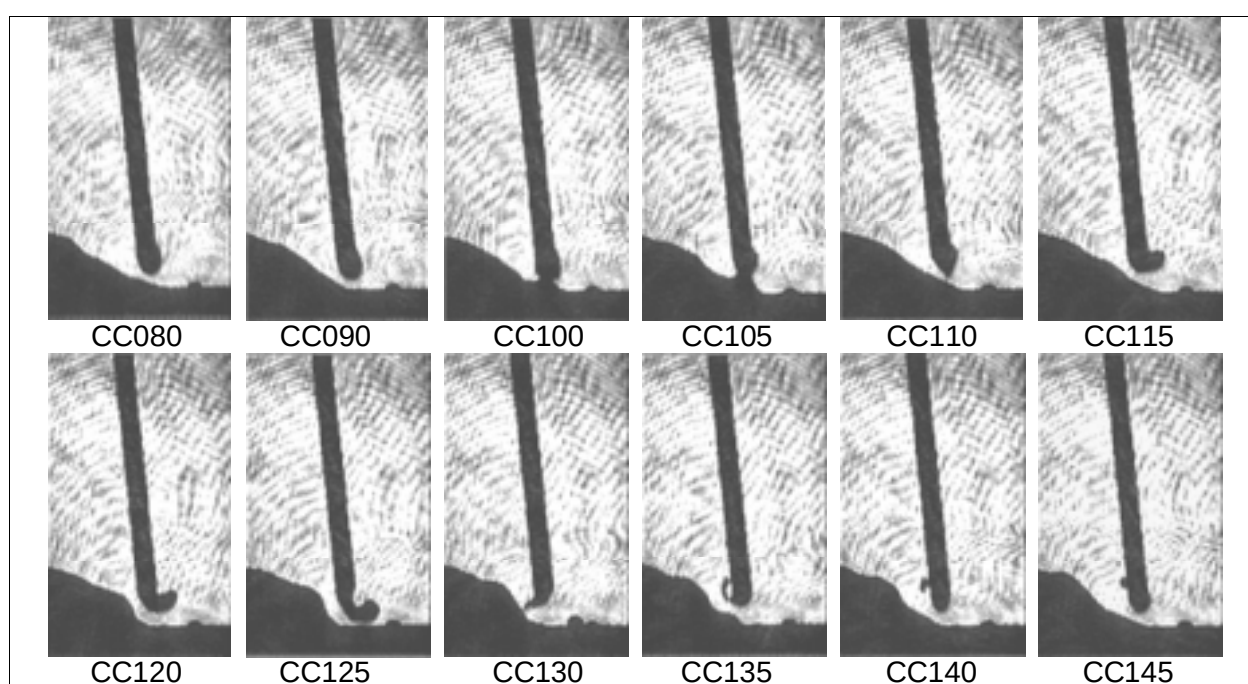


Figura 4.5 – Figura de uma transferência por curto-circuito mostrando uma repulsão (teste 3).

Conforme verificado nas Figuras 4.3 e 4.5 dos testes 8 e 3, a transferência por curto-circuito na soldagem MIG do alumínio é altamente instável, pois no primeiro caso apresentou um tipo de “explosão” que gerou muitos respingos e, no segundo caso apresentou uma repulsão da gota, que também é altamente instável, gerando respingos.

4.1.1.3 - Modo de transferência globular

No modo de transferência globular o diâmetro das gotas são maiores que o diâmetro do eletrodo. De um modo geral, a literatura (Scotti et. al., 1999, AWS, 1991 e Norrish e Richardson, 1988) define a transferência globular como um modo de transferência no qual as gotas atingem um tamanho maior do que o diâmetro do eletrodo antes do destacamento. A taxa de transferência é baixa e não ocorre contato entre as gotas em crescimento e a poça fundida. O comprimento do eletrodo normalmente alonga-se progressivamente enquanto a gota cresce, reduzindo drasticamente após cada destacamento.

Como na literatura não especifica um tamanho mínimo de gota para determinar a transição entre o modo globular e goticular, as observações dos filmes e dos oscilogramas dos testes realizados neste trabalho mostraram que é possível adotar, no caso específico destes testes com alumínio, que o modo globular ocorre quando o diâmetro da gota excede em mais de 15% o diâmetro do eletrodo (diâmetro de gotas maiores que 1,15 mm), pois abaixo desta marca as características das transferências, tanto nos filmes quanto nos oscilogramas, são de goticular.

No modo de transferência globular foi possível observar a formação de uma estricção (pescoço) entre a gota e o eletrodo. A Figura 4.6 apresenta uma seqüência de fotos do teste 10 mostrando uma transferência no modo globular. No quadro GL001 observa-se o início da formação da gota. Após 2 ms, no quadro GL002, a gota na ponta do eletrodo aparenta estar um pouco maior que o diâmetro do eletrodo. No quadro GL003, que ocorre 7 ms depois do GL002, o crescimento da gota já se torna mais visível. Dois milissegundos após, no quadro GL004, observa-se o início da separação da gota da ponta do eletrodo, principiando a formação de um pescoço. No quadro GL005, 0,5 ms após, vê-se a estricção mais acentuada, com a gota muito próxima de se desprender. Meio milissegundo depois, no quadro GL006, a gota já se desprende. No quadro GL007, que ocorre 2,5 ms após, observa-se o início da formação de uma nova gota, enquanto que a anterior está se aproximando da poça de solda, culminando no quadro GL010, 2,5 ms após o GL007, com a gota sendo absorvida pela poça de solda e vendo com boa nitidez a formação da nova gota.

Pelo somatório dos tempos acima, comparado com o tempo dos quadros de filmagem apresentados no modo de transferência goticular, vê-se que o tempo para ocorrer a transferência globular é muito maior e comparando os filmes, observa-se também, a diferença no tamanho da gota.

Na Figura 4.7, que apresenta os diagramas de tensão e corrente com o tempo para a transferência do tipo globular ocorrida no teste 10, pode-se constatar que, assim como no modo goticular, as oscilações da tensão e da corrente são pequenas, só que menos linear do

que no modo de transferência goticular, pois tem pequenos picos que ocorrem provavelmente no momento da transferência metálica.

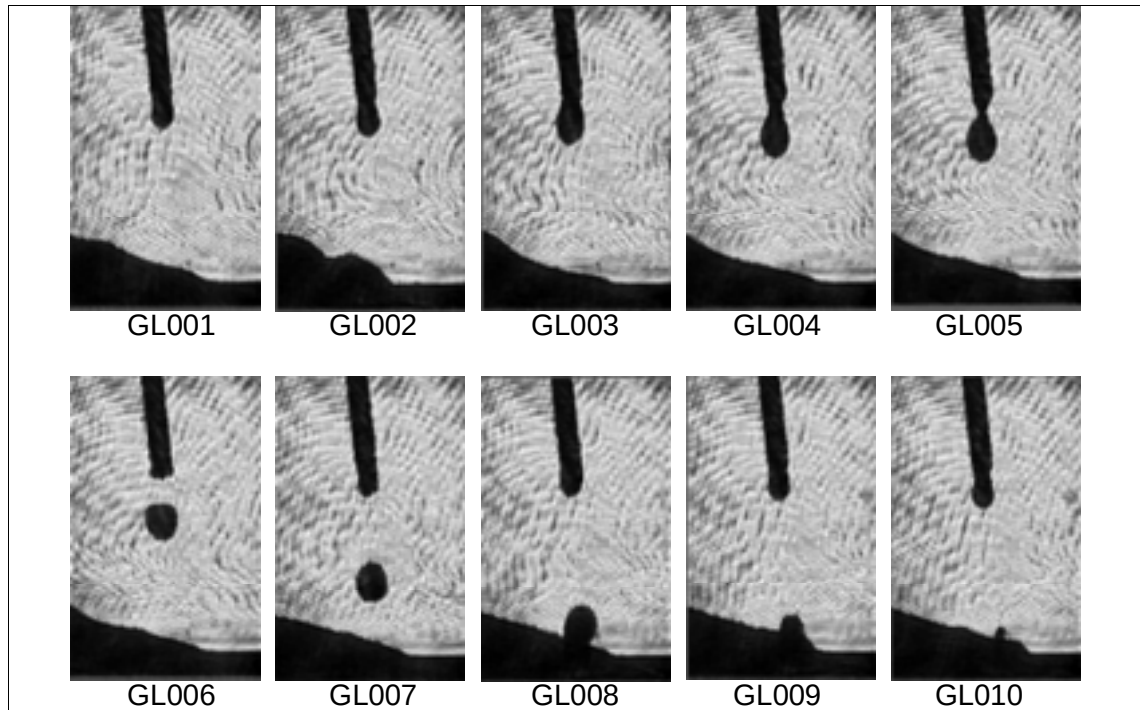


Figura 4.6 – Sequência de fotos de uma transferência no modo globular (teste 10).

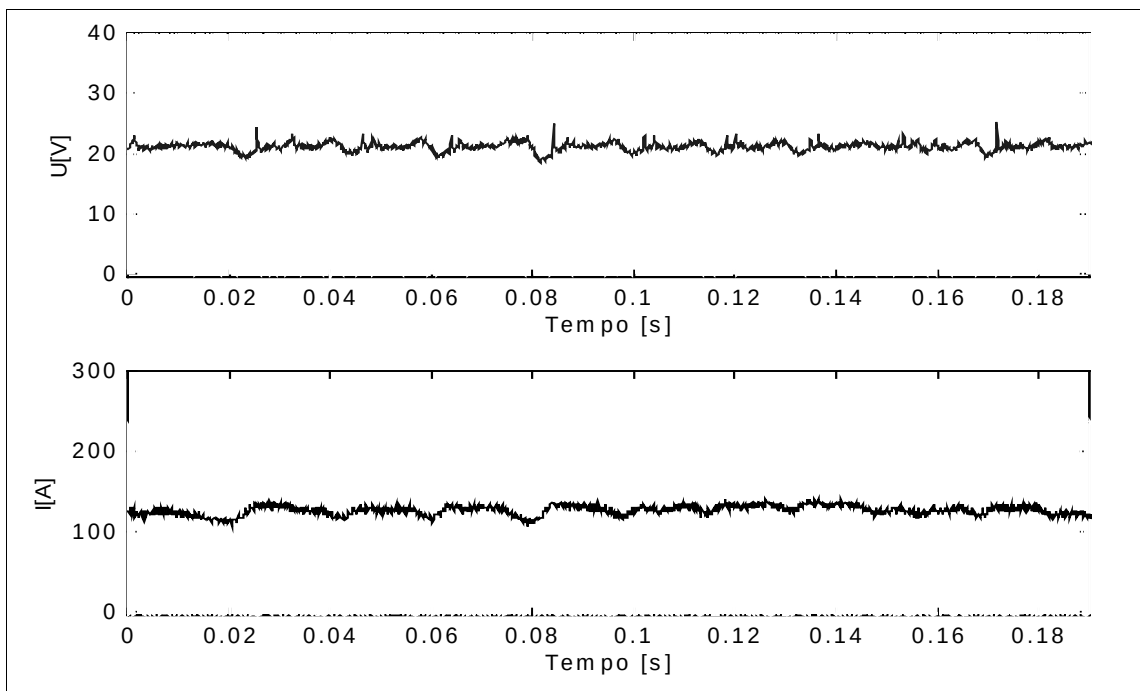


Figura 4.7 – Diagramas da tensão e corrente com o tempo de uma transferência no modo globular (teste 10).

Na Tabela 4.1 verifica-se que nos testes 10, 15 e 25 ocorre transferência metálica no modo globular. Observa-se, também, que a corrente média e a frequência de deposição são mais baixas do que no modo goticular.

4.1.1.4 - Modo de transferência globular/curto-circuito

Conforme descrito por Scotti et. al. (1999), a transferência do tipo globular/curto-circuito é um tipo de transferência por curto-circuito de baixa frequência, tipicamente a baixa corrente e comprimento de arco relativamente curto. Cada gota cresce significativamente (algumas vezes o diâmetro do eletrodo), mas antes de ocorrer o destacamento ela toca a poça de fusão e se transfere por curto-circuito. Assim como no modo globular, o comprimento do eletrodo também cresce progressivamente com o tamanho da gota, retraindo-se rapidamente após a liberação da gota. Para cada transferência de gota ocorre um curto-circuito.

A Figura 4.8 mostra a seqüência de fotos de uma filmagem do teste 1 onde ocorre o tipo de transferência globular/curto-circuito. No quadro GLCC001, observa-se o início da formação da gota e, nos quadros subseqüentes, o crescimento da mesma. No quadro GLCC006 vê-se que a gota já está bem próximo de tocar a poça de solda. No quadro seguinte (GLCC007) a gota já está sendo sugada pela poça de solda e, no quadro GLCC011 tem-se a ocorrência do final da transferência da gota, da ponta do eletrodo para a peça de trabalho. O tempo total entre o quadro GLCC001 e o GLCC011 é de 74,5 ms.

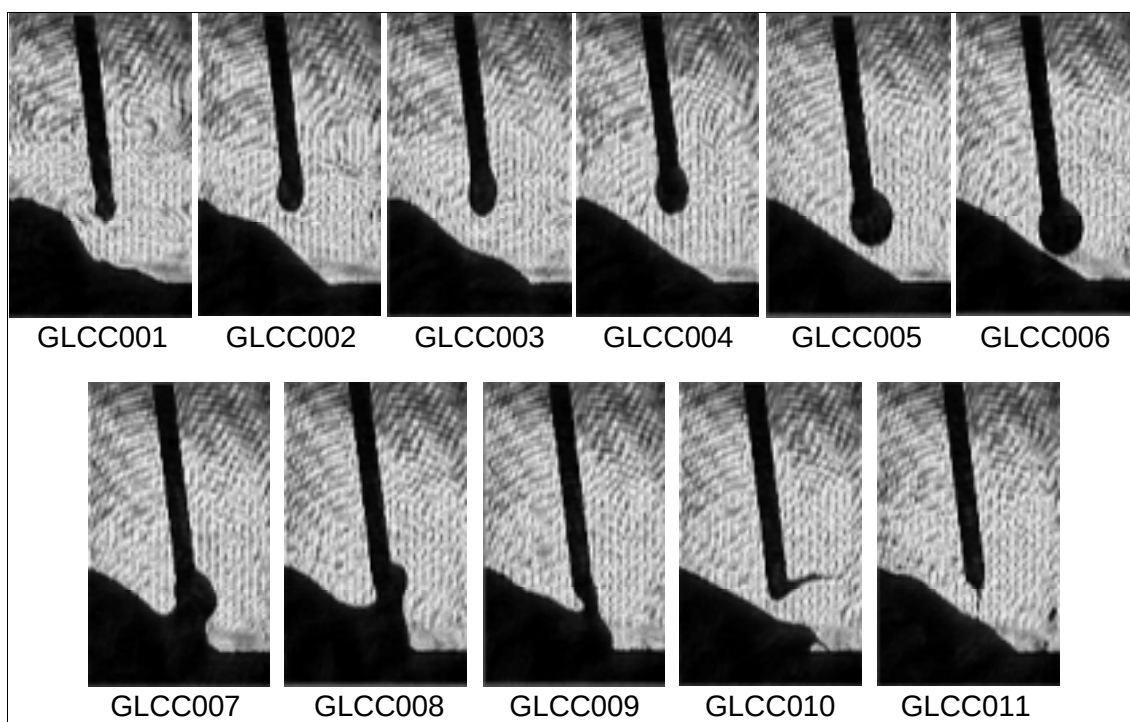


Figura 4.8 – Seqüência de fotos de uma transferência no modo globular/curto-circuito (teste 1).

Na Figura 4.9 tem-se oscilogramas de tensão e corrente do teste 1 onde ocorre o modo de transferência globular/curto-circuito. Observa-se picos que correspondem aos curtos-circuitos ocorridos durante a transferência e entre estes picos, uma região mais linear, com baixa oscilação e de longa duração, significando um longo período de formação da gota, ou seja, baixa frequência, que são características de uma transferência globular/curto-circuito.

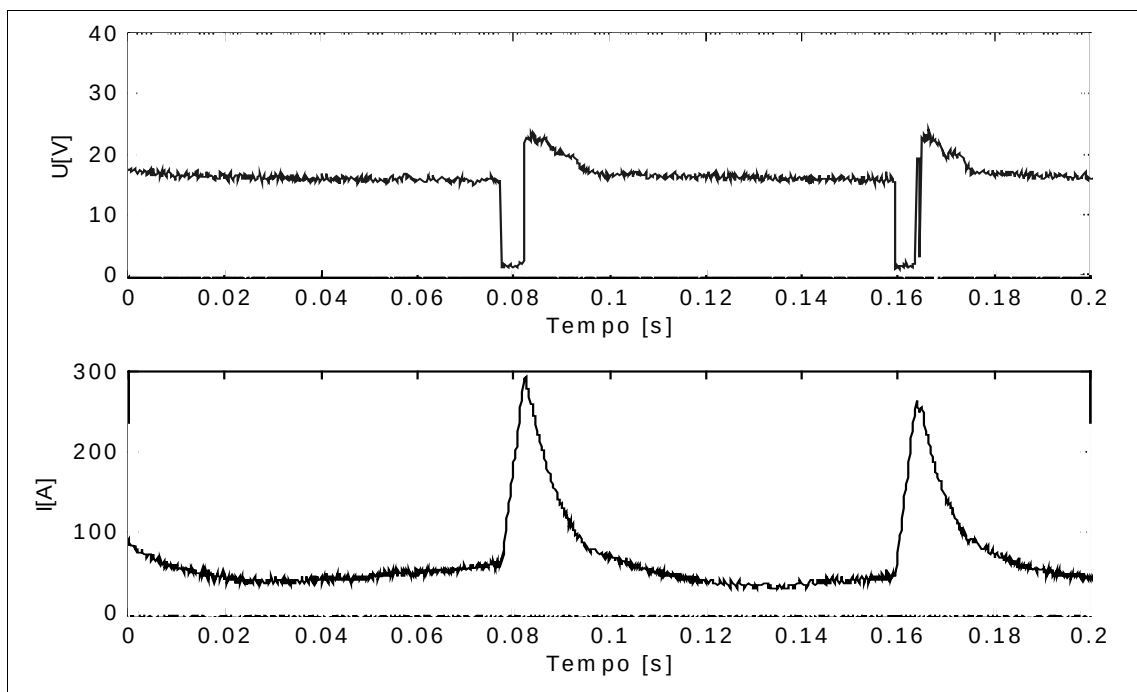


Figura 4.9 – Diagramas tensão e corrente com o tempo de uma transferência no modo globular/curto-circuito (teste 1)

Os resultados deste modo de transferência metálica são apresentados na Tabela 4.1, nos testes 1, 2, 4, 5 e 27. Pode-se verificar que nos testes com este modo de transferência a frequência ficou abaixo de 56 Hz, com diâmetro médio de gotas chegando a 2,16 mm (teste 01). Já com relação aos comprimentos médios de arcos, ficaram levemente acima do modo de transferência por curto-circuito, porém com alto desvio padrão.

4.1.1.5 - Modos de transição

Além dos modos de transferência citados acima, foram encontradas soldagens onde ocorrem transferências com modos combinando entre si de forma aleatória, ou seja, havia uma combinação entre os modos de transferência tendo uma alternância aleatória entre os mesmos, não sendo estáveis.

Estas combinações foram vistas nos filmes e no caso específico da soldagem com eletrodo de alumínio de diâmetro 1,0 mm e gás argônio, foram encontradas as seguintes combinações: globular e goticular (GL e GT) nos testes 7 e 11 e globular e globular/curto-circuito (GL e GL-CC) nos testes 28 e 30. Os dados destas transferências são apresentados na Tabela 4.1.

4.1.2 - Mapas dos modos de transferência metálica

A Figura 4.10 mostra as combinações de tensão de referência e velocidade de alimentação do arame que foram utilizados para teste. Verifica-se que existem 4 regiões com os modos de transferência bem definidos e 2 regiões de transição. Os pontos 7, 11, 28 e 30 são pontos de transição, o que pode ser visto através do gráfico, pois eles estão numa região entre os modos de transferência que foram bem definidos. Verifica-se também, que a velocidade de alimentação limite entre os modos de transferência globular e goticular e entre curto-circuito e globular/curto-circuito está próxima de 10 m/min. Outro fator importante que pode ser constatado é que para estas condições de teste só foi possível obter uma condição normal de soldagem para velocidades de alimentação do arame acima de 7 m/min, que é relativamente alta quando comparada com as da soldagem de aço, utilizando o mesmo diâmetro de eletrodo. Este fato ocorre, provavelmente, devido ao baixo ponto de fusão do alumínio ($\approx 660^{\circ}\text{C}$) ser mais baixo do que o do aço ($\approx 1500^{\circ}\text{C}$), aumentando a taxa de fusão para o mesmo nível de corrente média.

Outra observação verificada na Figura 4.10 é que só foi possível obter o modo de transferência goticular para tensão de referência acima de 24 V, tensão média de aproximadamente 23 V (ver Tabela 4.1)

As regiões I e II são regiões onde não foi possível realizar testes. Na região I o comprimento do arco crescia muito chegando inclusive a queimar o bico e na região II, ocorreram condições instáveis de soldagem, chegando inclusive a apagar o arco e enrolando o arame eletrodo na ponta do bico de contato.

A Figura 4.11 mostra os mesmos dados da Figura 4.10 na forma de comprimento de arco em função da corrente média. Observa-se na transferência globular que os comprimentos dos arcos são grandes (acima de 4 mm), coincidindo com valores encontrados no trabalho de Scotti et. al. (1999) para aços inoxidáveis. A faixa de corrente ficou, aproximadamente, entre 120 A e 146 A. Na transferência por curto-circuito tem-se pequenos comprimentos de arco, entre 1,07 mm e 1,69 mm, com correntes oscilando entre 141 A e 193 A.

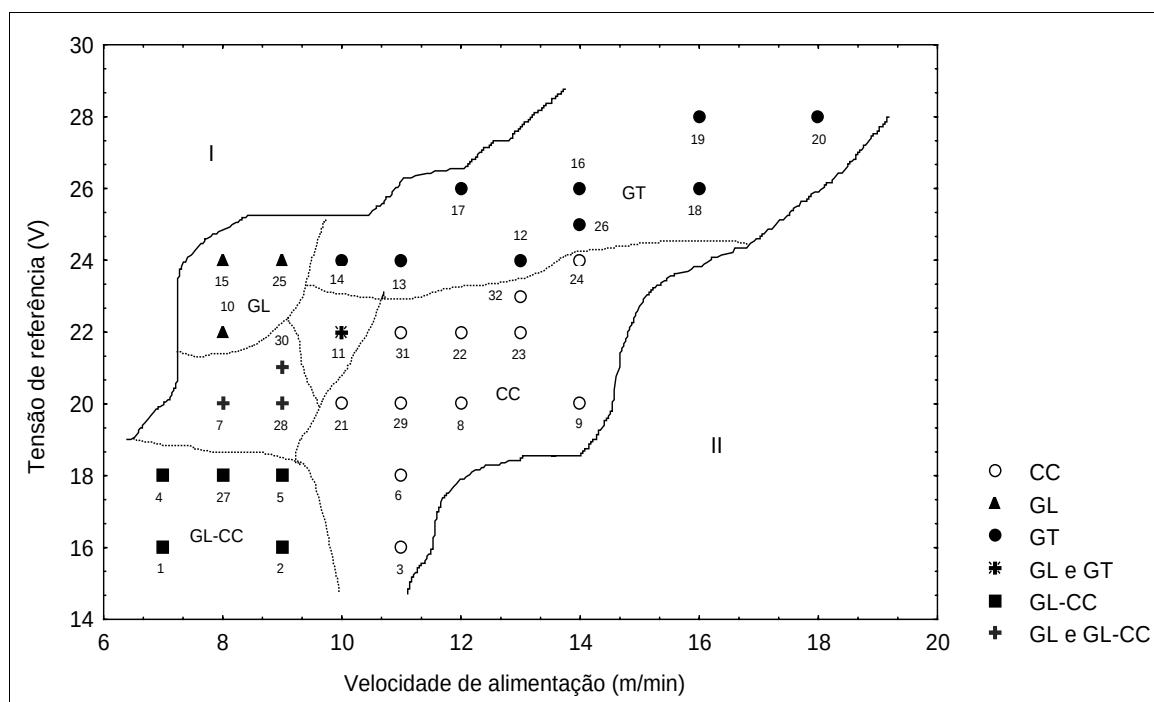


Figura 4.10 – Mapa de velocidade de alimentação do arame eletrodo “versus” tensão de referência, utilizando gás argônio e eletrodo de 1,0 mm

No modo goticular observa-se uma grande variação tanto no comprimento do arco quanto na corrente, concordando com o trabalho de Scotti et. al. (1999) para aço inoxidável. Observa-se uma variação do comprimento do arco entre 2,6 e 7,4 mm. Esta variação está relacionada com a tensão do arco e a velocidade de alimentação do arame eletrodo.

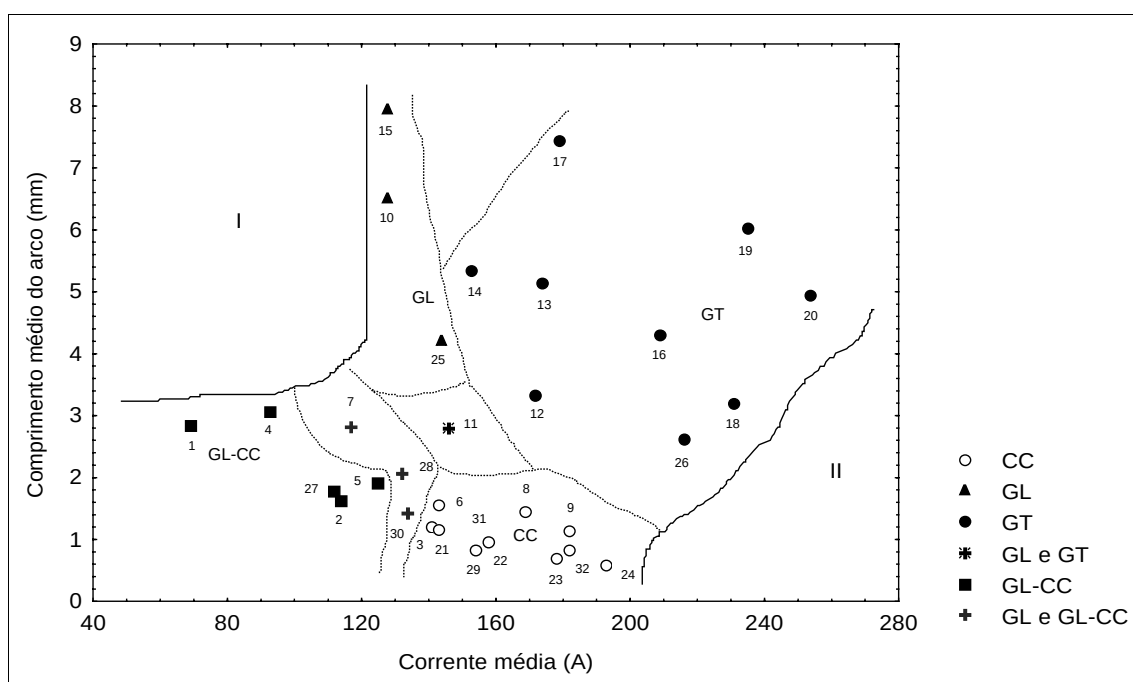


Figura 4.11 - Correntes médias “versus” comprimentos médios de arco, utilizando gás argônio e eletrodo de 1,0 mm.

No modo globular/curto-circuito verifica-se que o comprimento do arco oscila na faixa do curto-circuito com grande desvio padrão (Tabela 4.1), porém, em valor médio é menor do que o globular e as correntes médias são menores tanto em relação ao curto-circuito quanto ao globular.

A faixa de transição entre globular e goticular tem uma grande importância no processo de soldagem, porque delimita as condições não trabalháveis, visto que no modo globular, as aplicações são limitadas, pois pode provocar falta de fusão, penetração insuficiente e reforço excessivo, bem como um alto nível de respingos, conforme pode ser encontrado na literatura (Marques, 1991, Norrish e Richardson, 1988, Póvoa, 1988 e Biloni et al., 1981). Por outro lado, o modo goticular opera em altas correntes e produz, também, um arco mais regular e tem uma grande taxa de deposição. Portanto, o modo de transferência goticular é preferencialmente usado na maioria dos trabalhos (Scotti, 1998a) e por ser uma transferência com mais energia, é utilizado principalmente na soldagem de chapas grossas.

Outro fator importante no conhecimento da corrente de transição é a sua utilização na aplicação da transferência pulsada, que é uma transferência controlada, onde se tem uma transferência goticular com uma energia média mais baixa, conseguida pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares. Um patamar é inferior à corrente de transição e o outro superior a esta, de modo que durante o período de tempo em que a corrente é baixa, a gota é formada e cresce na ponta do arame, sendo transferida quando o valor da corrente é elevado. A transferência pulsada utiliza as vantagens da transferência goticular com as do curto-circuito, fornecendo soldagens estáveis, com alta produção e permitindo soldar em todas as posições, pois ela tem uma corrente média mais baixa do que a de transição.

A Figura 4.12 mostra o gráfico da frequência com a corrente média para os testes que apresentaram o modo goticular e globular. Observa-se nesta figura, que a corrente de transição ficou entre 144 e 153 A. Para a determinação desta corrente foi considerado o valor entre a última transferência globular e a primeira goticular (testes nº 14 e nº 25 da Tabela 4.1), com uma variação, entre as duas, de 9 A. Na Figura 4.12 vê-se que para o modo de transferência goticular a frequência de transferência foi superior a 182 Hz.

4.2 - Testes realizados com mistura de gases argônio + 25% hélio e eletrodo de diâmetro 1,0 mm

Na análise das soldagens, utilizando gás argônio com 25% de hélio, os mesmos critérios do Item 4.1 foram usados, ou seja: variou-se a tensão de referência da máquina e a velocidade de alimentação do arame eletrodo (consequentemente a corrente de soldagem) e foram mantidos constantes a vazão de gás (mistura de gás argônio com 25% de hélio) em

15 l/min, distância bico de contato peça (15 mm) e inclinação da tocha (10° no sentido de soldar empurrando).

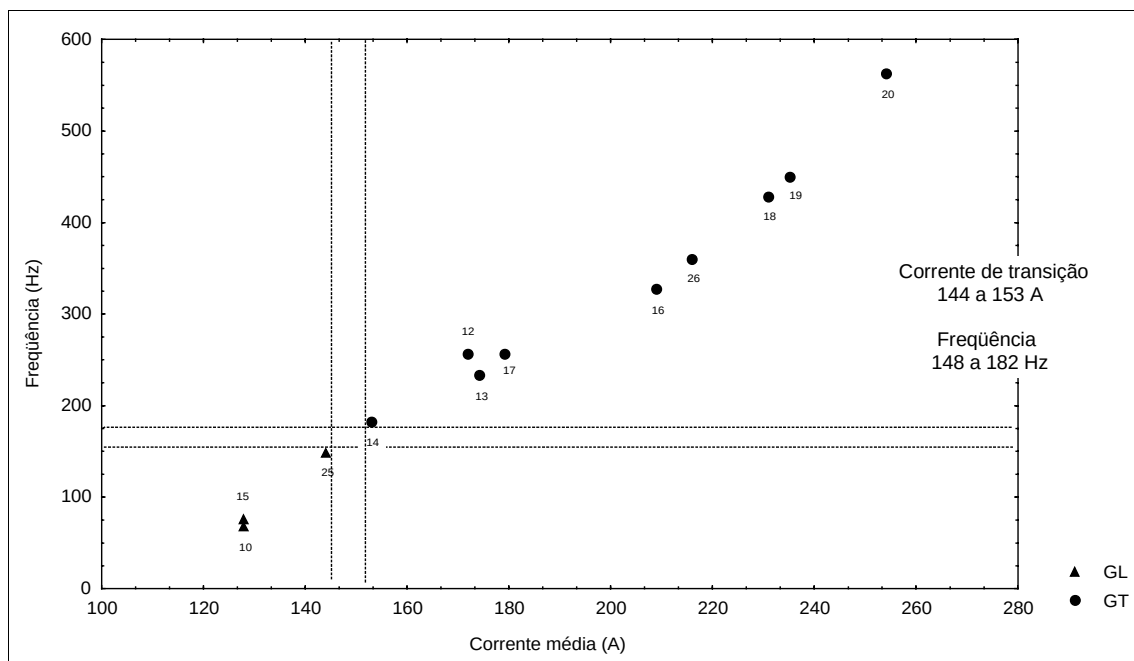


Figura 4.12 - Mapa de correntes médias “versus” frequências de deposição das gotas, utilizando gás argônio e eletrodo de 1,0 mm.

O material dos corpos de prova também foi o mesmo, ou seja, chapa de liga de alumínio ABNT 5052, de espessura de $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm), e arame eletrodo de liga de alumínio ABNT ER-4043, com diâmetro de 1,0 mm. Procurou-se, sempre que possível, utilizar os mesmos pares tensão de referência/velocidade de alimentação do arame eletrodo, visando uma comparação entre as soldagens. A relação entre a velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame eletrodo também foi mantida constante, em aproximadamente 4,57.

4.2.1 - Modos de transferência metálica

Após as soldagens, foi feita a análise das imagens adquiridas de forma a determinar os modos de transferência, onde foi possível novamente detectar os mesmos 4 (quatro) modos de transferência metálica encontrados quando se utilizou eletrodo de 1,0 mm e gás argônio comercialmente puro, conforme indicado na Tabela 4.2: curto-circuito (CC), globular (GL), goticular (GT) e globular/curto-circuito (GL-CC). Para realizar estas classificações foram utilizados os mesmos critérios do Item 4.1.

Observa-se na Tabela 4.2 que o teste 1 foi o único a apresentar o modo curto-circuito, os testes 2, 4, 5, 7, 14 e 19 apresentaram o modo globular, os testes 6, 9, 10, 11, 12, 13 e 17

o modo goticular e o teste 15 o modo globular/curto-circuito. O teste 08 apresentou um modo de transferência de transição entre o globular e o goticular, o teste 16 ficou entre o globular e o curto-circuito, e finalmente o teste 03 ficou entre o globular, o curto-circuito e o goticular.

Tabela 4.2 – Valores de ajuste e monitoramento e resultados utilizando mistura de gás argônio com 25% de hélio e eletrodo com diâmetro de 1,0mm

N ^o	U _{ref} [V]	V _{alim} [m/s]	V _{sol} [cm/min]	I _m [A]	U _m [V]	DP	C _{arco} [mm]	DP	D _{gota} [mm]	DP	F [Hz]	Modtrans
1	20	12,0	54,8	137	19,51	6,70	1,22	0,27	1,23	0,26	228	CC
2	20	8,0	36,6	112	19,38	0,29	4,91	2,00	1,78	0,39	35	GL
3	22	10,0	45,7	141	21,30	0,29	2,37	0,69	1,27	0,16	250	GL; CC e GT
4	22	8,0	36,6	93	21,43	0,76	5,57	1,15	1,75	0,19	35	GL
5	22	7,0	32,0	92	21,32	0,83	4,22	0,98	1,63	0,21	60	GL
6	24	12,0	54,8	164	22,90	0,61	3,53	0,55	1,10	0,03	237	GT
7	26	10,0	45,7	144	24,94	0,67	5,95	0,68	1,24	0,12	128	GL
8	26	12,0	54,8	166	24,84	0,65	6,15	0,59	1,20	0,17	196	GT e GL
9	26	14,0	64,0	182	24,66	0,62	4,91	0,87	1,02	0,06	346	GT
10	26	16,0	73,1	187	24,58	0,54	4,47	0,73	1,09	0,04	243	GT
11	28	16,0	73,1	208	26,35	0,61	5,16	0,89	1,03	0,06	400	GT
12	28	14,0	64,0	197	26,45	0,50	6,04	0,92	1,04	0,05	321	GT
13	28	18,0	77,5	221	26,28	0,50	5,35	0,56	0,99	0,07	409	GT
14	28	12,0	54,8	156	26,64	0,58	9,61	0,56	1,18	0,04	200	GL
15	20	6,0	27,4	58	19,85	2,51	3,62	1,19	2,91	0,44	8	GL-CC
16	22	12,0	54,8	147	21,19	2,21	1,85	0,45	1,28	0,06	130	GL e CC
17	24	14,0	64,0	174	22,77	0,65	3,12	0,54	1,08	0,03	225	GT
18	24	10,0	45,7	134	23,01	0,63	3,03	0,80	1,18	0,04	145	GL

Onde: N^o = número do teste, I_m = corrente média, U_{ref} = tensão de referência, U_m = tensão média, DP = desvio padrão, V_{alim} = velocidade de alimentação do arame, V_{sol} = velocidade de soldagem, C_{arco} = comprimento médio do arco, F = frequência de deposição da gota, Modtrans = modo de transferência metálica, CC = curto-circuito, GL = globular, GT = goticular, GL-CC = globular/curto-circuito.

4.2.2 - Mapas dos modos de transferência metálica

A Figura 4.13 mostra os resultados das combinações de tensão de referência e velocidade de alimentação do arame eletrodo que foram utilizados para teste. Verifica-se que a região com o modo de transferência globular é bem ampla, isto é, os valores da velocidade de alimentação variam de 7 m/min até 12 m/min, com tensão de referência na faixa de 20 a 28 V. Observa-se que é uma condição bem diferente da encontrada na Figura 4.10, quando se utilizou argônio comercialmente puro. Esta diferença entre os resultados apresentados nas

Figuras 4.10 e 4.13 está, provavelmente, ligado ao potencial de ionização ser maior na mistura Ar + 25% He.

Os modos de transferência curto-circuito e globular/curto-circuito apresentaram apenas um teste cada e os pontos próximos que foram testados apresentaram instabilidade. Próximo aos pontos de curto-circuito e globular/curto-circuito não foi realizado um refinamento, pois, provavelmente, o que se observaria seria uma região muito estreita, ou seja, teria que se trabalhar com variações muito pequenas e o intuito destes testes era fazer um comparativo com os testes do Item 4.1, verificando a tendência dos modos de transferência, utilizando os mesmos parâmetros e materiais, variando apenas a composição do gás.

Como no Item 4.1, as regiões I e II são regiões onde não foi possível realizar testes, ocorrendo as mesmas dificuldades, ou seja, na região I o comprimento do arco crescia muito chegando inclusive a queimar o bico e na região II, ocorreram condições instáveis de soldagem, chegando inclusive a apagar o arco e enrolando o arame eletrodo na ponta do bico de contato. Não conseguiu-se realizar testes com tensões de referência abaixo de 20 V, porque nesta região as condições de soldagem também eram instáveis, pois, ou o comprimento do arco crescia muito, chegando inclusive a queimar o bico ou o arco apagava.

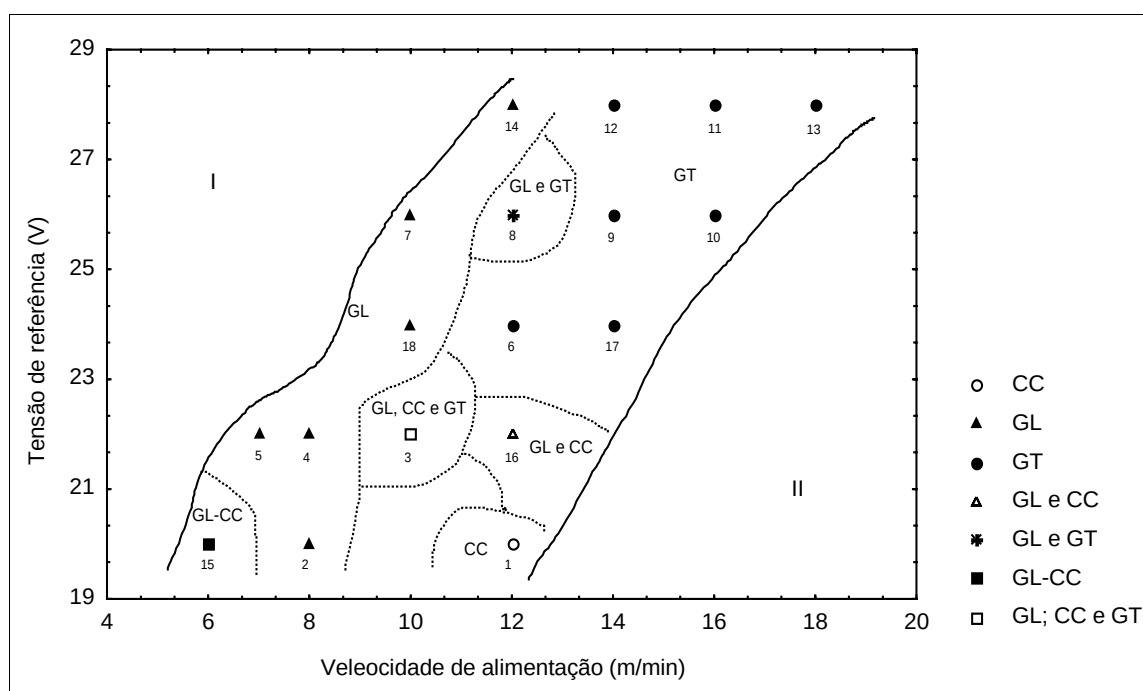


Figura 4.13 – Mapa velocidade de alimentação “versus” tensão de referência do arame eletrodo, utilizando mistura de gases (argônio + 25 % de hélio) e eletrodo de 1,0 mm

Com relação à transferência goticular, tanto utilizando Ar comercialmente puro (Figura 4.10), como a mistura Ar + 25% He (Figura 4.13), não foi possível verificar uma mudança significativa em termos de tensão de referência (ou tensão média), pois nos dois casos só foi

possível obter este modo de transferência para tensões acima de 24 V. Porém, quando se utilizou a mistura Ar + 25% He, o modo de transferência goticular ocorreu apenas para velocidades de alimentação acima de 12 m/min, deslocando a região de goticular para velocidades de alimentação maiores.

A Figura 4.14 mostra a relação entre os comprimentos médios de arco medidos e as respectivas correntes médias lidas. Observa-se que na transferência globular os comprimentos dos arcos são grandes e ocorrem numa faixa mais ampla de corrente do que no Item 4.1 (vide Figura 4.11). Na transferência por curto-circuito e globular/curto-circuito ficou difícil uma análise mais detalhada em função de ter somente um ponto de cada um desses modo de transferência.

Estas mudanças nas posições das regiões dos modos de transferência podem ser explicadas pela mudança no potencial de ionização que ocorre no gás de proteção, quando se adiciona o hélio ao argônio. A mistura de gases assume um potencial de ionização maior do que o do argônio puro e menor do que o do hélio puro. Portanto, para se conseguir a mesma corrente com as mesmas velocidades de alimentação e soldagem, tem-se que fornecer mais energia para que a mistura de gases possa ionizar, ou seja, a tensão tem que ser mais alta (Young, 1995 e Dillenbeck e Castagno, 1987).

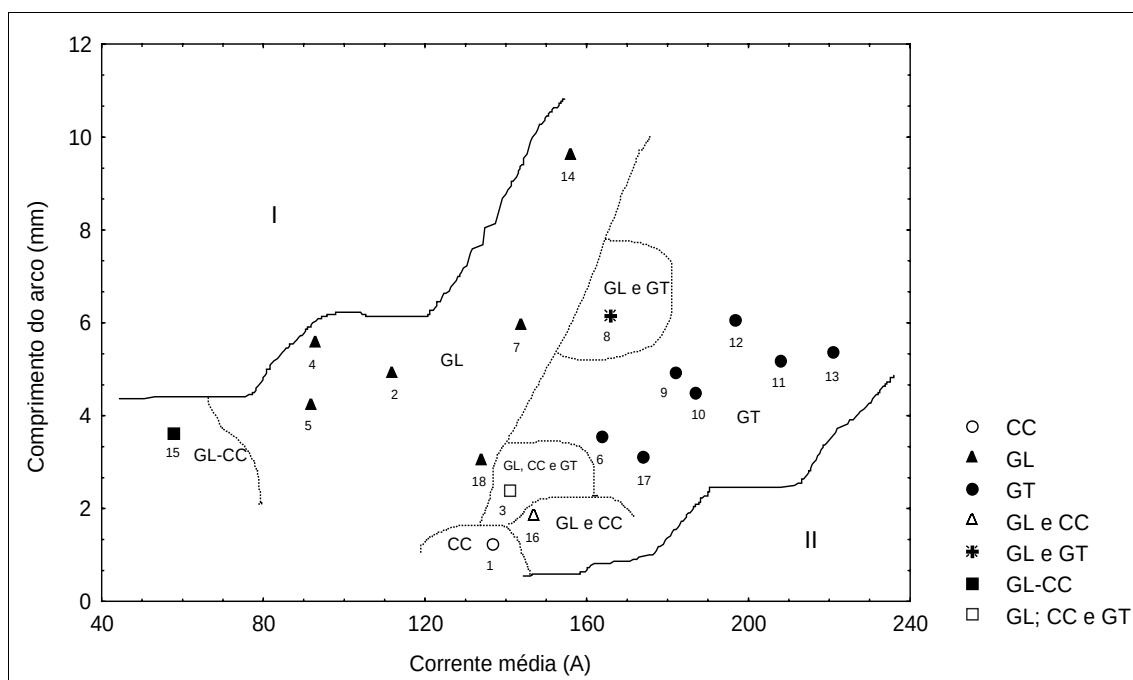


Figura 4.14 – Mapa corrente média “versus” comprimento médio do arco, utilizando mistura de gases (argônio + 25 % de hélio) e eletrodo de 1,0 mm

Outro fator da influência do hélio na mistura, é que conforme Lyttle e Stapon (1990) e Pierre (1987), o hélio produz transferência globular em baixas densidades de corrente e uma

atmosfera rica em argônio é necessária para se alcançar transferência goticular, pois o argônio produz uma coluna de arco estreita. Com isso, quando se usa a mistura como gás de proteção, as características da transferência são intermediárias entre as do argônio e a do hélio. De acordo com essas considerações, obteve-se muito facilmente o modo de transferência globular com correntes mais baixas (acima de 90 A para a mistura Ar + 25% He e acima de 120 A para Ar comercialmente puro).

Na Figura 4.15, que mostra o gráfico da frequência com a corrente média para os testes que apresentaram o modo goticular e globular, verifica-se que a frequência de transferência da gota na faixa de transição está entre 200 a 225 Hertz, mostrando que houve um crescimento em relação ao Item 4.1 (148 a 182 Hz). Este aumento na frequência de deposição da gota ocorre devido a um aumento na velocidade de alimentação, para se obter os mesmos modos de transferência (goticular e globular), pois neste caso foi utilizada uma mistura de maior potencial de ionização.

Pode-se verificar na Figura 4.15, que a faixa de corrente de transição ficou entre 156 e 164 A, mostrando que houve um crescimento dos limites da mesma em relação ao Item 4.1 (144 a 153 A). Este aumento no crescimento dos limites da corrente de transição, provavelmente está relacionado com a condutividade térmica da mistura, que é maior do que o do argônio, para um mesmo par velocidade de alimentação “versus” tensão de referência, mas verificou-se que a variação entre o limite inferior e o superior é praticamente o mesmo, ou seja, 9 A no Item 4.1 e 8 A neste item.

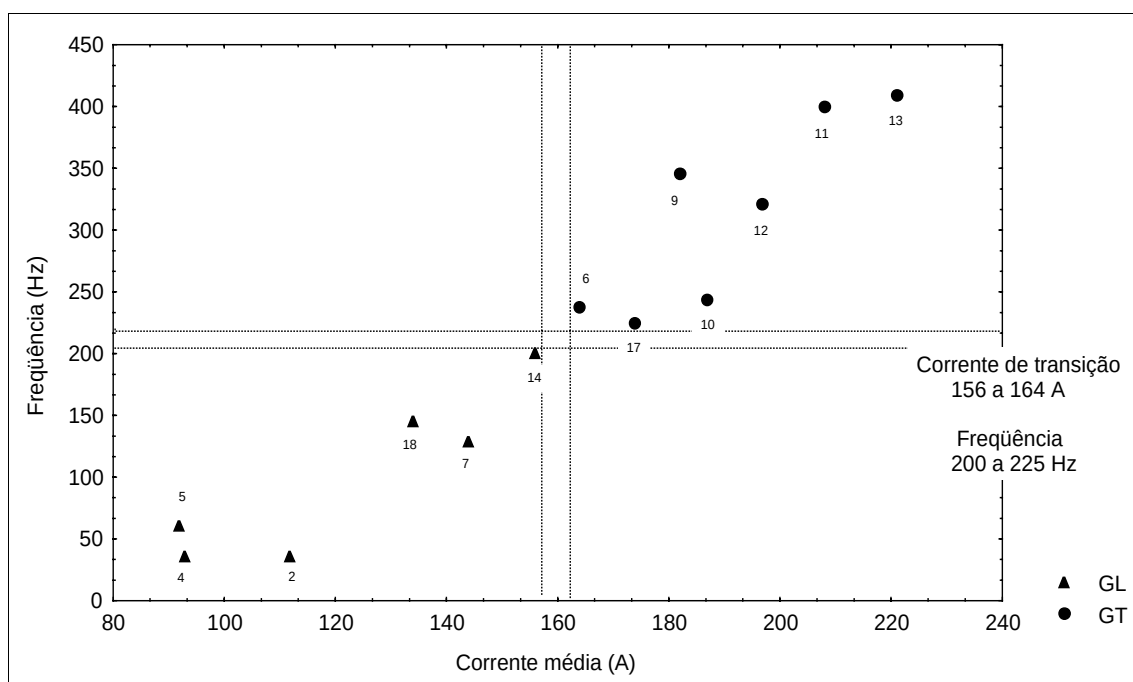


Figura 4.15 – Mapa da corrente média “versus” frequência de destacamento das gotas, utilizando mistura de gases (argônio + 25 % de hélio) e eletrodo de 1,0 mm

4.3 - Testes realizados com gás argônio e eletrodo de diâmetro 1,2 mm

O material utilizado nos corpos de prova foi o mesmo empregado no Item 4.1, com exceção do diâmetro do eletrodo, ou seja, chapa de liga de alumínio ABNT 5052 com espessura de $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm) e arame eletrodo de liga de alumínio ABNT ER-4043, com diâmetro de 1,2 mm. Procurou-se sempre que possível, utilizar os mesmos pares tensão de referência/velocidade de alimentação do arame eletrodo, visando uma comparação entre as soldagens.

Utilizou-se nos testes de soldagem com gás argônio e eletrodo de 1,2 mm os mesmos critérios do Item 4.1, ou seja: variou-se a tensão de referência da máquina e a velocidade de alimentação do arame eletrodo (consequentemente a corrente de soldagem), mantendo constante a relação velocidade de soldagem/velocidade de alimentação em 4,57, e foram mantidos constantes a vazão de gás (argônio comercial) em 15 l/min, distância bico de contato peça em 15 mm e inclinação da tocha em 10° no sentido de realizar a solda empurrando.

4.3.1 - Modos de transferência metálica

Após as soldagens foi feita a análise das imagens adquiridas e detectou-se, também, 4 (quatro) modos de transferência metálica, indicados na Tabela 4.3: curto-circuito (CC), globular (GL), goticular (GT) e globular/curto-circuito (GL-CC).

Observa-se na tabela que os testes 1, 4, 10, 16 e 20 foram considerados no modo curto-circuito, os testes 3, 5, 6, 9, 12, 17 e 21 no modo globular, os testes 7, 8, 19 e 22 no modo goticular e os testes 11, 13 e 14 no modo globular/curto-circuito. Nos testes realizados foram encontrados modos de transição globular com goticular apresentado no teste 18 e globular com globular/curto-circuito apresentado nos testes 2 e 15 da Tabela 4.3.

4.3.2 - Mapas dos modos de transferência metálica

A Figura 4.16 mostra as combinações de tensão de referência e velocidade de alimentação do arame que foram utilizados para teste. Verifica-se as 4 regiões com os modos de transferência globular, goticular, curto-circuito e globular/curto-circuito e a região com os pontos de transição entre estas regiões.

Como no Item 4.1, as regiões I e II são regiões onde não foi possível realizar testes, ocorrendo as mesmas dificuldades, ou seja, na região I o comprimento do arco crescia muito

chegando inclusive a queimar o bico de contato e na região II, ocorreram condições instáveis de soldagem, chegando inclusive a apagar o arco e enrolando o arame eletrodo na ponta do bico de contato.

Tabela 4.3 – Valores de ajuste e monitoramento e resultados utilizando gás argônio e eletrodo com diâmetro de 1,2 mm

N ^o	I _m [A]	U _{ref} [V]	U _m [V]	DP	V _{alim} [m/s]	V _{sol} [cm/min]	C _{arco} [mm]	DP	D _{gota} [mm]	DP	F [Hz]	Modtrans
1	175	20	19,19	3,02	8,0	36,6	1,57	0,32	1,40	0,17	113	CC
2	120	20	19,52	2,02	6,0	27,4	2,86	1,05	1,86	0,36	49	GL e GL-CC
3	109	20	19,54	0,68	5,0	22,9	5,23	0,75	1,83	0,31	31	GL
4	175	22	21,03	1,65	8,0	36,6	1,65	0,60	1,37	0,10	144	CC
5	130	22	21,40	0,67	6,0	27,4	5,91	0,50	1,47	0,26	78	GL
6	113	22	21,57	0,66	5,0	22,9	7,34	0,46	1,58	0,29	58	GL
7	178	24	22,93	0,57	8,0	36,6	6,07	0,41	1,19	0,03	165	GT
8	227	24	22,62	0,44	10,0	45,7	2,41	0,54	1,22	0,08	269	GT
9	135	24	23,13	0,66	6,0	27,4	7,92	0,57	1,36	0,30	77	GL
10	163	18	17,44	4,33	8,0	36,6	0,96	0,27	1,55	0,23	127	CC
11	129	18	17,59	3,25	6,0	27,4	2,20	0,62	2,06	0,26	32	GL-CC
12	73	18	17,84	1,29	4,0	18,1	5,20	1,13	2,48	0,30	10	GL
13	82	18	17,61	2,03	5,0	22,9	3,94	1,19	3,15	0,80	7	GL-CC
14	120	18	17,85	3,75	7,0	32,0	1,54	0,34	1,83	0,57	44	GL-CC
15	125	19	18,41	2,39	6,0	27,4	2,22	0,77	1,85	0,31	49	GL e GL-CC
16	146	20	19,21	2,55	7,0	32,0	1,72	0,61	1,67	0,30	79	CC
17	128	21	20,10	1,20	6,0	27,4	2,79	0,85	1,65	0,22	65	GL
18	152	22	20,92	0,80	7,0	32,0	2,32	0,87	1,36	0,18	173	GL e GT
19	168	23	21,74	0,48	8,0	36,6	2,00	0,61	1,32	0,07	164	GT
20	186	23	21,71	0,98	9,0	41,1	1,07	0,46	1,37	0,02	170	CC
21	155	24	22,81	0,59	7,0	32,0	5,76	0,53	1,38	0,05	135	GL
22	197	25	23,50	0,53	9,0	41,1	3,51	0,37	1,21	0,10	225	GT

Onde: N^o = número do teste, I_m = corrente média, U_{ref} = tensão de referência, U_m = tensão média, DP = desvio padrão, V_{alim} = velocidade de alimentação do arame, V_{sol} = velocidade de soldagem, C_{arco} = comprimento médio do arco, F = frequência de deposição da gota, Modtrans = modo de transferência metálica, CC = curto-circuito, GL = globular, GT = goticular, GL-CC = globular/curto-circuito.

Com pares de tensão e velocidade de alimentação abaixo de 18 V e 4 m/min não conseguiu-se abrir arco e com tensões acima de 25 V e velocidades de alimentação acima de 10 m/min, as condições de soldagem estavam altamente instáveis.

Comparando-se a Figura 4.16 com a 4.10, verifica-se que na transferência goticular, para o eletrodo de 1,0 mm a tensão ficou acima de 24 V, atingindo um máximo de 28 V e a velocidade de alimentação acima de 10 m/min, chegando no limite de 18 m/min, enquanto que para o eletrodo de 1,2 mm, a tensão ficou acima de 23 V, atingindo um máximo de 25 V e a velocidade de alimentação acima de 8 m/min, alcançando o máximo de 10 m/min, indicando uma diminuição nesta região. Na região de globular, para o eletrodo de 1,0 mm, a tensão oscilou na faixa de 22 e 24 V e a velocidade de alimentação no intervalo de 8 a 9 m/min. Para

o eletrodo de 1,2 mm a tensão variou de 18 a 24V e a velocidade de alimentação de 4 a 7 m/min, mostrando que houve uma ampliação desta região, sendo que a tensão no topo é a mesma para os dois casos, pois houve uma diminuição considerável na tensão mínima. Quanto a velocidade de alimentação houve uma ampliação relativamente grande da faixa, com um deslocamento para baixo.

No geral, para o eletrodo de 1,0 mm conseguiu-se transferências com tensões oscilando entre 16 e 28 V, com velocidades de alimentação variando entre 7 e 18 m/min, enquanto que, utilizando eletrodo de 1,2 mm, a tensão oscilou entre 18 e 25 V, com velocidade de alimentação na faixa de 4 a 10 m/min. Estes resultados mostram que houve um estreitamento na faixa de tensão para o eletrodo de 1,2 mm, mas dentro da região do eletrodo de 1,0 mm. Na velocidade de alimentação, também houve um estreitamento da faixa, mas com um deslocamento para baixo.

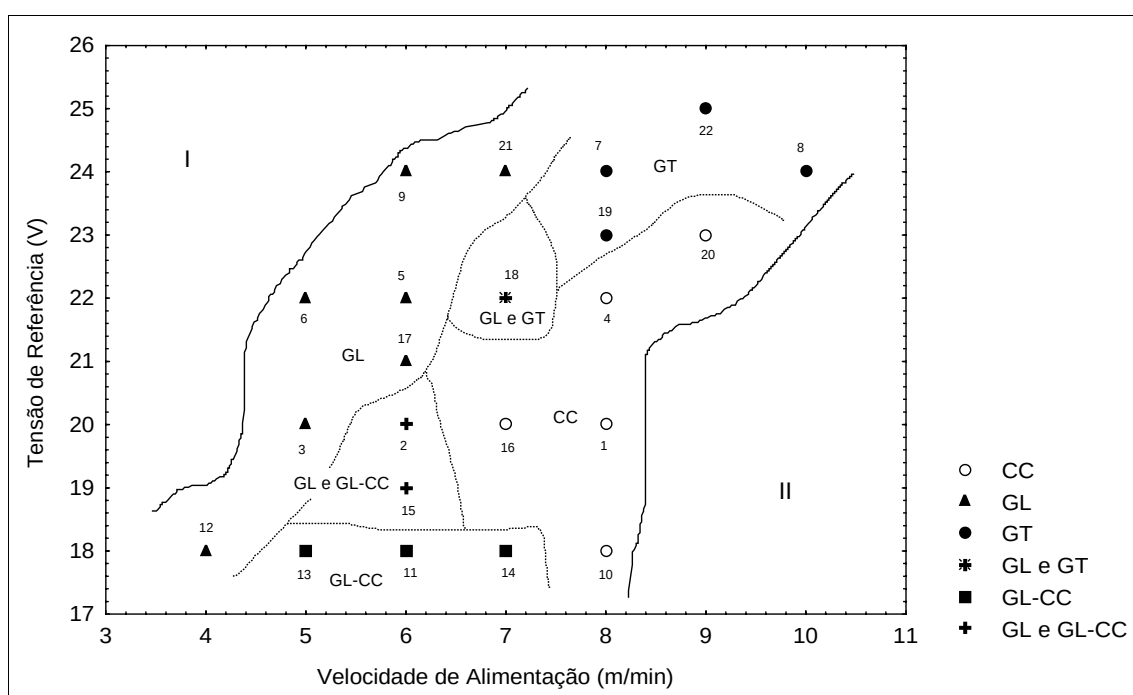


Figura 4.16 – Mapa velocidade de alimentação do arame eletrodo “versus” tensão de referência, utilizando eletrodo de 1,2 mm e gás argônio comercialmente puro.

A Figura 4.17 mostra relação entre os comprimentos médios de arco medidos com as respectivas correntes médias lidas. Não foi verificado grande variação de comprimento médio de arco quando comparado com a Figura 4.11 (diâmetro de 1,0 mm). Porém ocorre mudança a nível de corrente média. As correntes para o modo goticular oscilaram entre 153 A e 254 A quando se usou eletrodo de 1,0 mm, e entre 168 e 227 A para o eletrodo de 1,2 mm (Tabelas 4.1 e 4.3), mostrando que houve um aumento na corrente mínima e uma diminuição na corrente máxima, indicando uma concentração quanto à corrente.

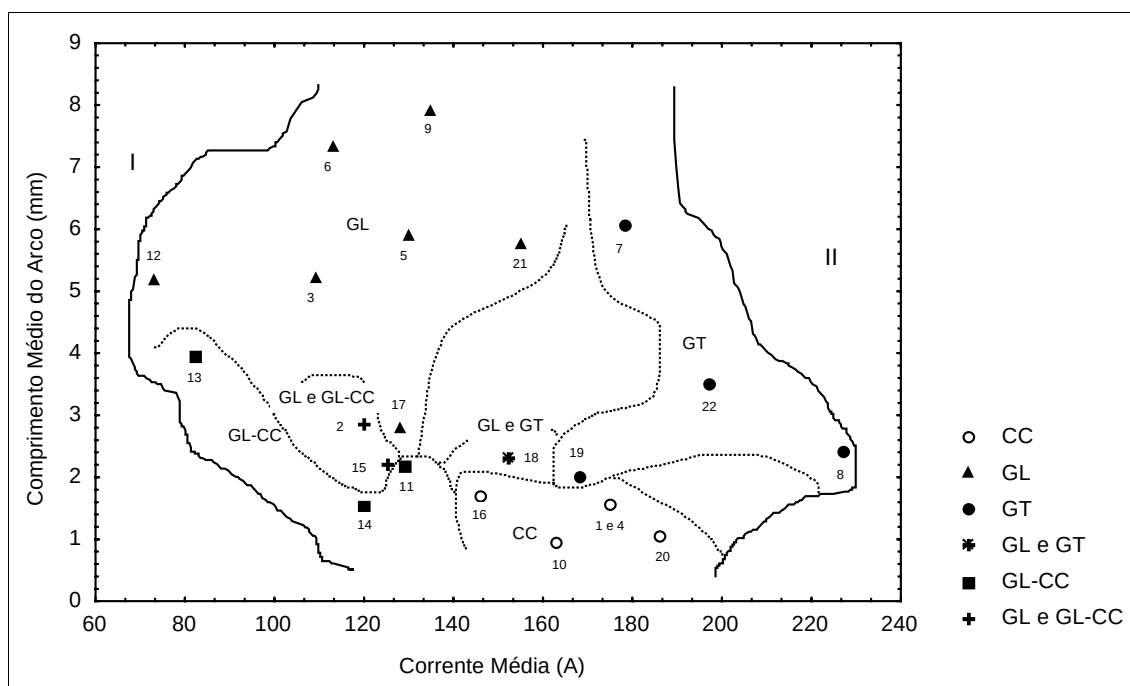


Figura 4.17 – Mapa corrente média “versus” comprimento médio do arco, utilizando eletrodo de 1,2 mm e gás argônio comercialmente puro.

No modo globular, a corrente na Figura 4.11 variou de 128 a 144 A, e na Figura 4.17 oscilou entre 73 e 155 A, mostrando que houve uma ampliação na faixa de corrente, com uma queda na mínima e uma elevação na máxima, o que pode ser confirmado nas Tabelas 4.1 e 4.3.

No modo curto-circuito, a faixa de corrente para eletrodo de 1,0 mm oscilou entre 126 A e 194 A, e para o eletrodo de 1,2 mm ficou entre 146 A e 186 A, apresentando um estreitamento na região com um aumento na corrente mínima e uma diminuição na corrente máxima, o que pode ser constatado nas Tabelas 4.1 e 4.3.

No modo de transferência globular/curto-circuito, a corrente, variou entre 69 A e 125 A para o eletrodo de 1,0 mm, e entre 82 A e 129 A para o eletrodo de 1,2 mm, com uma elevação da corrente mínima, mostrando um estreitamento da região em relação à corrente, podendo ser verificado nas Tabelas 4.1 e 4.3.

Wainer et. al. (1992) mostram que quando se aumenta o diâmetro do eletrodo, para a mesma velocidade de alimentação, tem-se um aumento da taxa de fusão e, conseqüentemente, da corrente, porém com frequência de deposição menor. Esta observação também foi verificada neste trabalho, isto é, com o aumento do diâmetro do eletrodo ocorreu um aumento da faixa do modo de transferência globular (Figuras 4.10 e 4.16), pois, apesar da taxa de fusão ser mais alta, o diâmetro do eletrodo é maior e tem, portanto, uma maior massa a ser fundida. Com isso, para as mesmas condições, o processo gera gotas grandes, levando

à transferência globular ou aproxima-se da peça de trabalho, provocando como consequência, uma diminuição no comprimento do arco, gerando uma transferência por curto-circuito.

Na Figura 4.18, que mostra o gráfico da frequência com a corrente média para os testes que apresentaram o modo goticular e globular, verifica-se que a frequência de transferência da gota na faixa de transição, está entre 135 e 164 Hertz, mostrando que houve uma diminuição em relação ao Item 4.1 (148 a 182 Hz), isto é explicado pela diminuição na densidade de corrente, o que implicaria em mais tempo para a formação da gota, com consequente diminuição na frequência de transferência da mesma.

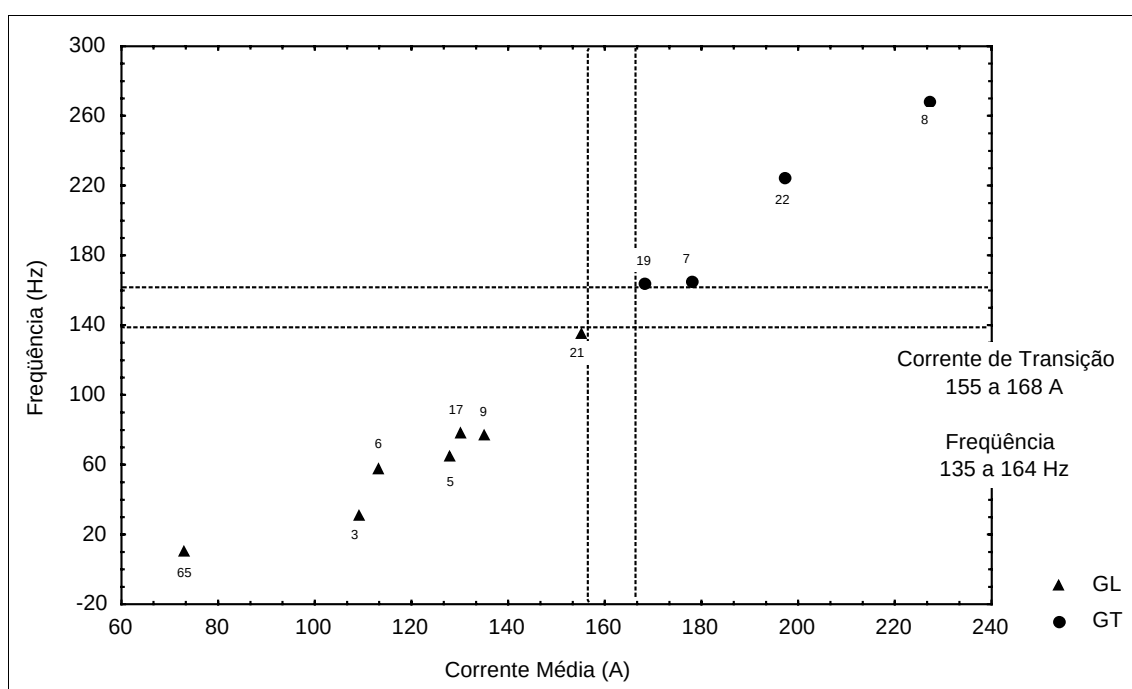


Figura 4.18 - Mapa corrente média “versus” frequência de deposição da gota, utilizando eletrodo de 1,2 mm e gás argônio comercialmente puro

Verifica-se na Figura 4.18 que a corrente de transição está entre 155 e 168 A, mostrando que houve um crescimento dos limites da mesma, com um aumento do intervalo entre o limite inferior e o superior em relação ao Item 4.1 (144 e 153 A). Isto talvez, pode ser explicado pelo fato da necessidade de se ter uma maior densidade de corrente, para que o arco possa atingir a temperatura necessária para que a fusão do eletrodo ocorra em um tempo mais rápido, a fim de se obter gotas menores e com frequências de deposição maiores, com algumas características do modo de transferência goticular.

É importante notar nas Figuras 4.12, 4.15 e 4.18 que não há uma relação direta de inclinação entre a corrente média e a frequência de deposição de gotas, como algumas vezes é sugerido na literatura corrente, de forma a poder definir a corrente de transição

globular/goticular, pelo menos para a liga de alumínio e condições de soldagem estudada neste trabalho. Esta mesma observação foi verificada no trabalho de Scotti et. al. (1999) para o aço inoxidável.

CAPÍTULO V

Conclusões

De acordo com os resultados encontrados neste trabalho, têm-se as seguintes conclusões:

- Para as 3 condições estudadas foram encontrados 4 modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio, que são: curto-circuito, globular, goticular e globular/curto-circuito.
- Foram encontradas regiões onde não foi possível realizar soldagens, ou porque o arco crescia muito chegando a queimar o bico ou a soldagem era altamente instável, chegando inclusive a apagar o arco.
- Foram encontradas regiões e pontos de soldagem onde ocorreram modos de transição de transferência metálica, isto é, uma mistura de transferência ocorrendo de forma aleatória para a mesma condição de soldagem.
- No modo de transferência goticular não se conseguiu gotas com diâmetro médio menor do que o diâmetro do eletrodo, como é definido na literatura, para as condições de teste analisada neste trabalho.
- O modo de transferência por curto-circuito, para todas as condições, foi altamente instável, ocorrendo repulsão da gota e também foi verificado uma grande quantidade de respingos sendo gerados.

Complementando, conclui-se que:

- Com a mudança de gás de proteção de argônio comercialmente puro para argônio com 25% de hélio:

- A região de transferência globular aumentou tanto em termos de velocidade de alimentação do arame eletrodo (corrente de soldagem) como em termos de tensão média de soldagem.
 - No modo goticular ocorreu somente um deslocamento da região para maiores velocidade de alimentação (corrente de soldagem). Não foi verificado nenhum aumento na tensão média de soldagem.
 - Para os modos de transferência curto-circuito e globular/curto-circuito foi encontrado apenas um ponto de cada, não podendo chegar a conclusões concretas.
 - Verificou-se um aumento na corrente de transição e na frequência da gota na faixa de transição de globular para goticular.
 - Não foi verificado mudanças significativas tanto no modo globular como no goticular para o comprimento de arco.
- Com a mudança do diâmetro do eletrodo de 1,0 mm para 1,2 mm:
 - Ocorreu um aumento na região de modo de transferência globular, ou seja, atingiu-se uma faixa de corrente maior dentro do mapa de transferência.
 - Verificou-se um aumento na corrente de transição e uma queda na frequência de gota para a faixa de transição de globular para goticular.
 - Não foi verificado mudanças significativas no comprimento de arco para os modos de transferência obtidos.

CAPÍTULO VI

Proposta Para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, com o intuito de poder aprimorar e complementar as informações obtidas neste trabalho.

- Determinar as regiões dos modos de transferência metálica de ligas de alumínio com variação no tipo de chanfro (tendo como objetivo principal uma aproximação da realidade encontrada nas indústrias);
- Estudar o efeito da distância bico de contato peça (DBCP) e posição de soldagem sobre as regiões dos modos de transferência metálica do alumínio;
- Construir mapas de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio tendo como gás de proteção misturas de Argônio e porcentagem de Hélio superior ao estudado neste trabalho e também com Hélio puro;
- Estudar o efeito da indutância da fonte na transferência metálica por curto-circuito visando a redução de respingo e o efeito da repulsão da gota no momento de contato gota - poça de fusão;
- Fazer experimentos com velocidades de alimentação maiores do que foram conseguidas neste trabalho visando obter mapas, se possível, de transferência metálica do tipo goticular/axial e goticular com alongamento.

CAPÍTULO VII

Referências Bibliográficas

Alcan, 1993, Manual de Soldagem, Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1^a Edição.

Altshuller, B., 1998, "A Guide to GMA Welding of Aluminum", Welding Journal, volume 77, nº 6, June, pp. 49-55,

AWS, 1987, Welding Handbook, volume 1, Welding Technology, American Welding Society, 8^a edição, USA.

AWS, 1991, Welding Handbook, volume 2, Welding Processes, American Welding Society, 8^a edição, USA.

AWS, 1996, Welding Handbook, volume 3, Materials and Applications – Part 1, American Welding Society, 8^a edição, USA.

Biloni, H., Pérez, T.E., Saggese, M.E. & Solari, M.J.A., 1981, "Manual de Soldadura de Aluminio", Proyecto Especial de Aluminio OEA – CNEA, Gerencia de Investigacion y Desarrollo, Aluar Aluminio Argentino, Buenos Aires, Argentina.

Blewett, R.V., 1982, "Técnicas Modernas para Soldagem do Alumínio", ALCAN, Rio de Janeiro, Brasil.

Cunha, J.A.R. e Grundmann, J., 1995, "A Influência dos Gases de Proteção nos Regimes de Transferência Metálica em Soldagem SAMG", In: Anais do XXI ENTS, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, pp. 513-527.

Dillenbeck, V.R. & Castagno, L., 1987, "The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel", Welding Journal, September, pp. 45-49.

Lucas, W., 1992, "Choosing a Shielding Gas – part 2", *Welding and Metal Fabrication*, July, pp. 269-276.

Lyttle, K.A. and Stapon, W.F.G., 1990, "Select the Best Shielding Gas Blend for the Application", *Welding Journal*, November, pp. 21-27.

Marques, P.V., 1991, "Tecnologia da Soldagem", Editora "O Lutador", Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Miranda, H.C., 1999, "Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG", Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1999. (Tese, Mestrado).

Miranda, H.C. e Ferraresi, V.A., 1999, "Proposta de Controle Automático da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG", In: *Anais do III Seminário do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Uberlândia, 08 a 12 de Novembro de 1999, pp. 53-56.

Norrish, J. & Richardson, I. F., 1988, "Metal Transfer Mechanisms", *Welding & Metal Fabrication*, pp 17-22.

Okumura, T. & Taniguchi, C., 1982, "Engenharia de Soldagem e Aplicações", LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

Pierre, E.R., 1987, "Shielding Gases for Welding", *Welding Design & Fabrication*, March, pp. 63-65,

Póvoa, A.A., 1988, "Seminário Técnico de Soldagem do Alumínio e suas Ligas", Associação Brasileira do Alumínio, 26/10 a 17/11.

Reis, R.A., 1996, "Determinação de Parâmetros de Soldagem TIG com Arame Frio e Onda Retangular", Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1996. (Tese, Mestrado).

Rhee, S. & Kannatey-Asibu Jr., E., 1991, "Observation of Metal Transfer During Gas Metal Arc Welding", Conf. On Welding and Joining Processes, ASME, Atlanta, Georgia, Dec., pp. 203-213.

Saunders, H.L., 1989, "Welding Aluminum: Theory and Practice", Chapter 1-9, 1ª edição, The Aluminum Association.

Scotti, A., 1998a, "A Review on Special Metal Transfer Modes in GMAW", RBCM – J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, vol. XX, nº 3 September, pp. 465-478.

Scotti, A., 1998b, "Report of Américo Scotti's Activities at the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory", Relatório Técnico LAPROSOLDA/UFU nº 01/98, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

Scotti, A., Clark, D.E. e Kenney, K., 1999, "Mapeamento da Transferência Metálica em MIG com Aço Inoxidável", In: Anais do VI Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, 04 e 05 de maio, São Paulo, Brasil.

Stenbacka, N. and Persson, K.-A., 1989, "Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, AWS, November, pp 41-47.

Vilarinho, L.O., 2000, "Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem Sinérgica de Alumínio", Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2000. (Tese, Mestrado).

Wainer, E., Brandi, S.D., Melo, F.D.H., et. al., 1992, "Soldagem: Processos e Metalurgia", Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, Brasil.

Weingaertner, W.L. & Schroeter, R.B., 1991, "Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas", Alcan Alumínio do Brasil S.A.

Young, B., 1995, "Shielding and Purging Gases: Making the Right Selection", Welding Journal, pp. 47-49, January.