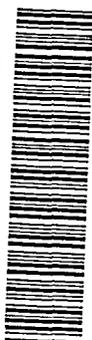


MOU
421
06970
TEC/MEM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM ALGORITMO
ALTERNATIVO PARA SOLDAGEM MIG SINÉRGICA DE ALUMÍNIO**

DIRBI/UFU



1000189876

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de Uberlândia por:

LOURIEL OLIVEIRA VILARINHO

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

Banca examinadora:

Prof. PhD. Américo Scotti - (UFU) - Orientador

Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi - (UFU)

Prof. Dr. Vladimir Ponomarev - (Professor visitante - FAPEMIG)

Uberlândia, 01 de Fevereiro de 2000.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila 2160 Campus Santa Mônica Uberlândia - MG 38408-100
Fone: 0342394149- FAX: 034 2394282

ALUNO: Louriel Oliveira Vilarinho

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5981606-3

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

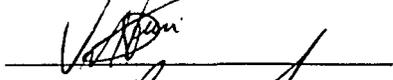
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para a Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio

ORIENTADOR: Prof. Dr. Américo Scotti

A Dissertação foi APROVADA em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1X do Campus Santa Mônica, em 1º de fevereiro de 2000, as 14 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Américo Scotti, Prof. Dr.	
Valtair Antonio Ferraresi, Prof. Dr.	
Vladimir Ponomarev, Dr.	

Uberlândia, 1º de fevereiro de 2000.

À Deus.
À minha namorada Cícilia.
Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Américo Scotti, pela orientação, não somente no mestrado, mas durante a graduação e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao professor Valtair Antônio Ferraresi, pelas sugestões e amizade.

Ao doutorando Paulo S. S. Bálamo, pela oportunidade de desenvolver em conjunto as idéias e técnicas apresentadas na dissertação.

A todos os integrantes do LAPROSOLDA, em especial ao Admilson e ao Kléber, que me ajudaram durante a realização dos testes, ao André, Hélio e Warley, pelo companheirismo e ao Márcio pelo desenvolvimento de toda a parte eletrônica contida neste trabalho.

A todos os membros da oficina mecânica, em especial ao Lázaro.

Ao apoio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU.

Aos professores, funcionários e companheiros de trabalho, que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao LAPROSOLDA, pelo suporte físico concedido.

À CAPES, pelo fornecimento de bolsa de mestrado.

Ao Programa PADCT III, pelos recursos financeiros.

À White Martins, pelo fornecimento de gás de proteção.

SUMÁRIO

Lista de abreviaturas e símbolos	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
I. Introdução	01
II. Revisão Bibliográfica	04
2.1 A soldagem MIG de alumínio	04
2.1.1 Características	04
2.1.2 Equipamentos e técnicas	04
2.1.3 Consumíveis	06
2.2 Transferência metálica	07
2.2.1 Tipos e características	07
2.2.2 Formas de identificação do modo de transferência e do instante de destacamento	11
2.3 O processo MIG pulsado	19
2.3.1 Características e premissas do processo	21
2.3.2 Influência das principais variáveis	27
2.4 Critérios e modelos para o MIG pulsado	31
2.4.1 Critério da taxa de fusão	31
2.4.2 Critério de destacamento ou da energia do processo	38
2.4.3 Condição para a estabilidade do arco	44
2.4.4 Novos modelos e relações	45
2.5 O MIG sinérgico	47
III. Equipamentos e metodologia experimental	54
3.1 Equipamentos utilizados	54
3.1.1 Fonte de soldagem	54
3.1.2 Sistema laser-óptico	55
3.1.3 Sistema de gravação das imagens	57
3.1.4 Sistema de aquisição e sincronização de imagem e sinais elétricos	57
3.2 Programas computacionais utilizados e desenvolvidos	59
3.3 Consumíveis	62
3.4 Sistema de fixação e translação da placa de teste	64
3.5 Planejamento experimental	65
IV. Testes preliminares	70
4.1 Calibração das velocidades de soldagem e de alimentação	70

4.2 Característica estática da fonte	71
4.3 Rampa de velocidade de alimentação	72
4.4 Verificação do sincronismo	75
V. Resultados e discussões	77
5.1 Determinação da corrente de transição	77
5.2 Mapeamento da região de UGPP	82
5.3 Influência de I_b e t_b e avaliação do programa " <i>sinergico</i> "	98
VI. Conclusões	104
VII. Propostas para trabalhos futuros	105
VIII. Referências bibliográficas	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

α	Constante da equação de consumo [$m \cdot s^{-1} \cdot A^{-1}$]
β	Constante da equação de consumo [$A^{-2} \cdot s^{-1}$]
ϕ	Fator definido por Ghosh (1995)
λ_1 e λ_2	Constantes exponenciais do formato de onda exponencial
CT	Ciclo de trabalho [%]
D	Constante de destacamento [$A^n \cdot ms$]
d_e	Diâmetro do eletrodo [mm]
d_g	Diâmetro da gota [mm]
F	Freqüência de pulsação da corrente [Hz]
F_{gotas}	Freqüência de destacamento das gotas [Hz]
I_b	Corrente de base [A]
I_{ef}	Corrente efetiva [A]
I_m	Corrente média [A]
I_{m_ret}	Corrente média calculada pela forma de onda retangular [A]
I_{m_trap}	Corrente média calculada pela forma de onda trapezoidal [A]
I_{m_exp}	Corrente média calculada pela forma de onda exponencial [A]
I_m	Corrente média [A]
I_p	Corrente de pico [A]
ℓ	Comprimento do eletrodo [mm]
ℓ_a	Comprimento do arco [mm]
n	Constante do critério de destacamento
T	Período de pulsação da corrente [ms]
TF	Taxa de fusão
t_b	Tempo de base [ms]
t_p	Tempo de pico [ms]
t_1, t_2 e t_3	Tempos que definem o formato de onda trapezoidal
V_{alim}	Velocidade de alimentação [m/min]
$V_{a_ret_linear}$	Velocidade de alimentação calculada pelo modelo linear retangular [m/min]
$V_{a_ret_nlin}$	Velocidade de alimentação calculada pelo modelo não linear retangular [m/min]
V_{a_trap}	Velocidade de alimentação calculada pelo modelo trapezoidal [m/min]
V_{a_exp}	Velocidade de alimentação calculada pelo modelo exponencial [m/min]
V_{ol_gota}	Volume da gota [mm ³]
V_{sold}	Velocidade de soldagem [cm/min]

U_b	Tensão de base [V]
U_{ef}	Tensão efetiva [V]
U_m	Tensão de média [V]
U_p	Tensão de pico [V]
U_{ref}	Tensão de referência [V]
UGPP	Uma gota por pulso

VILARINHO, L.O., 2000, "Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

RESUMO

Embora o processo MIG pulsado tenha superado limitações do processo MIG convencional, principalmente quanto ao controle da transferência, a seleção das variáveis torna-se um sério obstáculo para sua utilização. O comando sinérgico surgiu como uma forma de superar este obstáculo por determinar as variáveis do processo automaticamente, baseando-se na premissa principal de que a estabilidade do arco está condicionada ao destacamento de uma única gota com diâmetro próximo ao eletrodo em cada pulso (UGPP). Os comandos sinérgicos comerciais desprezam o efeito dos parâmetros de base sobre a formação da gota, além de simplificar os cálculos por adotar modelos lineares. Como consequência destas simplificações, os algoritmos destes comandos sinérgicos podem levar à imprecisão do ajuste de parâmetros e a não satisfazer a premissa principal. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar um novo algoritmo que adote cálculos mais realistas e verificar qual a influência dos parâmetros de pulso, calculados pelo novo algoritmo, sobre as condições de UGPP. Objetiva-se, também, aplicar uma nova técnica de visualização e quantificação de transferência metálica, denominada de Shadowgrafia Sincronizada.

Para tal, foi inicialmente determinada a região de UGPP, para uma dada condição de base fixa, utilizando-se uma fonte de soldagem eletrônica, um sistema de aquisição de dados para monitorar tensão e corrente e o sistema de Shadowgrafia Sincronizada, composto de uma fonte de laser, componentes ópticos, uma câmera de vídeo de alta velocidade e uma interface para sincronizar os sinais de corrente e tensão com as imagens da câmera. Após a determinação da região de UGPP, variou-se os parâmetros de base, fixando-se os parâmetros de pico, de forma a verificar se o modo de destacamento ao fim do pulso se alterava.

Conclui-se que através da técnica de Shadowgrafia Sincronizada consegue-se obter com grande precisão a região de UGPP e que esta região não é afetada pelos parâmetros de base. Assim, a princípio, tanto os comandos sinérgicos comerciais, quanto o próprio algoritmo sinérgico proposto poderiam ser utilizados. Entretanto, este último apresenta uma grande vantagem por calcular com maior precisão os parâmetros de pulso e a velocidade de alimentação, de forma a se obter um comprimento de arco desejado e propiciar um diâmetro da gota próximo ao diâmetro do eletrodo.

Palavras-chave: Soldagem MIG pulsado, Comando Sinérgico, Alumínio, Shadowgrafia

VILARINHO, L.O., 2000, "Development and Assessment of an Alternative Algorithm for Aluminum Synergic GMAW ", M. Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

ABSTRACT

Although the pulsed GMAW allows overcoming limitations of the metal transfer in the conventional GMAW, the pulse parameter selection remains still a serious obstacle hindering its wide utilization. The synergic "command" helps to solve this problem due to an automatic determination of process variables. The algorithm of the conventional synergic command is based on the main premise that a stable arc is conditioned to only one droplet per pulse (ODPP). To simplify calculus, this commercial synergic command uses linear models which ignore any influence of the electrical parameters at the base period (base current and its duration) on the droplet formation. As a consequence of such simplifications, synergic command algorithms might conduct to wrong values of preset parameters and to not satisfy the main premise. The main objective of this work was to develop and assess a new synergic command algorithm that adopts more realistic calculus of the pulse parameters. It is aimed also to verify the influence of the pulse parameters on the ODPP conditions. Another objective was to determine possibilities and limitations of a new technique of visualization and measuring regarding metal transfer phenomenon, which is called Synchronized Shadowgraph method.

In order to fulfil these tasks, primarily the ODPP conditions for base fixed parameters were determined. This was done using an electronic power supply, a data acquisition system (for welding current and arc voltage signals) and a Synchronized Shadowgraph system, consisting of a laser beam head, optics components, a high speed video camera and an interface unit to synchronize the current and voltage signals with the camera images. After the ODPP conditions had been determined, the base current parameters were altered, keeping the same peak current parameters, in order to verify whether the time point of the droplet detachment at the end of the current pulse was being shifted.

It has been established that the ODPP region can be accurately determined by Synchronized Shadowgraph technique and the base current parameters did not seriously affect the ODPP conditions. Thus, by principle, both the commercial synergic command and the proposed one could be used. However, the new algorithm has a great advantage; it guarantees more precise calculation of the pulse parameters and the wire feed speed rate, leading to an arc length closer to the desired one and it provides formation of droplets of a size closer to the electrode diameter.

Keywords: *Pulsed GMAW, Synergic Welding, Aluminum, Shadowgraph Technique*

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Apesar da grande utilização do processo MIG/MAG, este possui limitações quanto ao controle da transferência metálica (Collard, 1988 e Allum, 1985). Estas limitações têm sido superadas com o advento da tecnologia do arco pulsado, em estudo desde 1962 (Kim & Eagar, 1993), e mais recentemente com a incorporação de sistemas sinérgicos nas fontes de soldagem que procuram selecionar adequadamente as variáveis do processo. A importância do estudo do processo pulsado pode ser ressaltada quando se utiliza materiais como o alumínio que, além de ser o elemento mais abundante na crosta terrestre, é, hoje, o segundo metal mais utilizado.

Entretanto, com a introdução do MIG pulsado houve a necessidade do ajuste de novas variáveis do processo, além daquelas já existentes no MIG convencional. Não é possível arbitrar valores para estas variáveis, pois para cada condição de soldagem (material de base, material e diâmetro de eletrodo, tipo de gás, ...) existe uma combinação mais efetiva (Norrish, 1992). Assim, torna-se necessário criar procedimentos de cálculo e seleção, para se determinar os valores de tais variáveis que, segundo determinados critérios, irão proporcionar uma correta utilização do processo MIG pulsado.

Existem procedimentos (Scotti, 1991; Dutra, 1989 e Fujimura et al, 1987) e recomendações (Grubic & Andric, 1995 e Norrish, 1992) disponíveis, que buscam calcular e selecionar os parâmetros de pulso da onda (corrente pico, tempo de pico, corrente de base e tempo de base) em função de algumas variáveis (diâmetro do eletrodo, material de base e gás de proteção). A premissa mais utilizada por esses autores, visando a obtenção de soldas de melhor qualidade, é o de uma gota com diâmetro igual ao diâmetro do eletrodo por pulso, onde ignora-se o efeito dos parâmetros de base. Esta suposição é constantemente citada na literatura, não existindo relatos de sua comprovação. Para identificar o instante onde há o destacamento e o número de destacamentos, a principal técnica utilizada é a análise dos oscilogramas de tensão. Entretanto, esta técnica é limitada a fontes transistorizadas analógicas, que devido ao seu baixo rendimento elétrico não são utilizadas na prática. Outras técnicas procuram sincronizar imagens de filmagem a alta velocidade das gotas em transferência, com os oscilogramas de tensão e corrente.

Estes procedimentos e recomendações calculam algumas variáveis (corrente e tempo de base e velocidade de alimentação, por exemplo) a partir de equações oriundas de modelos que buscam representar o fenômeno. Estas equações, por sua vez, necessitam de valores de

outras variáveis (corrente e tempo de pico por exemplo), que são conseguidos a partir da seleção de valores práticos (obtidos experimentalmente) em banco de dados. Estes bancos de dados retratam o empirismo que existe nestes procedimentos. Assim, a necessidade de recorrer a tabelas (banco de dados) e efetuar cálculos individualmente, torna estes procedimentos de cálculo e seleção muito pouco amigáveis ao operador.

Uma solução é a informatização destes procedimentos, através da elaboração de um algoritmo que contenha o procedimento de cálculo e seleção e o banco de dados. Assim, surgiu o comando sinérgico, que segundo Norrish (1992) é definido como “qualquer sistema pelo qual um parâmetro de pulso significativo é modificado tal que uma condição de equilíbrio é mantida sobre uma faixa de velocidade de alimentação (ou níveis médios de corrente)”.

Já existem no mercado, desde a década de 80, fontes que apresentam o comando sinérgico nos seus circuitos. Entretanto, o comando sinérgico empregado nestas fontes apresentam dois grandes problemas (Bálsamo et al, 1999). O primeiro problema é a simplificação do algoritmo de cálculo e seleção de parâmetros que emprega equações lineares para descrever o fenômeno. O segundo problema é a simplificação da forma de onda, onde considera-se uma onda perfeitamente retangular.

Aprimoramentos no comando do MIG pulsado vêm sendo estudados no LAPROSOLDA com a concepção de novos algoritmos de cálculo e seleção (Vilarinho et al, 1996) e com a implementação de novas rotinas para aços inoxidáveis, que levam em consideração as características da fonte (Bálsamo et al, 1999). Assim, é proposta deste trabalho a continuação desta linha de pesquisa, através da adaptação e avaliação do comando sinérgico ora em desenvolvimento para a soldagem de alumínio, superando as particularidades que este metal possa apresentar.

Desta forma, propõe-se como objetivo principal desta dissertação o seguinte:

- Desenvolver e avaliar um novo algoritmo sinérgico aplicado à soldagem MIG pulsado de alumínio, que calcule os parâmetros de base para verificar a sua influência no modo de destacamento e, assim, contribuir para o entendimento e aprimoramento do comando sinérgico, além de gerar um banco de dados para a sua utilização.

Para se atingir este objetivo principal, deve-se alcançar os seguintes objetivos intermediários:

- Aplicar e avaliar a nova técnica de visualização de transferência metálica, em desenvolvimento no LAPROSOLDA, para identificar o instante do destacamento, geometria da gota e comprimento do arco;
- Desenvolver um programa computacional que possibilite correlacionar a imagem obtida com os dados dos oscilogramas de tensão e corrente;
- Definir a região de uma gota por pulso (UGPP) utilizando-se a técnica e o programa

acima mencionados.

Para apresentar este estudo, a dissertação foi dividida em oito capítulos, iniciando com este Capítulo 1, que procura traçar um breve estado da arte do problema, estabelecendo a motivação, os objetivos e limites para o trabalho proposto.

O Capítulo 2 consiste da revisão bibliográfica que fornece os fundamentos do processo pulsado e comando sinérgico, além de apresentar as técnicas para analisar o instante do destacamento.

No Capítulo 3 são apresentados os equipamentos e a metodologia experimental, bem como todo o procedimento de montagem da bancada experimental, execução das soldas e metodologia da análise dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta e discute as calibrações efetuadas e os testes exploratórios executados para dar suporte ao desenvolvimento da dissertação.

O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos, comparando-os com outros autores.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho.

O Capítulo 7 traz as propostas para a realização de trabalhos futuros que complementem os conhecimentos obtidos e contribuam para o desenvolvimento do processo MIG pulsado.

O Capítulo 8 apresenta a lista das referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A soldagem MIG de alumínio

O termo *Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa* (SAMG), em inglês GMAW, é adotado para designar o processo de soldagem por fusão onde o arco, protegido por um fluxo de gás, é mantido entre um eletrodo consumível, alimentado continuamente, e a peça de trabalho. Este processo também recebe a denominação de MIG/MAG. O termo MIG (*Metal Inert Gas*) é empregado quando a proteção gasosa utilizada é composta por gases inertes (Ar, He ou mistura destes). Já o termo MAG (*Metal Active Gas*) é utilizado quando na composição do gás de proteção existem gases que reagem com o metal fundente e a poça (Ar+CO₂, Ar+CO₂+O₂). No caso de soldagem de materiais reativos, como é o caso do alumínio, o processo é comumente referenciado apenas por MIG. Sendo assim, desde ponto em diante, será referenciada a soldagem do alumínio por este processo, apenas como *soldagem MIG de alumínio*, que é o processo mais utilizado para a soldagem deste material (Altshuller, 1998).

2.1.1 Características

A soldagem MIG de alumínio e suas ligas opera normalmente em corrente contínua com eletrodo positivo (polaridade inversa), podendo ser semi-automática (alimentação automática e deslocamento manual da tocha) ou automática (ambos movimentos automáticos). Devido às altas velocidades de soldagem possíveis (50 a 100 cm/min), o processo MIG automatizado é o mais empregado industrialmente. (Alcan, 1993, Póvoa, 1988 e Biloni et al, 1981).

Outra característica muito importante da soldagem MIG é o uso de densidades de corrente extremamente elevadas, devido à pequena resistência elétrica existente (pequeno comprimento do eletrodo). Essas altas densidades de corrente, somadas a uma transferência de calor muito eficiente, resulta em velocidades de soldagem altas, além de proporcionar uma maior penetração.

2.1.2 Equipamentos e técnicas

Os equipamentos básicos para qualquer instalação que utilize o processo MIG são os seguintes (Altshuller, 1998, Alcan, 1993 e AWS, 1991):

- Uma fonte de potência de corrente contínua com característica estática apropriada para a soldagem MIG;

- Um sistema de alimentação de eletrodo;
- Uma pistola;
- Um suprimento de gás de proteção com regulador de pressão e fluxímetro;
- Um sistema de refrigeração de água, quando necessário.

Com relação à característica estática da fonte de potência, deve-se analisar as vantagens e desvantagens das fontes tensão constante e corrente constante.

A principal vantagem da fonte tensão constante é a prevenção de queimas no bico de contato, a manutenção de um comprimento de arco aproximadamente constante e uma abertura facilitada do arco. Todavia, estas fontes têm sérias desvantagens com relação à soldagem MIG de alumínio. A principal delas é que, como a corrente passa a ser uma consequência da velocidade de alimentação, qualquer variação na distância entre o eletrodo e a peça resulta numa oscilação da corrente de soldagem. Isto altera o aporte térmico do arco e a pressão do arco e, conseqüentemente, a penetração da solda (Liu, 1997).

Já a principal vantagem da fonte corrente constante é que mantendo-se a corrente em torno de um valor, mesmo havendo flutuações na velocidade de alimentação, obtém-se uma penetração uniforme. Sua grande desvantagem é a necessidade da existência de um controle externo para iniciar o arco e mantê-lo estável (comprimento constante), proporcionando, assim, largura do cordão também constante.

Quanto ao alimentador de arame, normalmente se utiliza o tipo extrator ou então o tipo impulsor-extrator ("*push-pull*"), quando a velocidade é crítica (Okumura & Taniguchi, 1982). Arames de pequeno diâmetro também apresentam problemas de alimentação, pois tendem a dobrar-se facilmente, quando se utiliza o alimentador do tipo impulsor, normalmente empregado para outros materiais.

O início do processo se caracteriza pela abertura do arco, que é diferente para fontes tensão constante e corrente constante. Na fontes tensão constante, a abertura do arco é simples e segura, visto que a sua corrente de curto circuito é muito elevada; mesmo quando o eletrodo toca a peça com velocidade de soldagem plena, o arco se inicia sem grandes dificuldades (Altshuller, 1998 e Alcan, 1993).

Já nas fontes corrente constante, como não há um aumento da corrente durante o curto, o eletrodo não pode avançar à velocidade plena e, conseqüentemente, o alimentador deve possuir um controle eletrônico capaz de fornecer uma velocidade de arame lenta no início ("*slow-run-in*") para facilitar a abertura do arco e, depois, passar rapidamente para a velocidade de eletrodo plena, tão logo o arco tenha sido estabelecido (Alcan, 1993).

Uma vez o arco tenha sido iniciado, a tocha deve ser conduzida mantendo-se uma distância bico de contato peça entre 12 e 15 mm, devendo ser inclinada no sentido do

deslocamento (soldagem empurrando) num ângulo de 5 a 15° com a vertical, de forma a promover a ação de limpeza da camada de óxido à frente da poça, melhorando a molhabilidade e reduzindo a oxidação do metal de base (Altshuller, 1998; AWS, 1996 e Alcan, 1993). Convém lembrar que estes autores apenas citam este procedimento, não comprovando-o experimentalmente.

Para finalizar, a tocha deve ser conduzida empregando-se elevadas velocidades de soldagem, onde velocidades na faixa de 30 a 80 cm/min são muito comuns, podendo chegar até a 250 cm/min. No fim do cordão, deve existir um controle da interrupção do arco para prevenir a trinca de cratera (Altshuller, 1998 e Alcan, 1993).

Uma correta seleção dos equipamentos e das técnicas se torna inútil sem o acompanhamento da escolha do consumíveis necessários.

2.1.3 Consumíveis

Além do bico de contato e dos conduítes que precisam ser trocados, devido ao desgaste natural, os principais consumíveis são os gases de proteção e os eletrodos.

Segundo Jönsson et al (1995) e Pandey et al (1995), os gases de proteção constituem uma variável crítica do processo que influencia a operação da soldagem MIG/MAG. A proteção gasosa afeta diretamente a penetração da solda, o formato e a regularidade do cordão, as propriedades mecânicas da solda, a estabilidade do arco e os fenômenos de transferência metálica (próximo tópico a ser abordado). A seleção do gás a ser utilizado depende do material de base a ser soldado, do tipo de transferência metálica desejada, do diâmetro e tipo de eletrodo e da posição de soldagem.

A maioria dos gases inertes (argônio, criptônio, neônio, xenônio ou hélio) poderiam ser utilizados para fins de proteção na soldagem MIG de alumínio. Entretanto, por razões de custo, os únicos gases normalmente empregados são o argônio (Ar) e o hélio (He) ou misturas dos dois. Pandey et al (1995) refere-se também a adições de 0,2-0,5%N₂ ou 0,5-1,0%O₂ ao argônio para promover cordões de boa qualidade. Segundo Altshuller (1998); AWS (1996) e Alcan (1993), o argônio é o gás mais utilizado na soldagem MIG do alumínio.

Além da escolha do gás de proteção, a correta especificação do eletrodo de alumínio, segundo a AWS A5.10, é um ponto muito importante, visto que a economia da operação e a integridade da junta soldada dependem de certas características do arame utilizado. Assim, tanto a seleção correta do eletrodo, baseando-se em custos do processo e na suscetibilidade do cordão a trincas a quente, quanto à armazenagem da bobina, que só deve ser retirada da caixa quando for efetivamente utilizada, são pontos cruciais a serem observados com respeito a este consumível.

O modo como o metal fundente se transfere deste eletrodo para a poça determina o nível de respingos, a estabilidade do processo, a possibilidade de soldagens posicionais, a molhabilidade do metal de base, a aparência e qualidade do cordão de solda (Pandey et al, 1995 e Norrish & Richardson, 1988). Dessa forma, a transferência metálica será o objeto da discussão a seguir.

2.2 Transferência metálica

A transferência do metal em fusão, através do arco de soldagem, da ponta do eletrodo para a peça é determinada por complexas interações de forças, as quais no processo SAMG (GMAW) são influenciadas pelos seguintes fatores (Pandey et al, 1995 e AWS, 1991):

- Polaridade e tipo (contínuo ou pulsado) da corrente;
- Densidade de corrente;
- Tensão;
- Extensão do eletrodo após o contato elétrico (comprimento do eletrodo);
- Composição química e diâmetro do eletrodo;
- Distância bico de contato peça;
- Posição de soldagem;
- Tipo e vazão do gás de proteção;
- Características específicas da fonte de potência;
- Pressão do ambiente.

Existem várias formas de se efetuar a transferência metálica, que foram classificadas pelo *Instituto Internacional de Soldagem (IIW)*, baseando-se em estudos usando fotografias de alta velocidade (Stenbacka & Persson, 1989). Será realizada uma breve discussão acerca dos principais modos de transferência relacionados com a soldagem MIG de alumínio.

2.2.1 Tipos e características

A Figura 2.1 mostra de forma esquemática as formas de transferência definidas pelo IIW e citadas por Norrish & Richardson (1988). Scotti et al (1998), num trabalho mais recente, propõe denominações para modos especiais de transferência que foram observados na soldagem de aço inoxidável. Numa classificação mais simples, pode-se observar dois grupos principais: transferência por vô livre e por curto-circuito. Na transferência por vô livre os tipos mais estudados são a transferência globular e goticular, também chamada de aerossol ou pulverização axial. Como o objeto desta dissertação é o estudo do processo pulsado, a transferência controlada por arco pulsado se torna importante e, juntamente com as outras três, também será objeto de uma análise seguinte. Um outro tipo de transferência observada

recentemente na soldagem MIG de alumínio com eletrodo ER5356 (AlMg5) é descrita em Vilarinho & Scotti (1999) e definida como transferência explosiva, cuja fotografia obtida com filmagem a alta velocidade é mostrada na Figura 2.2. Este tipo de transferência deve-se ao fato da temperatura do arco superar o ponto de ebulição do magnésio e, dessa forma, o metal de adição ao passar através do arco, vaporiza-se (Alcan, 1993).

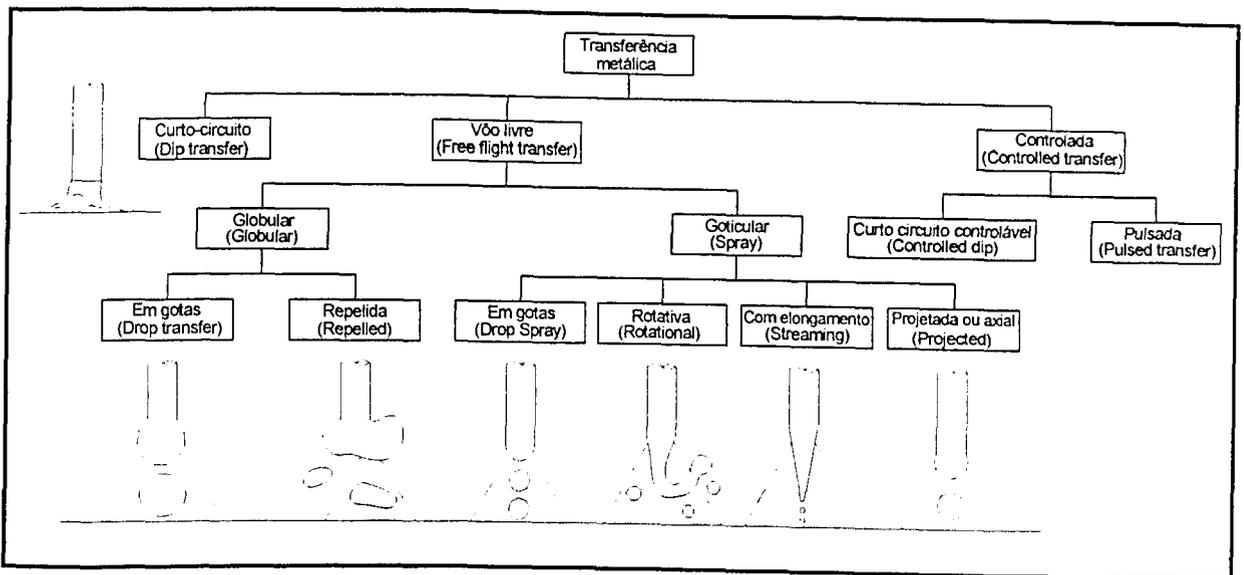


Figura 2.1 – Modos de transferência metálica.



Figura 2.2 - Fotografia de uma transferência explosiva (Vilarinho & Scotti, 1999).

Como a transferência explosiva é um caso restrito ao tipo de eletrodo, pode-se dizer que há quatro modos de transferência pelos quais o processo de soldagem MIG de alumínio pode depositar solda numa junta. São eles globular, curto-circuito, goticular e arco pulsado. Entretanto, a transferência goticular é utilizada praticamente em todas as soldagens MIG de alumínio que não incorporaram a tecnologia do arco pulsado (Póvoa, 1988).

✓ Transferência por curto-circuito

Geralmente em tensões baixas (13-23 Volts) e correntes não muito elevadas, o metal fundido pode ser induzido a se depositar no metal de base, periodicamente, pelo contato direto do eletrodo com a peça de trabalho. A cada momento de contato ocorre um curto-circuito e, por meio de uma resposta correta da fonte de energia, origina-se um impulso de corrente suficiente para separar a gotícula e restabelecer o arco. A taxa de transferência entre 20 e 200 Hz proporciona um arco com um zumbido típico.

Este processo foi desenvolvido para controlar o insumo de calor em materiais finos, mas demonstrou ser mais adequado para a soldagem de aços do que alumínio, devido a problemas de falta de fusão (AWS, 1991) e devido à necessidade do arco ser contínuo para produzir o efeito de limpeza catódica (Ostermann, 1993). Além disso, devido ao problema na obtenção de uma resposta precisa da fonte de energia para cada condição de soldagem e a baixa velocidade de soldagem, este processo é raramente empregado para o alumínio (Alcan, 1993).

✓ Transferência globular

Quando a densidade de corrente é bem inferior em relação ao tamanho do eletrodo, o efeito do estrangulamento da gotas (efeito "*pinch*") é insuficiente para separá-las do eletrodo. O glóbulo de metal fundido no eletrodo continua a aumentar de tamanho, até se separar do eletrodo sob efeito da ação da gravidade. Isto causa, como efeito, a deposição de grandes gotas e o fornecimento de baixo aporte de calor ao metal de base.

O resultado é uma solda de muito pouca penetração, que pode ser vantajosa em soldas arquitetônicas, onde o calor excessivo da soldagem pode causar "*bloom*"¹ (Póvoa, 1988). Ainda assim, a transferência globular só pode ser usada na posição plana. O arco tende a ficar instável durante a transferência do metal e as velocidades de soldagem, mesmo em material de pouca espessura, são muito baixas. Por essas razões, esse método não é utilizado para soldar ligas de alumínio (AWS, 1991).

✓ Transferência goticular

Na soldagem MIG com proteção à base de argônio e eletrodo positivo (polaridade inversa), a medida que a corrente de soldagem aumenta, o diâmetro das gotas são reduzidos lentamente até um nível determinado de corrente (corrente de transição). A densidade de corrente de transição varia com o diâmetro, tipo e comprimento do eletrodo e gás de proteção (AWS, 1991). A partir deste ponto, ocorre uma rápida redução do diâmetro das gotas e um aumento da frequência de transferência, ao mesmo tempo que o arco, antes, durante a

¹ Mudança local de aspecto numa superfície de alumínio, causada pelo calor excessivo e devido a presença de magnésio.

transferência globular, confinado à porção inferior da gota (ainda ligada ao arame), passa a envolvê-la completamente. Assim, a transferência por gotículas demanda altas correntes e altas tensões (24-40 Volts) e se caracteriza por mínimas perturbações no arco, resultando em poucos respingos e uma alta produtividade.

A forma de transição entre as transferências globular e goticular aqui apresentada, ou seja, uma forma abrupta e quase descontínua, é uma opinião clássica (AWS, 1991). Scotti (1998) mostrou para o aço inoxidável 304L que na verdade existe um modo misto de transferência na região de transição caracterizado por regimes periódicos de gotas grandes seguidas de uma enxurrada de gotinhas.

✓ Transferência com corrente pulsada

Como foi descrito, a principal limitação da utilização da transferência por goticular é a alta corrente, o que inviabiliza a soldagem de chapas finas e soldagem posicional. No caso do alumínio, devido à sua alta condutividade térmica, pode-se soldar sobre-cabeça, pois a solidificação da poça ocorre mais rápida que no aço. Mas o nicho de aplicação de chapas finas, principalmente na indústria automobilística, necessita de um processo que permita soldar em goticular, devido à grande produtividade e boa qualidade, mas que possua um nível de corrente menor, tal qual a transferência globular. Assim, surgiu a idéia da transferência pulsada (controlada), onde emprega-se uma corrente mínima (corrente de base) necessária para manter o arco aceso, promover o aquecimento do eletrodo por efeito Joule e proporcionar a limpeza catódica (Subramaniam, 1996 e Norrish, 1992), onde se sobrepõe pulsos de corrente (corrente de pulso) num valor acima da corrente de transição para que ocorra a transferência, conforme mostra a Figura 2.3. Como resultado, obtém-se uma corrente média menor do que àquela que seria usada na transferência goticular.

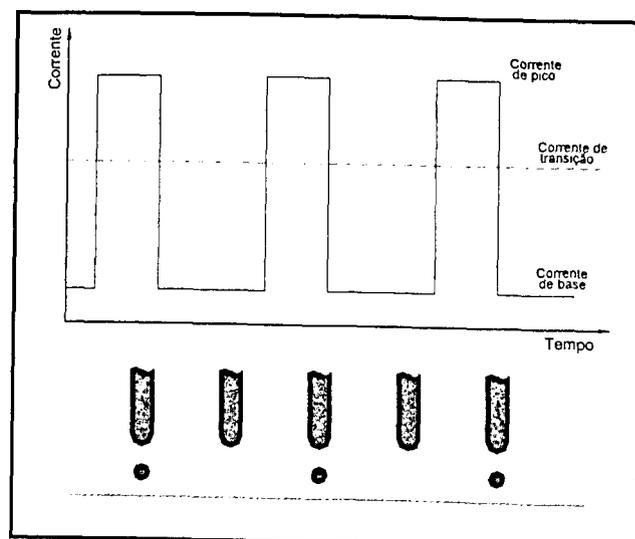


Figura 2.3 - Transferência pulsada (Norrish, 1992).

As inúmeras vantagens, características e utilização deste tipo de transferência serão descritas quando do estudo do processo MIG pulsado, também denominado internacionalmente GMAW-P (Subramaniam et al, 1998; Zhang et al, 1998; Rajasekaran et al, 1998 e Kim & Eagar, 1993b) e no Brasil, SAMGp (Carreira Neto & Brandi, 1998).

2.2.2 Formas de identificação do modo de transferência e do instante de destacamento

Os soldadores mais experientes conseguem identificar o tipo de transferência apenas através do som proveniente do arco de soldagem. Esta é a forma mais simples de identificação, juntamente com a visualização do próprio cordão. Numa forma mais científica, o método mais utilizado para se identificar o tipo de transferência e o instante de destacamento é através da análise do oscilograma de tensão. A análise de fotografias e filmagem a alta velocidade também é muito empregada. Recentemente, novos sensores baseados em ultrassom, emissão acústica e luminosidade do arco vem sendo desenvolvidos (Johnson et al, 1991).

✓ Oscilograma de tensão

Através de um osciloscópio é possível observar o formato das ondas de tensão e corrente decorrentes de um processo de soldagem, que retratam os diversos tipos de transferência. Na transferência por curto-circuito quando a gota está se formando a tensão permanece constante, indo a zero quando a gota toca a poça de fusão (fechamento do curto) e logo após o desprendimento da gota há um pico de tensão devido à reignição do arco. No caso das transferências globular e goticular, os oscilogramas caracterizam por pequenas oscilações ("ripples") devido à pequena oscilação no comprimento do arco. Heald et al (1994), investigaram a relação entre o desvio padrão da corrente de soldagem com os modos de transferência para o eletrodo ER100S-1. Foi possível concluir que o desvio padrão da corrente é uma indicação robusta dos modos de transferência metálicas, onde os maiores desvios padrões foram observados para a transferência por curto circuito (20-80 A), desvios padrões médios indicaram transferência globular (10-40 A) e pequenos desvios padrões caracterizaram a transferência goticular (menor que 10 A).

Para se detectar eletricamente o momento exato onde a gota se destaca, pode-se utilizar um osciloscópio com memória a partir da leitura do sinal de tensão (Nixon & Norrish, 1988). O destacamento gera um pequena perturbação (em torno de 0,5 Volt) no sinal da tensão (Figura 2.4), provavelmente devido ao aumento da resistência da região de estricção na gota (pescoço) antes da separação. Deve-se lembrar que a uma redução na área de um condutor dificulta a passagem de elétrons, o que implica numa maior tensão para continuar promovendo este fluxo de elétrons. Entretanto, como esta perturbação no sinal é muito

pequena e o ruído da fonte é normalmente muito maior, torna-se impossível garantir a observação do momento exato do destacamento.

Assim, se faz necessário utilizar fontes transistorizadas reguladas por corrente (analógicas), que proporcionam um sinal praticamente isento de ruídos, com perturbações menores que 0,1 Volt (Liu & Siewert, 1989). Entretanto, estas fontes possuem baixo rendimento elétrico e não são utilizadas na prática. Como as características dinâmicas da fonte influenciam no processo (Bálsamo et al, 1999 e Richardson et al, 1994), podem existir diferenças entre os valores encontrados por estas fontes e as outras utilizadas na prática. Além disso, Wang & Li (1997) afirmam que determinar o momento do destacamento da gota através do sinal de tensão somente é efetivo para as transferências globular e curto-circuito, pois no caso da transferência goticular a perturbação gerada é muito pequena.

Outro aspecto importante referente à utilização dos oscilogramas de tensão para identificar o tipo de transferência e o momento do destacamento da gota, refere-se à utilização de filtros eletrônicos, normalmente passa-baixa, para reduzir o ruído proveniente do chaveamento das fontes, tornando o sinal mais "limpo". Nesse sentido, Subramaniam (1996) mesmo utilizando uma fonte inversora, conseguiu identificar o instante de destacamento, filtrando o sinal de tensão com um filtro passivo RC passa-baixa com frequência de corte de 5 kHz. Mesmo em uma fonte transistorizada analógica, Rajasekaran et al (1998) utilizaram um filtro passa-baixa com frequência de corte igual a 5 kHz. Johnson et al (1991), com o objetivo de identificar apenas o tipo de transferência, usaram um filtro rejeita faixa (filtro "notch") com frequência de corte em 360 Hz, pois a fonte utilizada era um transformador-retificador trifásico, que apresentava ruídos no sinal da tensão e da corrente nesta frequência. Entretanto, ruídos na frequência sub-harmônica de 120 Hz também foram observados.

Um ponto importante destes trabalhos é que nenhum destes autores efetuou a transformada de Fourier dos sinais de tensão e corrente, de forma a apresentar o espectro de frequência para identificar as possíveis frequências de corte. Outro ponto importante é que todos os autores utilizaram filtros analógicos e que existiam fisicamente, ou seja, não houve tratamento posterior do sinal com o emprego de filtros digitais via programação. Assim, nenhum autor demonstrou a comparação entre o sinal filtrado e o sem filtrar.

Desta forma, não se pode comprovar se realmente os picos no sinal de tensão são devidos ao destacamento da gota e não devido a uma instabilidade no processo.

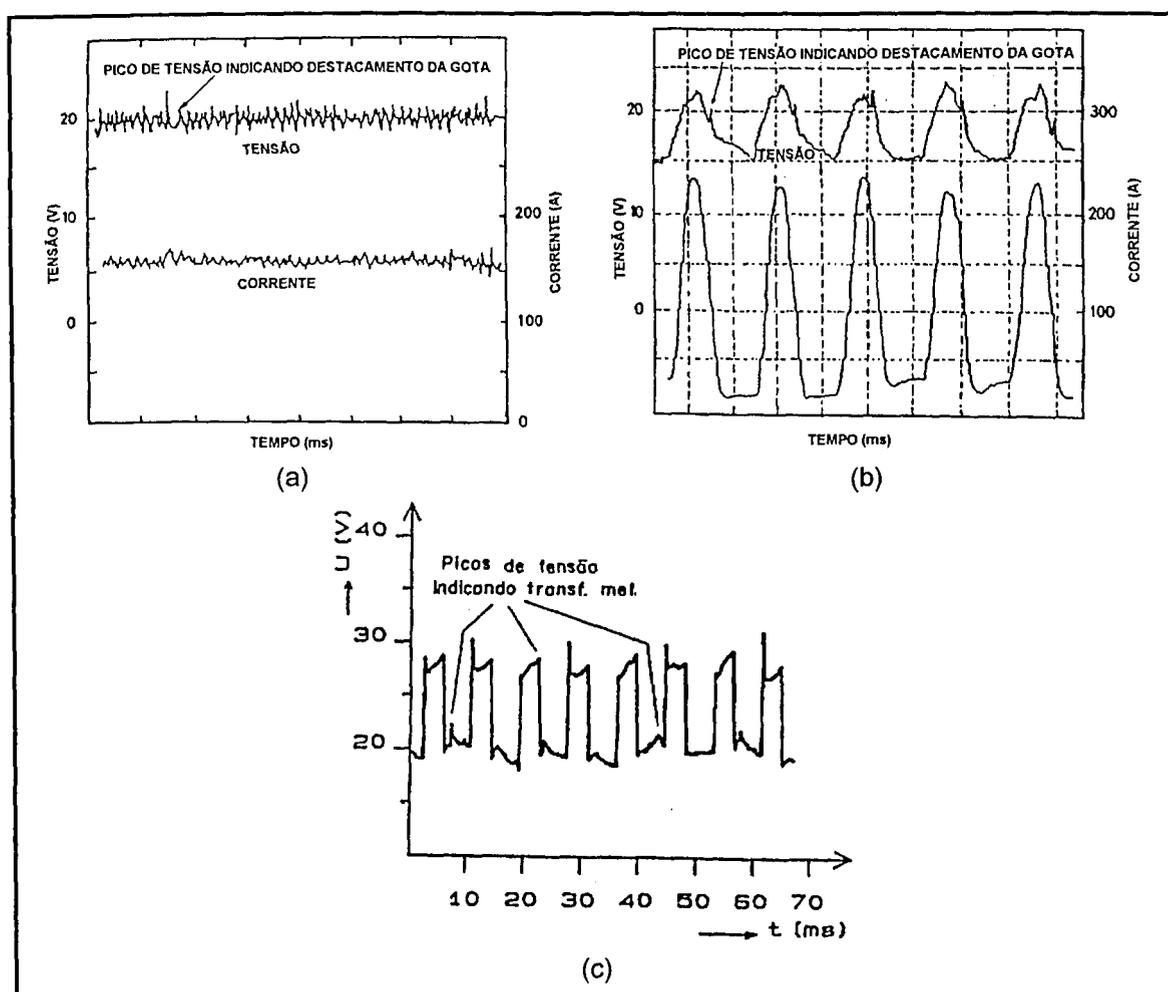


Figura 2.4 – Observação do instante de destacamento através da análise dos oscilogramas de tensão: (a) Tensão e corrente contínuas e constantes, ER5356 com 1,2 mm de diâmetro (Rajasekaran et al, 1998); (b) Tensão e corrente pulsadas, com este mesmo eletrodo (Rajasekaran et al, 1998); (c) Tensão pulsada, ER70S-6, diâmetro de 1,0 mm (Dutra, 1989).

✓ Visualização através da Shadowgrafia ou Técnica "Back-lighting"

Numa forma simplista, a técnica "Shadowgraph" (ou Shadowgrafia) não necessita de componentes ópticos e o efeito pode ser observado em várias situações fora de um laboratório (Merzkirch, 1987). Como por exemplo, basta ter um dia de sol e ter-se-á a sombra de um objeto, ou ainda, em uma superfície quente exposta ao sol é possível observar as linhas de convecção em torno da sombra da superfície.

A utilização do efeito de sombra para testes científicos e visualização de fluidos foi analisada primeiramente em 1880 (Merzkirch, 1987). Neste método uma fonte de luz pontual é transmitida através de um campo de teste e a figura da sombra produzida pela densidade heterogênea pode ser gravada em um plano vertical a uma distância "x" além do campo de teste. Caso as dimensões do campo de teste sejam maiores que o filme fotográfico ou

anteparo, deve-se fazer uso de uma montagem adicional para reduzir as dimensões da imagem, conforme mostra a Figura 2.5. O contorno de um objeto rígido em um campo de teste aparece fora de foco na imagem da sombra. A nitidez deste objeto é aumentada com a redução do diâmetro da fonte de luz (Merzkirch, 1987).

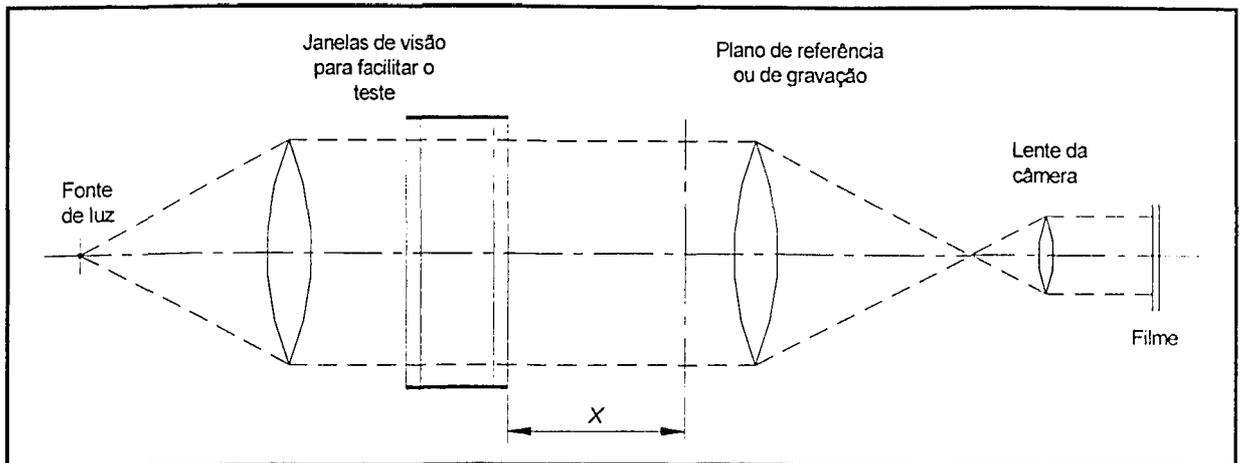


Figura 2.5 – Sistema de Shadowgrafia com feixe de luz paralelo através do campo de teste (Merzkirch, 1987).

Na soldagem, o termo Shadowgrafia vem sendo utilizado para se referenciar à formação da sombra projetada de vários elementos (tocha, eletrodo, gotas, cordão e chapa) em um filme fotográfico ou diretamente sobre a lente de uma filmadora, técnica também conhecida como "*Back-lighting*" (Johnson et al, 1991). Como a luz do próprio arco é muito intensa e se irradia em todas as direções, não é possível utilizá-la para se obter esta sombra. Assim, uma fonte de luz adicional é necessária, normalmente um laser de hélio-neônio (He-Ne) de potência entre 4 e 10 mW (Subramaniam, 1996). A utilização de um laser vermelho de He-Ne, ou seja, com comprimento de onda de aproximadamente 632,8 nm, é justificada pela menor emissão de luz pelo arco neste comprimento de onda; o arco emite numa faixa de comprimento de onda entre 280 e 700 nm. Dessa forma, através de uma filtragem seletiva que permita passar somente a luz do laser e não a do arco, será possível obter a sombra da tocha, eletrodo, gotas, cordão e chapa num fundo vermelho. Esta filtragem seletiva é conseguida com um filtro óptico passa-banda, disponível comercialmente. Com a eliminação quase total da luz do arco, as sombras passam a retratar apenas a parte interceptada do feixe de laser (Subramaniam et al, 1998; Scotti et al, 1998 Kim & Eagar, 1993a e Baixo & Dutra, 1989), conforme mostrado na Figura 2.6.

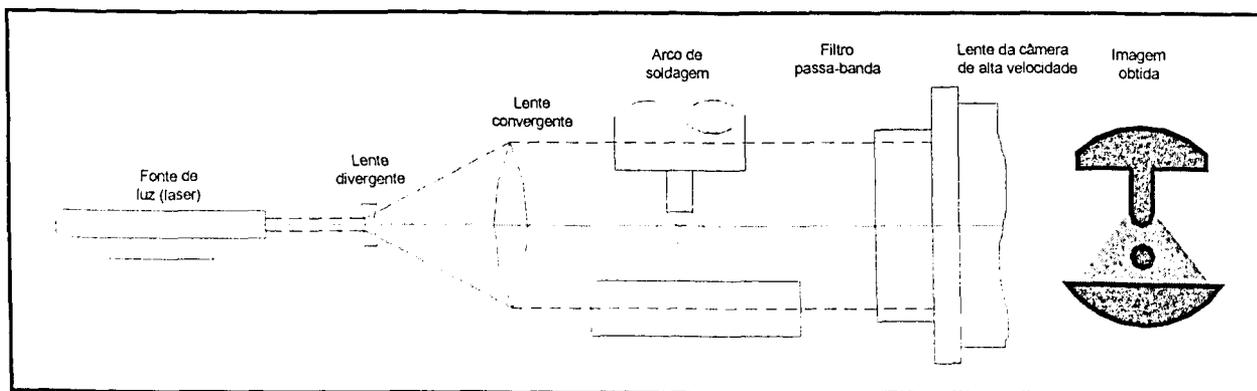


Figura 2.6 – Princípio da Shadowgrafia ("Back-lighting") aplicado à soldagem.

Para se estudar a transferência metálica através da visualização das gotas transferidas, se faz necessária uma instrumentação que permita visualizar quantidades mínimas de metal (gotas) viajando a uma velocidade muito alta, o que é conseguido com uma filmagem ou fotografia a alta velocidade. A imagem conseguida, após o filtro passa-banda, é projetada em um filme fotográfico (Waszink & Piena, 1986) ou na lente de uma filmadora (Subramaniam et al, 1998 e Scotti, 1998). A utilização de filme fotográfico torna esta metodologia muito limitada pela forma de registrar os eventos, devido à grande demora entre o experimento e a análise dos resultados, além de fornecer informações somente de um instante do processo, não possibilitando a observação de sua evolução, fazendo com que muitos eventos transientes não sejam identificados. Com a utilização de uma câmera de alta velocidade (1000 quadros/s ou mais), há a possibilidade de se medir com maior precisão, tanto a taxa de transferência metálica, quanto o tamanho das gotas transferidas.

A Figura 2.7 mostra o arranjo experimental de Waszink & Piena (1986) para a utilização da Shadowgrafia com filme fotográfico. A imagem do arco (A), limitada por uma fenda (S) de 2 mm, é projetada num filme através de um espelho rotativo (RM). Um disco rotativo (DS) constituído com 16 furos atua como regulador do tempo de exposição do filme ("shutter"). Além do uso do filtro passa-banda (F), dois polarizadores (P) são empregados para ajustar a intensidade da luz.

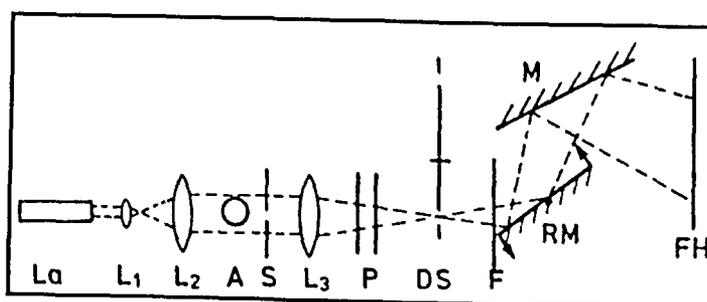


Figura 2.7 - Diagrama esquemático do arranjo fotográfico: La - laser; L₁, L₂, L₃ - lentes; A - arco de soldagem; S - fenda; P - polarizador; DS - disco de abertura; F - filtro óptico; RM - espelho rotativo; M - espelho fixo; FH - suporte do filme (Waszink & Piena, 1986).

Baixo & Dutra (1989), também empregando *Shadowgrafia com filme fotográfico*, descrevem a montagem de uma bancada experimental (Figura 2.8a). O feixe luminoso emitido pela fonte laser He-Ne (1) transpõe uma lente expansora (2) sofrendo um aumento em seu diâmetro, indo incidir sobre uma lente plano-convexa (3). Esta lente colima os raios expandidos dirigindo-os para o arco voltaico. Ao transpô-lo, o feixe incide sobre uma lente convergente (4) indo a seguir projetar-se sobre um filme fotográfico (8). A redução seletiva da luminosidade do arco em relação a luz de fundo produzida pelo laser conseguida pela incorporação de um filtro espacial² (4,5), com o ajuste da intensidade luminosa sendo obtida por um conjunto de polarizadores posicionados após o filtro. A utilização desta montagem torna-se importante no estudo da distribuição espacial do arco voltaico (Figura 2.8b), permitindo observar as características de formação das regiões de interface eletrodo-arco. A substituição dos polarizadores por um filtro de interferência (passa-banda) torna possível o registro dos fenômenos internos ao arco (Figura 2.8c). A eliminação só não é total porque o arco também emite uma pequena parcela de luz no mesmo comprimento de onda do laser. A visualização da extremidade do eletrodo, expondo a seqüência de separação dos glóbulos metálicos só se torna possível pela utilização deste filtro. Entretanto, Zhang et al (1998) não fez uso de filtro passa-banda, apenas deslocou a câmera a uma distância tal que a intensidade da luz do arco ficasse fraca, comparado a luz do laser que é colimada.

As imagens obtidas (Figura 2.9) são provas incontestáveis do tipo de transferência que está ocorrendo, possibilitando inclusive a investigação de modos mistos de transferência (Scotti et al, 1998), os quais não são identificados pela análise dos oscilogramas de tensão. Contudo, a identificação da tensão e corrente no momento do destacamento da gota não é possível, o que, por exemplo, não permite identificar onde a gota se despendeu num processo pulsado, se foi no pico ou se foi na base. Assim, alguns autores sincronizam as imagens obtidas por *Shadowgrafia* com os oscilogramas de tensão e corrente.

² O filtro espacial corta a maioria da luz branca proveniente do arco. O filtro passa-banda corta a luz restante (Subramaniam, 1996).

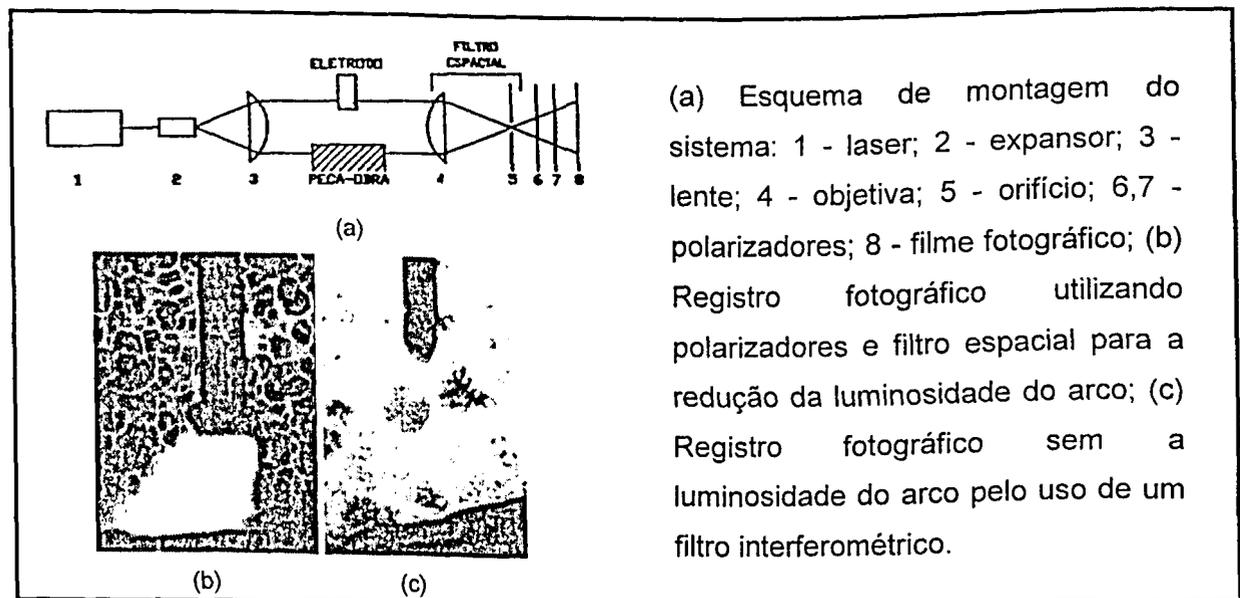


Figura 2.8 – Montagem utilizada e fotografias obtidas por Baixo & Dutra (1989).

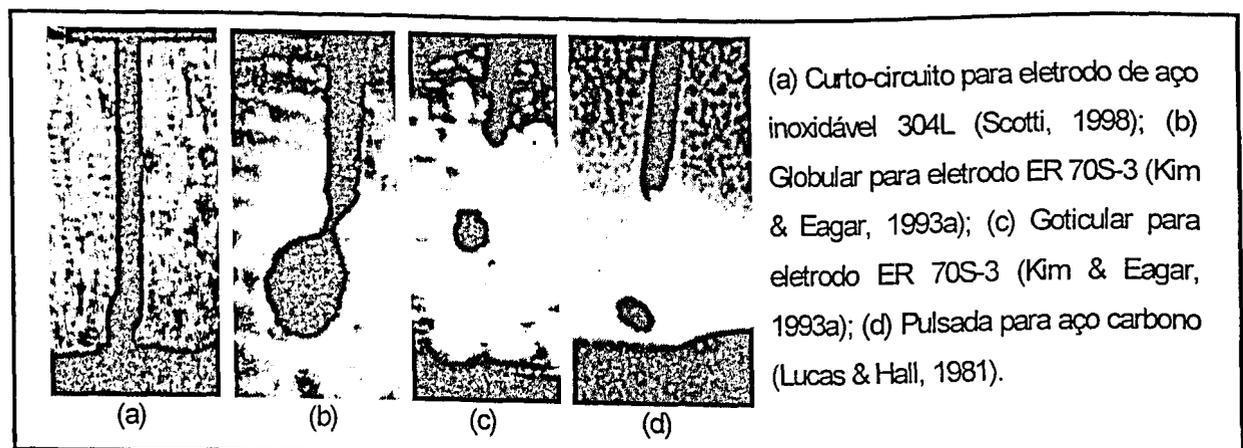


Figura 2.9 – Visualização dos tipos de transferência obtidas por Shadowgrafia.

Esta sincronização pode ser obtida através de um sinal elétrico proveniente de uma chave elétrica que envia pulsos de tensão para o sistema de aquisição, que é o responsável por adquirir os sinais de tensão e corrente, e para um LED montado em frente à lente da câmera (Subramaniam, 1996 e Johnson et al, 1991). Assim, visualizando quadro a quadro a filmagem obtida e observando o sinal proveniente do circuito acionador do LED (Figura 2.10), pode-se constatar em quais quadros houve o acendimento do LED e o valor da tensão e corrente num determinado quadro. O principal questionamento a ser feito sobre esta técnica de sincronização refere-se ao tempo de acendimento do LED, que deve ter uma resposta em frequência muito alta.

Neste trabalho de Johnson et al (1991), além desta sincronização da câmera com os sinais de tensão e corrente, há o estudo da viabilidade em se determinar o tipo de transferência a partir do som emitido pelo arco de soldagem, conforme será descrito a seguir.

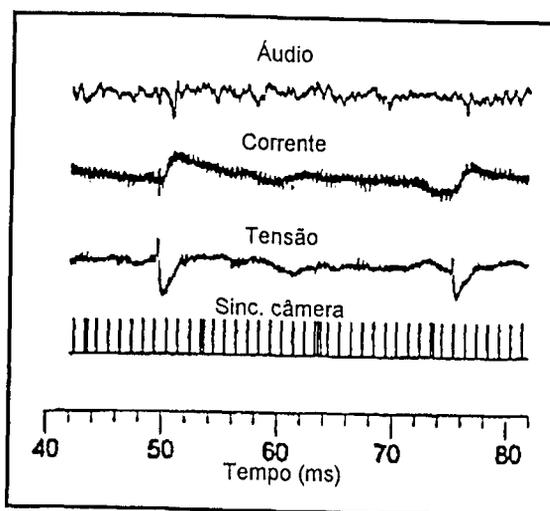


Figura 2.10 – Sinais elétricos obtidos para transferência globular, eletrodo ER70S-3 (Johnson et al, 1991).

✓ Outras técnicas

Segundo Johnson et al (1991), além destes dois tipos de técnicas baseadas na análise dos sinais de tensão e corrente e na filmagem em alta velocidade, existem técnicas que empregam raios-X, variação na intensidade luminosa e do som (ultra-sons e sons audíveis). Contudo, estas técnicas ainda estão em estudo (Rajasekaran et al, 1998) sendo comprovadas com o auxílio das outras duas apresentadas.

Segundo Rajasekaran et al (1998), num processo pulsado, quando a gota se destaca durante a corrente de base, o nível sonoro do arco é o menor obtido. Entretanto, para outros tipos de destacamento (durante o pico e várias vezes num período) não há diferença significativa. Johnson et al (1991) afirmam que há uma tendência no sinal sonoro do arco para identificar o momento do destacamento da gota (50 e 75 ms da Figura 2.10) levando-se em conta 1ms decorrente do atraso proporcionado pelo percurso do som desde o arco até o microfone. Contudo, uma investigação mais aprofundada deve ser realizada com a utilização de sensores mais sensíveis e com maior faixa de frequência. Wang & Li (1997) contestam a utilização da variação do nível sonoro do arco e de emissão acústica para o estudo de transferência metálica, pois esta técnica é prejudicada devido a alta susceptibilidade aos ruídos existentes no ambiente, o que dificulta sua aplicação em termos industriais. Nenhum desses autores analisou o sinal sonoro no domínio de frequência e sim, sempre, no domínio do tempo.

Wang & Li (1997) também estudaram a correlação entre a transferência das gotas e alterações na intensidade da luz do arco na soldagem MIG/MAG pulsada de aço (ER70S) e alumínio (ER4043). Estes autores descobriram uma relação direta do destacamento da gota na soldagem de aços utilizando gás de proteção (Ar+15%CO₂ e Ar+5%O₂) e alumínio com Ar puro, com a variação da intensidade luminosa do arco. Na soldagem de aço com Ar puro não

se verificou variação na intensidade luminosa. Segundo os autores, durante a transferência, a intensidade de luz diminui rapidamente para depois aumentar gradualmente. Os resultados obtidos por estes autores foram comprovados por meio de Shadowgrafia sincronizada. Subramaniam (1996) também soldando alumínio (ER4047 e Ar puro) com corrente pulsada e analisando o instante de destacamento com o sensor de luz e através do oscilograma de tensão, confirmando com Shadowgrafia sincronizada, afirma que o sensor de luz apresentou baixa sensibilidade devido a flutuações na luz do arco durante a pulsação, tornando difícil o seu ajuste. Assim, esta técnica que utiliza a variação da intensidade luminosa do arco com um sensor de luz (fotodiodo) para estabelecer o instante do destacamento, parece ser bastante influenciada tanto pelo tipo de eletrodo quanto pelo gás de proteção.

A determinação do instante de destacamento, através das técnicas apresentadas, é muito importante no processo pulsado, pois o valor da corrente e tensão onde ocorrem os destacamentos e o número de destacamentos por período de pulso governam as características do processo, conforme será visto a seguir.

2.3 O processo MIG pulsado

O processo MIG pulsado, que alia as características das transferências globular (baixa corrente) e goticular (alta produtividade), tem sido objeto de vários estudos para melhorar a qualidade e a produtividade da junta soldada (Grubic & Andric, 1995). A sua aplicação na soldagem das ligas de alumínio não é diferente, visto que as vantagens obtidas com o seu uso são muitas em comparação com o MIG convencional. A dificuldade em se utilizar tal processo é resultante da dificuldade de obter parâmetros adequados, que variam de acordo com o material, diâmetro e comprimento do eletrodo e gás de proteção (Norrish, 1992).

Inúmeras vantagens tem sido descritas para este processo (Sadler, 1999; Castner, 1995; Norrish, 1992 e Ghosh et al, 1991):

- Possibilidade de se soldar em todas as posições com transferência caracteristicamente goticular;
- Velocidades de soldagem cerca de 35% maiores que as utilizadas para a transferência curto-circuito;
- Significante redução no nível de respingos quando comparado ao curto-circuito;
- Menor distorção comparado ao goticular;
- Cordão de boa aparência;
- Redução na taxa de geração de fumos.

Com relação à influências metalúrgicas, Ghosh et al (1991), usando eletrodo AlMg4,5, diâmetro 1,6 mm, Ar puro a 15l/min, numa chapa de alumínio comercial, mostraram que o

tempo de pico, para uma mesma corrente média, possui moderada influência, onde um aumento do seu valor tende a diminuir a microdureza na ZAC, na medida em que provoca um aumento no calor imposto e na fluidez da poça. Entretanto, neste trabalho foram utilizadas correntes médias próximas e superiores à de transição, o que implica numa perda da principal premissa do processo pulsado que é a redução da corrente média. Já Matsuda et al (1985), soldando com eletrodo ER 5356 e ER 5356 + 0,23%Zr, diâmetro 1,6 mm, sobre chapa A7N01-T5 (Al-Zn-Mg), variou a frequência de pulsação de 0 Hz (corrente contínua e constante) até 60 Hz e verificou o refinamento dos grãos do cordão de solda através de microscopia óptica e a susceptibilidade à trinca através do teste espinha de peixe ("*Fish-bone*"). Como resultado do trabalho, afirma-se que a pulsação de corrente na soldagem GMAW é muito efetiva na redução da susceptibilidade a trinca da liga Al-Zn-Mg, onde ambos os eletrodos obtiveram um máximo de refinamento dos grãos e um mínimo de susceptibilidade para a frequência de 30 Hz. Entretanto, as frequências utilizadas foram baixas comparadas com outros autores (80 a 450 Hz, como em Subramaniam et al, 1998; Rajasekaran et al 1998 e Alcan, 1993). Dutra et al (1995) e Vishnu (1995) acreditam que os benefícios metalúrgicos só são sentidos para baixas frequências de pulsação, tal qual se obtém no TIG pulsado (0,2 a 10 Hz); um estudo mais aprofundado deve ser realizado para frequências de pulsação maiores (acima de 80 Hz). Nesta linha de pensamento de se utilizar baixa frequência de pulso, surgiu uma variação do processo pulsado, denominado de pulsação térmica, onde além dos pulsos normais, existe uma sobreposição de pulsos de baixa frequência (Dutra et al, 1995 e Vishnu, 1995).

Com relação à produtividade superior da transferência pulsada sobre o curto-circuito, existem divergências acerca deste fato. Pereira (1995) afirma que em seus testes com eletrodo ER70S-6 (1,0 mm) utilizando corrente pulsada, tanto a taxa de deposição, quanto o rendimento de deposição foram maiores do que em curto-circuito, para as mesmas correntes médias, distância bico de contato peça (DBCP) e velocidades de soldagem, ou seja, o processo com corrente pulsada é melhor do ponto de vista da produtividade. Contudo, a faixa de operação (envelope operacional) encontrada para o pulsado é bem mais restrita, o que confere ao curto-circuito uma maior robustez. Esta conclusão de que o processo pulsado requer um severo controle do ajuste dos parâmetros, enquanto que o curto-circuito possui uma tolerância maior está de acordo com o obtido por Dutra et al (1993) soldando eletrodo ER70S-6 (1,2 mm) na posição vertical ascendente.

Já Paula & Dutra (1996) compararam o MIG pulsado (ER70S-6, diâmetro 1,0 mm e Ar+5%CO₂) com o MAG curto-circuito (ER70S-6, diâmetro 1,0 mm e Ar+25%CO₂) tendo em vista valores de potência do arco e encontraram que a produtividade do método pulsado não é efetivamente superior do que a que se obtém com o processo MAG curto-circuito para iguais valores de potência. Nos ensaios realizados obteve-se praticamente a mesma quantidade de

material depositado em ambos os processos, porém, com potência do arco na soldagem por curto-circuito da ordem de 36% menor que a potência obtida no modo pulsado. Assim, os autores concluem que a escolha por um ou outro tipo de transferência/processo recai na adaptabilidade de cada um. Entretanto, estes autores, apesar de se referirem à maior quantidade de respingos observada no curto-circuito, não se atentaram para a perda de material depositado quando existem respingos. Além disso, os autores não consideraram uma possível influência dos diferentes gases de proteção utilizados.

Considerando esta perda por respingo, Piffer & Martins (1996), soldando ER70S-6 (1,2 mm) e gás Ar+8%CO₂+2%O₂, encontraram que a taxa de deposição no modo pulsado foi 29% superior à obtida pelo modo curto-circuito e o rendimento de deposição foi, em média, 6% maior. Estes autores observaram também que, em níveis de corrente média praticamente iguais, o consumo de energia elétrica do pulsado foi 52% maior que o obtido para o curto-circuito, o que concorda com Paula & Dutra (1996). Entretanto, ao se considerar todos estes aspectos de produtividade, custo de energia, operação adicional para retirar os respingos, perda de material por salpicagem e tempo de produção, o custo final do processo pulsado é cerca de 35% menor que o curto-circuito.

Finalmente, mais um trabalho confirma a vantagem da maior produtividade da transferência pulsada sobre o curto-circuito. Arima et al (1995), soldando pulsado e curto-circuito com arame ER 308L Si (aço inoxidável) com Ar+2%CO₂+1%H₂, afirma que, em condições otimizadas para os dois modos de transferência, o pulsado, além de proporcionar uma maior velocidade de soldagem, ou seja, uma maior produtividade, possibilita melhorar os perfis dos cordões de solda, diminuir o nível de respingos e facilitar a soldagem fora de posição (2F e 3F ascendente).

Com relação às desvantagens deste processo, Norrish (1992) cita o fato de que, devido ao baixo aporte de calor, podem existir defeitos como a falta de fusão. Além disso, a necessidade de soldadores mais qualificados e equipamentos mais complexos, aliados a uma menor flexibilidade do processo, são pontos contrários à implantação da tecnologia MIG pulsada.

2.3.1 Características e premissas do processo

O processo se caracteriza por uma forma de onda descrita por quatro grandezas, conforme mostra a Figura 2.11, que são I_p (corrente de pico), t_p (tempo de pico), I_b (corrente de base) e t_b (tempo de base), além de suas correspondentes para o oscilograma de tensão. Os tempos de pico e base também definem o período de pulso (T), que é o inverso da frequência de pulsação (F) e o ciclo de trabalho (CT), como mostrado nas Equações 2.1 a 2.3. Esses parâmetros devem ser considerados em conjunto com as variáveis tradicionais do processo

MIG, como comprimento do arco, velocidade de alimentação, gás de proteção, composição e diâmetro do eletrodo, dentre outras (AWS, 1991).

$$T = t_p + t_b ; \quad (2.1)$$

$$F = \frac{1}{t_p + t_b} ; \quad (2.2)$$

$$CT = \frac{t_p}{t_p + t_b} \cdot 100\% . \quad (2.3)$$

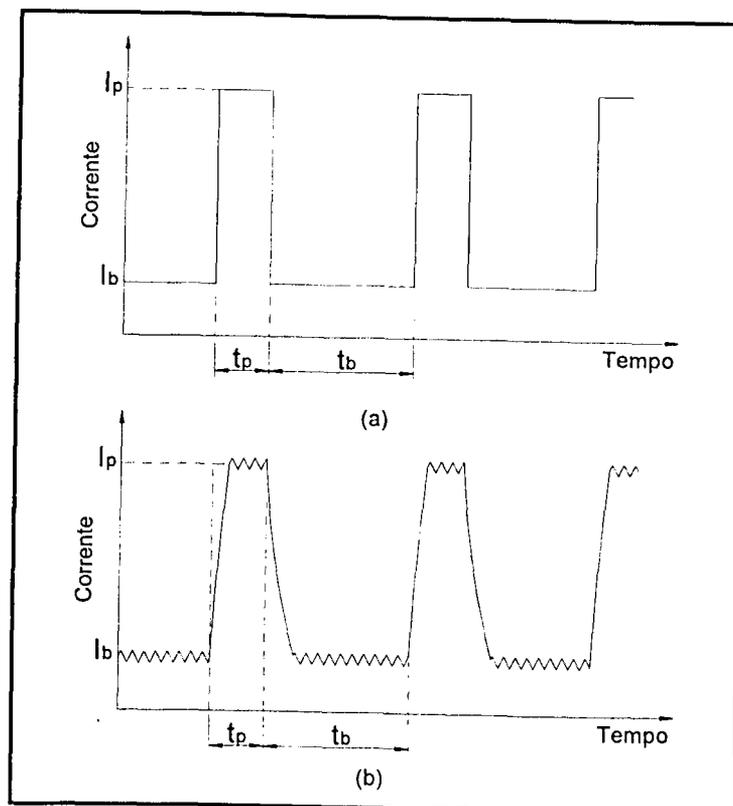


Figura 2.11 – Forma de onda da corrente no processo MIG pulsado: (a) Idealizada; (b) Mais representativa para equipamentos comerciais (Elliot, 1985).

Pode-se perceber que, com relação às fontes de potência, podem ser utilizadas quatro diferentes características estáticas (Dutra et al, 1992), como mostra a Figura 2.12. Para uma fonte tensão constante (Figura 2.12a), utilizada por exemplo por Rajasekaran et al (1998), ajusta-se a tensão de pico (V_p) e a tensão de base (V_b) e a determinação das correntes de pico e base é feita por tentativa e erro. Em fontes corrente constante (Figura 2.12b), utilizadas por Subramaniam et al (1998), Wang & Li (1997) e Grubic & Andric (1995), pode-se ajustar perfeitamente os valores de I_p e I_b . Já para o modo misto (Figura 2.12c,d) existem duas

possibilidades. Contudo, somente a ilustrada na Figura 2.12c é utilizada, ou seja, a fonte é tensão constante no pico e corrente constante na base. Isto deve-se ao fato da necessidade em se garantir uma corrente mínima na base e controlar o comprimento do arco quando ocorrer a transferência metálica no pico. Assim, ajusta-se V_p e I_b . As vantagens e desvantagens dos modos corrente constante e tensão constante são os mesmos daqueles já descritos para o processo convencional. Já o modo misto veio como um forma de combinar as vantagens dos dois modos. Convém lembrar que na Figura 2.12 não está ilustrado o fato do arco possuir características estáticas diferentes para o pico e base.

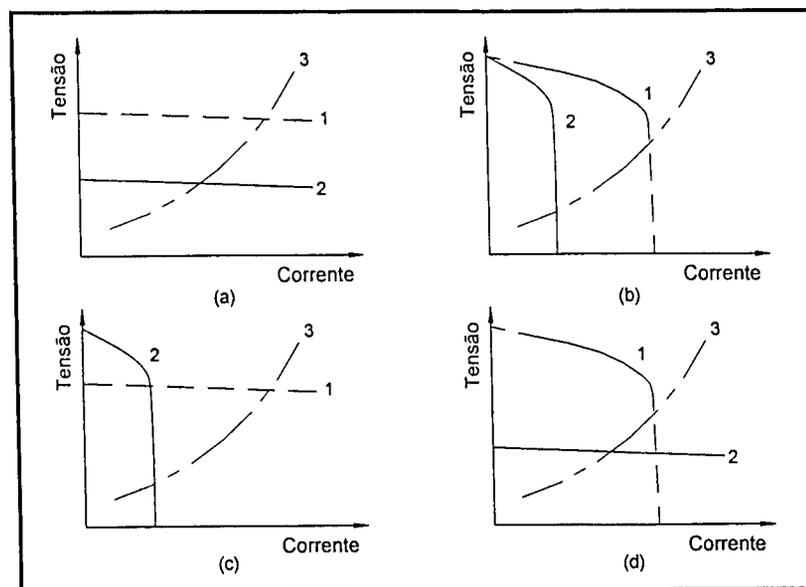


Figura 2.12 - Diferentes possibilidades de características estáticas para processo pulsado (Dutra et al, 1992), onde 1 é a característica estática no pulso, 2 é a características estática na base e 3 é a característica estática do arco.

Nesta mesma linha de estudo de fontes para o processo pulsado, cabe ressaltar a importância da fonte neste processo. A tecnologia da transferência pulsada foi desenvolvida na década de 60, mas havia uma grande limitação quanto aos primeiros equipamentos de soldagem (primeira geração) que possuíam frequência de pulso igual a frequência da linha de entrada ou o dobro dela, isto é, 50/60 Hz ou 100/120 Hz e a forma do pulso de saída era senoidal (Pixley, 1999; Subramaniam, 1996 e Alcan, 1993). Esta situação acarretava enormes dificuldades para os soldadores na hora de regular os parâmetros de pulsação, pois o balanceamento inadequado entre estes parâmetros de pulsação e a velocidade de alimentação do arame resultavam numa transferência irregular e em má estabilidade de arco (Alcan, 1993 e Collard, 1988). A dificuldade na regulagem dos pulsos a fim de se obter o balanceamento adequado entre a velocidade de avanço do arame e a taxa de fusão foi o principal motivo para a limitação dos equipamentos de soldagem com frequência de pulsação fixa. Com o advento

da tecnologia do estado sólido, as fontes ditas eletrônicas possibilitaram a geração de correntes pulsadas em várias frequências através de bancos de transistores (Collard, 1988).

Esta segunda geração de fontes surgida no fim da década de 70 possibilitou um perfeito ajuste de parâmetros através do formato da onda bem definido (Altshuller, 1998). Além disso, na década de 80, quando houve o maior crescimento das fontes para o processo pulsado, foi possível incorporar em sistemas de memórias (EPROM, EEPROM e FLASH ROM) alguns valores ótimos para as variáveis do processo. Este sistema ficou conhecido como sistema sinérgico (Pixley, 1999) e será descrito no item 2.6. Entretanto, como estes valores eram fixos, não existia a possibilidade de se efetuar ajustes durante a soldagem em decorrência de alguma instabilidade no processo.

Assim, na terceira geração de fontes, também chamada de revolução digital e surgida no fim da década de 80, foi incorporado o controle do processo, denominado de controle adaptativo (Pixley, 1999 e Collard, 1988). Baseando-se no monitoramento do processo, através de sensores elétricos, ópticos, acústicos, infravermelhos e ultra-sônicos, pode-se determinar qualquer instabilidade e interferir nas variáveis de forma a compensar, executando um controle em malha fechada (Collard, 1988).

Além desta importante evolução nas fontes de soldagem, de forma a propiciarem a difusão do processo pulsado, o estudo físico também foi de suma importância. Assim, desde os primeiros estudos em 1962, surgiram algumas premissas que até hoje são atribuídas como corretas (Rajasekaran et al, 1998; Subramaniam et al, 1998; Kim & Eagar, 1993b e Dutra, 1989). A principal delas deve-se ao fato da estabilidade do arco demandar uma única gota se transferindo ao fim de cada pulso, também conhecida como UGPP (Carreira Neto & Brandi, 1998).

A condição de transferência de uma gota por pulso parece arbitrária, mas quando ocorrem dois ou mais destacamentos por pico o processo se torna menos controlável e, algumas vezes, aparecem salpicos finos (Alcan, 1993). Esta diminuição no controle é devido ao fato dos diâmetros das gotas serem diferentes, pois os tempos para formação que cada uma dispõe são diferentes (Figura 2.13) e devido ao fato das gotas possuírem diferentes acelerações durante a sua queda através do arco, pois presenciam diferentes níveis de tensão e corrente, conforme mostra a Figura 2.14. Além disso, quando a segunda gota é de dimensão muito pequena, podem ocorrer salpicos finos (Alcan, 1993).

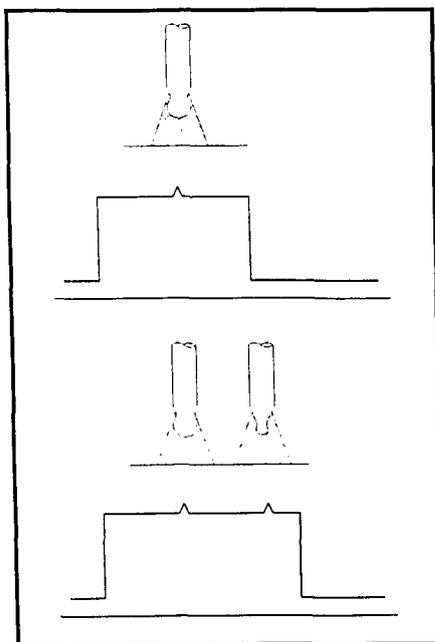


Figura 2.13 – Diferenças entre o primeiro e o segundo destacamento quando se destacam duas gotas por pulso (Alcan, 1993).

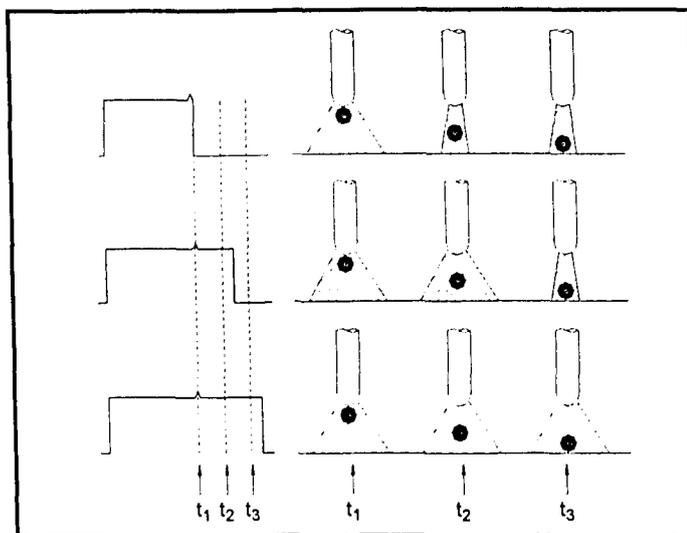


Figura 2.14 – Influência do momento do destacamento (Alcan, 1993).

Outra premissa correntemente citada na literatura (Rajasekaran et al, 1998 e Norrish, 1992) refere-se à necessidade da gota possuir o diâmetro igual ao do eletrodo. Para outros autores (Subramaniam et al, 1998 e Alcan, 1993), o diâmetro da gota, representado por seu volume, pode variar dentro de uma determinada faixa. Deve-se tomar cuidado apenas para não se ter um diâmetro (volume) muito grande, o que implicaria numa transferência globular ou mesmo num curto-circuito.

Além de se observar o número de destacamentos e os diâmetros das gotas obtidas, uma terceira premissa estuda o instante onde a gota é destacada, se no pulso ou na base.

Tradicionalmente afirma-se que a gota deve se destacar no fim do pico (Grubic & Andric, 1995; Norrish, 1992 e Allum, 1985). Entretanto, outros autores (Rajasekaran et al, 1998, Subramaniam, 1996 e Alcan, 1993) sugerem que o destacamento ocorra durante a corrente de base. A razão para isto é que enquanto altas correntes são requeridas para se iniciar o destacamento, uma vez que este tenha sido iniciado, se torna irreversível e irá continuar mesmo em baixas correntes. Tais condições minimizam a energia de pulso e garantem que a gota toque a poça numa condição menos brusca (Nixon & Norrish, 1988). Rajasekaran et al (1998), soldando com arame ER 5356, afirmam que o destacamento que ocorre durante a base proporciona uma maior penetração, aliada a um menor aporte de calor (o que parece um tanto contraditório), maior largura do cordão, maior diluição, maior reforço, maior uniformidade no comprimento do arco e maior uniformidade no destacamento das gotas. Já o destacamento que ocorre ao fim do pico proporciona uma maior uniformidade na superfície do cordão com menor ondulação.

Uma outra premissa trata do fato de se utilizar uma corrente média sempre abaixo da corrente de transição, caso contrário poderia-se simplesmente utilizar o gótico convencional, o que seria mais simples devido ao menor número de variáveis envolvidas. Entretanto, Ghosh, et al (1991) afirmam que as características de deposição são melhores para o processo pulsado que para o convencional, onde no processo pulsado obteve-se, para uma mesma corrente média, maior reforço, maior largura e maior penetração. Além disto, as características de deposição do processo pulsado foram melhores quando a corrente média utilizada foi maior que a corrente de transição. Assim, um estudo acerca da viabilidade do processo pulsado em altas correntes médias, poderia responder se o pulsado é sempre melhor que o convencional, a não ser pelo custo do equipamento e ajustes de parâmetros.

Outras premissas tratam da necessidade da corrente de pico ser maior que a corrente de transição para que ocorra o destacamento da gota e que, em qualquer evento, freqüências de pulso menores que 20 Hz não devem ser utilizadas, pois a flutuação na intensidade luminosa do arco pode causar fadiga visual ao soldador, induzindo epilepsia em indivíduos susceptíveis (Nixon & Norrish, 1988). Por fim, para efeito de estabilidade do arco, correntes de base menores que 20 A, quando soldando alumínio, não devem ser empregadas (Alcan, 1993). Esta última premissa pode ser encarada como um critério de estabilidade, podendo estabelecer os limites do processo, como será visto no item 2.5.

Definidas as variáveis do processo, resta executar um levantamento do estado da arte da influência destas variáveis na soldagem, observando o seus efeitos na geometria e qualidade do cordão, transferência metálica e estabilidade do arco dentre outros aspectos.

2.3.2 Influência das principais variáveis

✓ Influência dos parâmetros de pulso (I_p , t_p , I_b , t_b)

Tradicionalmente afirma-se (Nixon & Norrish, 1988 e Allum, 1985) que os parâmetros de base (I_b e t_b) tem um pequeno efeito sobre o destacamento da gota, mas influenciam no seu tamanho. Já os parâmetros de pico (I_p e t_p) possuem significativa influência na transferência metálica. Estes conceitos devem-se à própria filosofia do processo, que é o emprego periódico de uma corrente mínima (corrente de base) necessária para manter o arco aceso, promover o aquecimento do eletrodo por efeito Joule e proporcionar a limpeza catódica, seguida de uma corrente de pico, maior que a corrente de transição, num intervalo de tempo hábil para que ocorra a transferência. Em contraste, Subramaniam (1996) afirma que, tanto os parâmetros de pico, quanto os de base têm influência sobre o modo de transferência metálica, não sendo possível conseguir a condição de UGPP ajustando apenas I_p e t_p , indiferentemente a I_b e t_b .

Rajasekaran et al (1998) encontraram que a combinação do maior I_p com o menor t_p é capaz de fornecer uma maior uniformidade no comprimento do arco e no destacamento, do que a combinação do menor I_p com o maior t_p , ambos quando o destacamento ocorre na base, tendo sido esta a condição de maior estabilidade.

Kim & Eagar (1993b) afirmam que um aumento na corrente de pico proporciona um aumento da região onde se consegue obter UGPP. Além disso um aumento de I_p leva a um aumento na máxima frequência de pulsação onde se consegue obter UGPP, devido ao aumento na taxa de fusão do eletrodo e na redução do diâmetro da gota. Já a mínima frequência de pulsação (4 Hz para ER70S-3 e $I_b=180$ A) não é alterada por I_p , pois esta mínima frequência em que se consegue a condição de UGPP é igual a frequência natural de destacamento obtida quando se solda com corrente constante e contínua com um valor de corrente igual a I_b . Neste mesmo trabalho, os autores chamam a atenção para o fato de que um aumento em I_p ou I_b aumentam a tendência ao alongamento do eletrodo para o eletrodo utilizado (ER70S-3).

Quanto à geometria, Grubic & Andric (1995), usando eletrodo AlMg5, diâmetro 1,2 e 1,6 mm e Ar puro, encontraram que I_p e t_p têm influência mais significativa sobre o modo de transferência e pouca influência na geometria do cordão. Já I_b e t_b tem pouca influência no modo de transferência, mas têm um efeito significativo sobre a penetração e a área de fusão, podendo variá-los de 20 a 30%. Entretanto, neste trabalho de Grubic & Andric, para se estudar o efeito de t_p sobre a geometria do cordão, eles mantiveram a frequência constante, o que implica na variação de t_b . Dessa forma, o efeito de t_p ficou mascarado. O mesmo não aconteceu no estudo da influência de t_b , pois eles mantiveram t_p constante e não a frequência.

Ghosh, et al (1991), soldando com eletrodo AlMg4,5, diâmetro 1,6 mm e Ar puro, estudaram a influência de t_p sobre a geometria do cordão e encontraram que este possui uma

moderada influência. Um aumento de t_p tende a aumentar a penetração (o que também foi encontrado em aço por Kumar & Parmar, 1986), a largura e a diluição e tende a diminuir o reforço e a microdureza na ZAC, na medida em que o aumento do tempo de pico provoca um aumento no calor imposto e na fluidez da poça. Mais uma vez, o autor não teve o cuidado em observar que variando t_p , mas mantendo fixa a frequência, variou-se também t_b , tornando difícil afirmar qual dos dois tempos proporcionou as variações observadas na geometria. Subramaniam (1996) também estudou a influência dos parâmetros sobre o cordão e encontrou que I_b possui pouca influência sobre a penetração e nenhuma influência sobre a largura do cordão. Já um aumento em I_p tende a fornecer um cordão mais largo e com menor penetração.

Castner (1995) investigou a influência dos parâmetros de pico sobre a taxa de geração de fumos para o ER70S-3 de 1,2 mm para diferentes gases. Os testes deste trabalho indicaram que, sob certas condições, a taxa de geração de fumos é influenciada pelos parâmetros de pulso. Reduzindo-se t_p de 2,2 para 2,0 ms aumentou-se esta taxa. Aumentando-se I_p de 400 para 420 A, a taxa mínima de geração de fumos não se alterou. Estes resultados foram obtidos com uma velocidade de alimentação de 6,6 m/min. Com uma velocidade de 10,4 m/min, esta taxa foi reduzida somente para tensões de arco menores que 26,5 Volts, quando se reduziu t_p e aumentou-se I_p . Entretanto, a taxa mínima de geração de fumos permaneceu a mesma. Dessa forma, trabalhos futuros são necessários para investigar a relação existente entre a taxa de geração de fumos e os parâmetros de pulso para um dado tipo e diâmetro de eletrodo, velocidade de alimentação, tensão de arco e gás de proteção.

✓ Influência da dinâmica da fonte

A estreita relação entre o processo MIG e as características das fontes de soldagem tem sido descrita em vários trabalhos nos últimos dez anos, particularmente com relação ao emprego de operações com corrente pulsada. Diferenças na característica e estabilidade do arco têm sido observadas em soldagens realizadas com os mesmos parâmetros de pulso usando diferentes fontes (Richardson et al, 1994).

Na prática, uma fonte de soldagem não pode fornecer uma variação instantânea de corrente, ou seja, existe uma resposta dinâmica da fonte que determina a taxa com que a corrente pode variar (di/dt). Assim, se o tempo de pico selecionado for muito pequeno, o desempenho da transferência pode ser afetado pelo tempo gasto para se atingir totalmente a corrente de pico (Nixon & Norrish, 1988). Caso valores idênticos para os parâmetros de pulso sejam ajustados, certamente obter-se-á diferentes áreas abaixo do pulso (Figura 2.15) e, conseqüentemente diferentes correntes médias ou eficazes, ou seja, processo com diferentes níveis de energia. Dessa forma, quanto maior a diferença entre I_p e I_b , ou quanto mais lenta for

a taxa de resposta da fonte (menor dl/dt), menor será a taxa de fusão do eletrodo (Richardson et al, 1994).

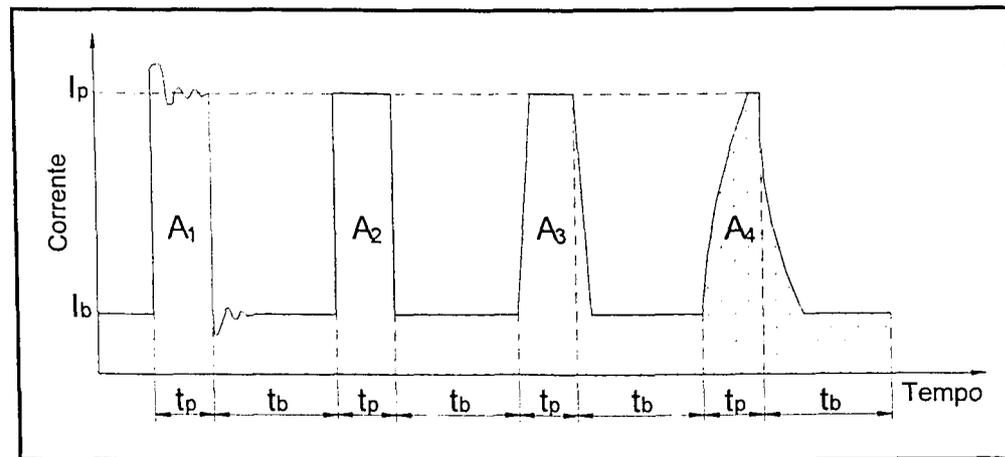


Figura 2.15 - Influência da dinâmica da fonte, onde $A_1 \neq A_2 \neq A_3 \neq A_4$.

Com esse pensamento, se os mesmos níveis de energia (mesmas correntes médias) sejam ajustados, a dinâmica da fonte deixaria de afetar o processo. Gonzalez & Machado (1997), soldando ER70S-6 com Ar+4%CO₂, através de um microcomputador, um conversor D/A e um software desenvolvido em "C", controlaram uma fonte inversora, enviando sete diferentes formas de onda (retangular, trapezoidal, dente de serra, composta crescente, composta decrescente, combinada e triangular), com quatro diferentes frequências (25, 50, 75 e 100 Hz). Estes diferentes formatos de onda simulam diferentes dinâmicas de fontes. Em todos os formatos de onda, a área abaixo do pulso foi a mesma, ou seja, garante-se uma mesma corrente média para todas as formas de onda em cada frequência. Foram realizadas 28 soldas (projeto fatorial completo), investigando-se a eficiência de fusão, baseada medição da área transversal fundida do metal de base e do reforço. Os resultados mostraram que a eficiência de fusão é fortemente influenciada pela forma de onda obtida na saída da fonte de soldagem, para um mesmo valor de energia média de soldagem. Entretanto, estes autores não analisaram a influência da corrente efetiva.

Além dos aspectos apresentados, gotas menores são obtidas para respostas dinâmicas rápidas. Esta característica tem sido associada ao fato da existência de um mecanismo de choque físico gerado por variações rápidas que ocorrem na coluna do arco (Richardson et al, 1994).

✓ Influência do ciclo de trabalho (CT)

Kim & Eagar (1993b) afirmam que em arame ER70S-3, sempre que o ciclo de trabalho for maior que 10%, sempre ocorrerá a transferência goticular com alongamento (item 2.2.1) e

que este tipo de transferência amplia a região onde é possível se obter UGPP. Este aumento se torna mais pronunciado quando CT for igual a 20%. Com o aumento do ciclo de trabalho, o alongamento do eletrodo fica maior e o tamanho da gota, para uma dada condição de equilíbrio, é reduzido. Apesar da transferência com alongamento aumentar a região de UGPP, o controle sobre o processo torna-se difícil (Kim & Eagar, 1993b).

Com relação a efeitos na geometria do cordão, Subramaniam (1996) encontrou que o ciclo de trabalho não possui efeito sobre a penetração, mas tende a aumentar a largura do cordão.

✓ Influência da frequência de pulso (F)

Subramaniam (1996) mostrou que a frequência de pulso influi no controle do destacamento, na medida em que as altas frequências (400 Hz) os parâmetros de pico governam a transferência, e em baixas frequências (150 a 225 Hz) os parâmetros de base são mais significantes. Além disso, Subramaniam encontrou que um aumento da frequência proporciona uma redução na penetração, entretanto não possui efeito sobre a largura do cordão. Isto pode ser explicado pelo fato de que com um aumento na frequência, várias gotas começam a ser destacadas durante o período de base com baixas velocidades. Estas gotas mais lentas resultam numa menor penetração.

✓ Influência de outros parâmetros

Ghosh (1995) definiu um fator ϕ , que é uma função não expressa de I_p , I_b , F e t_b para a soldagem de alumínio ER 5556, diâmetro 1,6 mm com Ar puro. Este fator foi correlacionado juntamente com a corrente média, com a penetração, diluição e com o nível de porosidades. As soldagens foram realizadas tanto por simples deposição quanto em multipasses. Tanto na soldagem por simples deposição, quanto em multipasses, encontrou-se que a penetração e a diluição são inversamente proporcionais a ϕ e diretamente proporcionais à corrente média. Já o nível de porosidades é diretamente proporcional a ϕ e não é afetado pela corrente média.

Smati (1986) encontrou que um correto ajuste dos parâmetros de pulso não é afetado em soldagens posicionais. Modelando o processo usando análise fatorial e regressão múltipla, o autor conclui que as dimensões do cordão podem ser controladas em uma grande faixa com precisão ajustando as velocidades de alimentação e de soldagem, sem alterar os parâmetros de pulso necessários para uma transferência adequada.

Como pode-se perceber, existe uma complexa inter-relação entre os vários parâmetros do processo, o que torna difícil uma seleção adequada. Assim, foram propostos modelos (Subramaniam et al, 1998; Richardson et al, 1994; Norrish, 1992 e Allum, 1985) para selecionar adequadamente os vários parâmetros do processo a partir de certos critérios (Rajasekaran et

al, 1998 e Alcan, 1993). Estes critérios e modelos serão objeto de um estudo detalhado no próximo item.

2.4 Critérios e modelos para o MIG pulsado

Com a introdução do MIG pulsado houve a necessidade do ajuste de novas variáveis do processo, além daquelas já existentes no MIG convencional, o que torna difícil o ajuste correto dos parâmetros para conseguir uma solda de qualidade (Nixon & Norrish, 1988). Além disso, não é possível arbitrar valores para estas variáveis, pois para cada condição de soldagem (material de base, material e diâmetro de eletrodo, tipo de gás, ...) existe uma combinação mais efetiva (Norrish, 1992). Assim, torna-se necessário criar modelos, regidos por equações, que buscam calcular os parâmetros de pulso da onda em função das variáveis do processo. Estes modelos foram construídos a partir de certos critérios, que também seguem as premissas do processo pulsado já apresentadas. Os critérios correntemente utilizados para se modelar o processo pulsado são conhecidos como critério da taxa de fusão, critério do destacamento e critério ou condição para a estabilidade do arco (Rajasekaran et al, 1998; Alcan, 1993; Norrish, 1992 e Allum, 1985). Além dos modelos gerados por tais critérios, outros modelos que propõem novas relações entre os parâmetros serão também apresentados.

2.4.1 Critério da taxa de fusão

A taxa de fusão do eletrodo durante o processo MIG convencional (corrente constante e contínua) pode ser modelado empiricamente por uma simples expressão que relaciona constantes de materiais, corrente e comprimento do eletrodo. Este modelo foi desenvolvido a partir da discretização do arco de soldagem e do eletrodo como um conjunto de resistências (Figura 2.16).

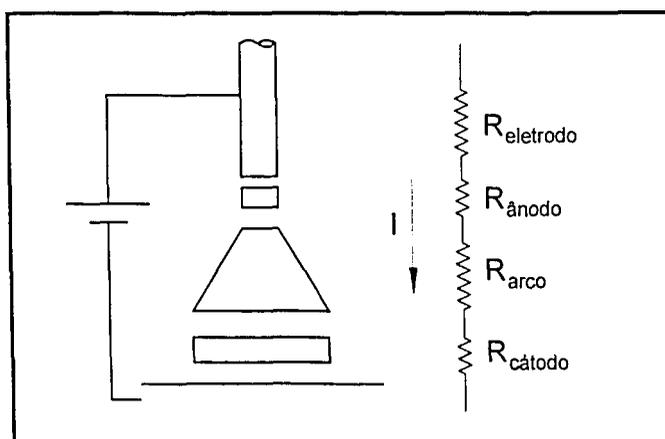


Figura 2.16 - Modelagem do arco e do eletrodo como um conjunto de resistências.

A potência total (P_{Total}) é consumida sob a forma de calor, luz e outras formas de energia e pode ser representada pela Equação 2.4 e estendida como na Equação 2.5.

$$P_{Total} = (\sum \Delta V).I ; \quad (2.4)$$

$$P_{Total} = (\Delta V_{eletrodo} + \Delta V_{ânodo} + \Delta V_{arco} + \Delta V_{cátodo}).I . \quad (2.5)$$

A parcela da geração de calor que efetivamente é gasta para consumir o eletrodo é representada por duas quedas de tensão: a queda de tensão no eletrodo, devido ao Efeito Joule, e a queda na região anódica, devido às reações existentes nessa região. Assim, a Equação 2.5 toma a forma da Equação 2.6. Considerando-se o efeito ôhmico, pode-se chegar a Equação 2.7, onde R representa a resistência elétrica do eletrodo.

$$P_{consumo} = \Delta V_{ânodo} . I + \Delta V_{eletrodo} . I ; \quad (2.6)$$

$$P_{consumo} = \Delta V_{ânodo} . I + R.I^2 . \quad (2.7)$$

Os termos da Equação (2.7) podem ser renomeados para chegar à equação proposta por Lesnewich (1958) e definida na Equação (2.8), onde a queda de tensão no ânodo pode ser representada por uma constante α que caracteriza as reações que ocorrem no ânodo, sendo uma função do tipo de gás de proteção, tipo de eletrodo e polaridade utilizada. Já a queda de tensão no eletrodo representa o Efeito Joule, sendo influenciada pelas características do eletrodo (diâmetro, comprimento e material), que estão representadas pelo produto de uma constante β e o comprimento ℓ do eletrodo, que depende do ponto onde é efetuado o contato elétrico entre o bico e o eletrodo, não sendo necessariamente o comprimento livre do eletrodo (Richardson et al, 1994). Finalmente, o consumo é representado pela taxa de fusão (TF).

$$TF = \alpha.I + \beta.\ell.I^2 . \quad (2.8)$$

As constantes α e β , utilizadas nesta Equação 2.8, que relacionam a taxa de fusão com a corrente média são determinadas de forma experimental. Na Tabela 2.1, são mostradas estas constantes determinadas por vários autores a partir da soldagem em fontes tensão constante, operando com corrente constante e contínua. Fica claro pela análise desta tabela a dependência com relação ao material, diâmetro e comprimento do eletrodo e gás de proteção. Como era esperado, a constante β possui maior valor para o aço inoxidável e menor valor para o alumínio, pois estes materiais apresentam a maior e a menor resistividade respectivamente.

Tabela 2.1 - Valores para as constantes α e β encontradas na literatura, para a Equação 2.5.

Autor	Eletrodo			Gás de proteção	α [m.s ⁻¹ .A ⁻¹]	β [A ⁻² .s ⁻¹]
	Material	d_e [mm]	ℓ [mm]			
Scotti (1998)	Aço	0,9	6	Ar	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$29,4 \cdot 10^{-5}$
	Inoxidável			Ar + 1%O ₂	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$29,8 \cdot 10^{-5}$
	304L			Ar + 2%O ₂	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$27,5 \cdot 10^{-5}$
Richardson et al (1994)	Aço carbono	0,8	15	Ar + 5%CO ₂ +1,5%O ₂	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$35,0 \cdot 10^{-5}$
Alcan (1993)	ER 5556	1,6	3	Ar	$5,5 \cdot 10^{-4}$	desprezível (zero)
			5		$5,3 \cdot 10^{-4}$	
			10		$5,1 \cdot 10^{-4}$	
	ER 4043	1,2	3		$7,3 \cdot 10^{-4}$	$-8,3 \cdot 10^{-5}$
			5		$7,25 \cdot 10^{-4}$	$-5,0 \cdot 10^{-5}$
			10		$7,2 \cdot 10^{-4}$	$-2,5 \cdot 10^{-5}$
Dutra (1989)	Aço carbono	1,0	10	Ar+5%CO ₂	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Fujimura et al (1987)	Aço carbono	0,9	7,5	Ar	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
		1,2	a	+	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
		1,6	27,5	20%CO ₂	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$

Scotti (1998) determinou estas constantes através da técnica estatística de regressão múltipla aplicada aos seus resultados da taxa de fusão em função da corrente média. Santos (1986) também utilizou regressão múltipla em condições similares (variando-se a corrente média para três diâmetros de arames diferentes soldando aço inoxidável 304L com gás Ar + 2%O₂), entretanto usando o processo com corrente pulsada como mostra a Tabela 2.2. Dessa forma, resta saber se as constantes α e β são influenciadas pela forma de onda do processo, pois ao se comparar os resultados obtidos por Scotti e Santos, admitindo uma variação linear para os dados do diâmetro de 0,8 e 1,0 mm de Santos, nota-se que estas constantes são diferentes.

Rajasekaran et al (1998) mostraram, através da Figura 2.17, que há diferença na taxa de fusão para uma mesma corrente média entre o processo pulsado e o convencional, o que representa constantes diferentes. A taxa de fusão só é igual entre os dois processos quando as correntes são iguais à de transição determinada por este autor (150 A) e que a relação taxa de fusão por ampere para o processo pulsado é maior para correntes médias abaixo da transição. Assim, mais energia é transferida para o eletrodo no processo pulsado que no convencional a correntes médias menores que a de transição.

Tabela 2.2 - Constantes α e β para aço inoxidável 304L com $I_p = 280$ A, $t_p = 4$ ms, $I_m/F = 1,4$ e $\ell = 15$ mm (Santos, 1986).

d_e [mm]	α [$m \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}$]	β [$A^{-2} \cdot s^{-1}$]
0,8	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$31,2 \times 10^{-5}$
1,0	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$14,1 \times 10^{-5}$
1,2	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \times 10^{-5}$

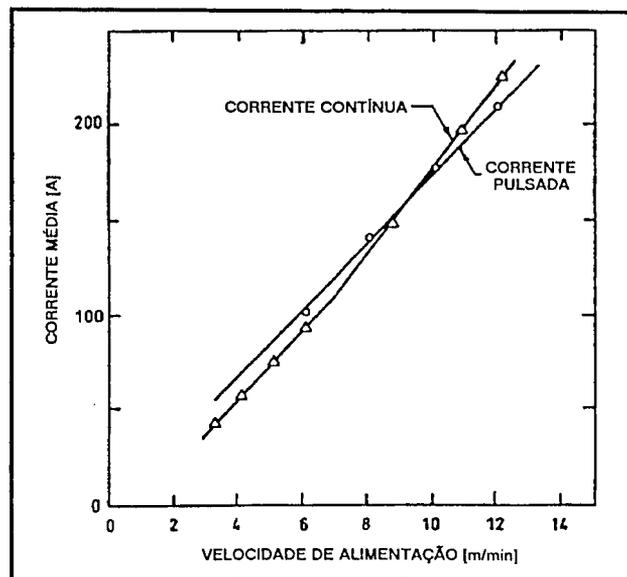


Figura 2.17 - Características de fusão para corrente contínua e pulsada usando eletrodo ER 5356 de 1,2 mm (Rajasekaran et al, 1998).

Deve-se ressaltar que a Equação 2.8 é normalmente utilizada atribuindo-se ao valor da corrente, o valor da corrente média (I_m), que para um processo convencional com transferência goticular é próxima da corrente efetiva (I_{ef}) (Richardson et al, 1994). Já para o processo pulsado, a corrente média é diferente da corrente efetiva, podendo ser calculadas pela integral da corrente no tempo como mostram as equações 2.9 e 2.10.

$$I_m = \frac{1}{T} \int I \cdot dt ; \quad (2.9)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int I^2 \cdot dt} . \quad (2.10)$$

Baseando-se na corrente média e na corrente efetiva, pode-se calcular uma taxa de fusão média (\overline{TF}), conforme mostrado a seguir.

$$\overline{TF} = \int TF \cdot dt = \alpha \cdot \int I \cdot dt + \beta \cdot l \cdot \int I^2 \cdot dt ; \quad (2.11)$$

$$\overline{TF} \cdot T = \alpha \cdot I_m \cdot T + \beta \cdot l \cdot I_{ef}^2 \cdot T ; \quad (2.12)$$

$$\overline{TF} = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot l \cdot I_{ef}^2 . \quad (2.13)$$

Na soldagem MIG é muito importante que a taxa de fusão se iguale à velocidade de alimentação do arame, de forma a manter o comprimento do arco constante. Se existir qualquer diferença entre a velocidade de alimentação (V_{alim}) e a taxa de fusão, o arco se torna instável, causando a queima do bico ou colagem do eletrodo, o que resulta em perda de produtividade e qualidade do processo. Dessa forma, a Equação 2.13 pode ser escrita na forma da Equação 2.14, que representa o modelo obtido para o *Critério da Taxa de Fusão*.

$$V_{alim} = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot l \cdot I_{ef}^2 . \quad (2.14)$$

Pela Equação 2.14 pode-se perceber que o critério da taxa de fusão é dependente da forma real do sinal elétrico. Esta dependência deve-se ao fato de que, devido às características dinâmicas da fonte, o sinal da corrente no tempo não é uma onda perfeitamente retangular. Assim, existem três modelos propostos, que utilizando de simplificações, descrevem o comportamento da corrente no tempo, conforme mostra a Figura 2.18 (Bálsamo et al, 1999 e Richardson et al, 1994). Portanto, existem três formas de se calcular a corrente média a partir da Equação 2.9, que foram estudadas por Bálsamo et al (1999) e são apresentadas nas Equações 2.15, 2.16 e 2.17.

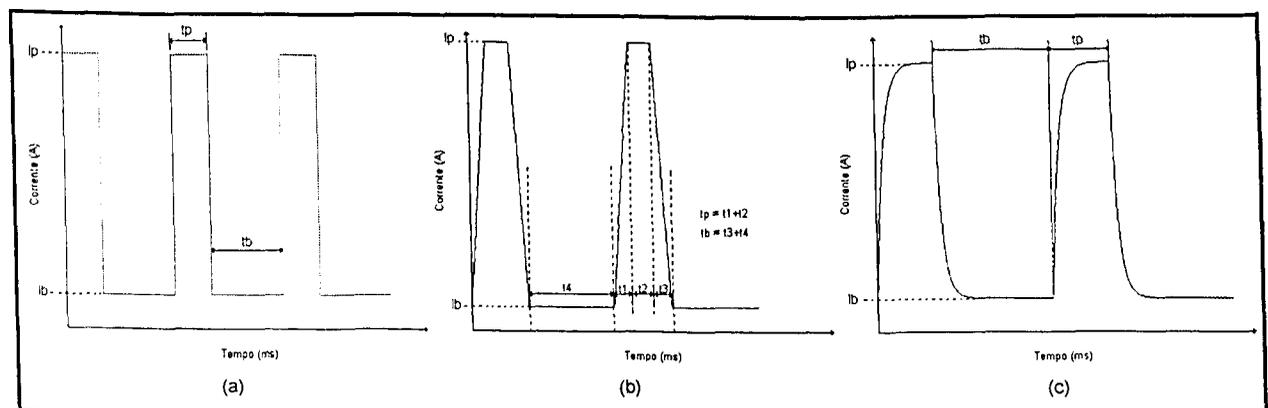


Figura 2.18 - Diferentes formatos de onda para corrente pulsada (Bálsamo et al, 1999): (a) Perfeitamente retangular; (b) Trapezoidal; (c) Exponencial.

➤ Formato de onda retangular (I_{m_ret})

$$I_{m_ret} = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} ; \quad (2.15)$$

➤ Formato de onda trapezoidal (I_{m_trap})

$$I_{m_trap} = \frac{\frac{t_1 \cdot (I_p - I_b)}{2} + t_2 \cdot (I_p - I_b) + \frac{t_3 \cdot (I_p - I_b)}{2} + I_b \cdot (t_p + t_b)}{(t_p + t_b)} ; \quad (2.16)$$

➤ Formato de onda exponencial (I_{m_exp})

$$I_{m_exp} = \frac{I_p \cdot t_p - \frac{(I_p - I_b)}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 \cdot t_p}) + I_b \cdot t_b - \frac{(I_b - I_p)}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 \cdot t_b})}{T} ; \quad (2.17)$$

onde λ_1 e λ_2 são constantes exponenciais do formato de onda exponencial;
 t_1 , t_2 e t_3 são tempos para definir o formato de onda trapezoidal (Figura 2.18).

Da mesma forma, existem três modos de se calcular a corrente efetiva. Como as equações são de tamanho considerável, é apresentada na Equação 2.18 somente a corrente efetiva para o modelo de onda retangular, obtido a partir da Equação 2.10.

$$I_{ef_ret} = \sqrt{\frac{I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b}{t_p + t_b}} . \quad (2.18)$$

Assim, a Equação 2.14 passa a ser escrita em função dos modelos para as correntes médias, mostrados nas equações seguintes. Lembrando que dl/dt é a taxa de variação da corrente no tempo, sendo assumida igual para a subida e descida da corrente em ambos os trabalhos de Bálamo et al (1999) e Richardson et al (1994).

➤ Modelo não linear, baseado no formato de onda retangular ($V_{a_ret_nlin}$)

$$V_{a_ret_nlin} = \alpha \cdot I_{m_ret} + \beta \cdot \ell \cdot \left(I_{m_ret}^2 + \frac{(I_p - I_b)^2 \cdot t_p \cdot t_b}{(t_p + t_b)^2} \right) ; \quad (2.19)$$

➤ Modelo não linear, baseado no formato de onda trapezoidal (V_{a_trap})

$$V_{a_trap} = \alpha I_{m_trap} + \beta \cdot \ell \cdot \left\{ I_{m_trap}^2 + \frac{(I_p - I_b)^2 \cdot t_p \cdot t_b}{(t_p + t_b)^2} - \frac{(I_p - I_b)^3}{3 \cdot (t_p + t_b) \cdot \frac{dl}{dt}} \right\} ; \quad (2.20)$$

➤ Modelo não linear baseado no formato de onda exponencial (V_{a_exp})

$$V_{a_exp} = \alpha \cdot I_{m_exp} + \frac{\beta \cdot l}{T} \cdot \left[\begin{aligned} & I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b - \frac{(I_p - I_b)}{e^{\lambda_1 t_p} \cdot \lambda_1} \left(\frac{(I_p - I_b)}{2 \cdot e^{\lambda_1 t_p} \cdot \lambda_1} + 2 \cdot I_p \right) - \\ & - \frac{(I_b - I_p)}{e^{\lambda_2 t_b} \cdot \lambda_2} \left(\frac{(I_b - I_p)}{2 \cdot e^{\lambda_2 t_b} \cdot \lambda_2} - 2 \cdot I_b \right) - \frac{(I_p - I_b)}{e^{\lambda_1 t_p} \cdot \lambda_1} \cdot (3 \cdot I_p + I_b) - \\ & - \frac{(I_b - I_p)}{2 \cdot \lambda_2} \cdot (3 \cdot I_b + I_p) \end{aligned} \right] \quad (2.21)$$

Estas três equações são referenciadas como modelos não lineares para o critério da taxa de fusão, pois muitos autores (Alcan, 1933; Dutra, 1989 e Allum, 1985) simplificam esta equação, obtendo uma relação linear do tipo " $V_{alim} = \alpha \cdot I_m + constante$ " entre a velocidade de alimentação e a corrente média. Esta simplificação parte da Equação 2.14 para a forma de onda da corrente perfeitamente retangular. Substituindo a Equação 2.14 com as Equações 2.15 e 2.18 obtém-se a Equação 2.22.

$$V_{a_ret_lin} = \frac{\alpha \cdot (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b)}{T} + \frac{\beta \cdot l \cdot (I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b)}{T} \quad (2.22)$$

Assumindo a simplificação mostrada na Equação 2.23, ou seja, que o produto da corrente ao quadrado pelo tempo é mais significativo para os parâmetros de pico ($I_p^2 \cdot t_p \gg I_b^2 \cdot t_b$), chega-se à Equação (2.24).

$$I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b \cong I_p^2 \cdot t_p; \quad (2.23)$$

$$V_{a_ret_linear} = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot l \cdot \frac{I_p^2 \cdot t_p}{T} \quad (2.24)$$

Na Equação 2.24, assume-se que para uma determinada condição de soldagem o produto $I_p^2 \cdot t_p$ é uma constante (Dutra, 1989). Dessa forma, chega-se a um modelo linear baseado no formato de onda retangular, que é o empregado comercialmente em fontes que utilizam o chamado comando sinérgico para selecionar os parâmetros de pulso (Bálsamo et al, 1999), como será descrito no item 2.6. Esta constante, que representa o produto $I_p^2 \cdot t_p$, é denominada de constante de destacamento (D) e será caracterizada a partir do modelo obtido do próximo critério (critério de destacamento).

Dentro do modelo da taxa de fusão é calculado o tamanho da gota do metal fundente. Como já discutido, não é de consenso se o tamanho da gota deve ser igual ao do eletrodo, ou se há faixas de utilização do processo pulsado em função do volume/diâmetro da gota. De qualquer forma, vários autores (Rajasekaran et al, 1998; Alcan, 1993 e Dutra, 1989) calculam o

diâmetro/volume de gota desejado. O modelo se baseia no volume destacado do eletrodo (cilindro) que deve ser igual ao volume da gota (esfera), como mostra a Figura 2.19. Levando-se em conta a velocidade de alimentação do eletrodo e o período de pulsação, para que este cilindro se torne uma gota, chega-se à Equação 2.25. Nesta equação, calcula-se o período de pulso (T) a ser utilizado para se obter um determinado volume de gota.

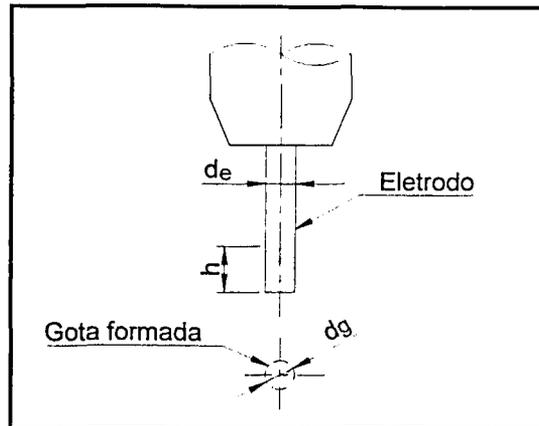


Figura 2.19 - Análise esquemática da relação entre o volume da gota e da ponta fundida do arame.

$$T = \frac{240.V_{ol_gota}}{\pi.d_e^2.V_{alim}} \quad (2.25)$$

onde $V_{ol_gota} = \frac{\pi}{6}.d_g^3$ é o volume da gota desejado [mm^3];
 d_g é o diâmetro da gota [mm];
 d_e é o diâmetro do eletrodo [mm];
 T é o período [ms];
 V_{alim} é a velocidade de alimentação [m/min].

Um erro introduzido nesta equação remete ao fato do volume da gota ser igual ao do eletrodo, quando na verdade é a massa destacada de eletrodo que é igual à massa da gota formada. Assim, Stenbacka & Persson (1989) introduzem um coeficiente de ajuste na Equação 2.23 que pode ser encarada como a relação entre as densidades do sólido e do líquido do material do eletrodo.

2.4.2 Critério de destacamento ou da energia do processo

Vários autores (Grubic & Andric, 1995; Norrish, 1988 e Allum, 1985) têm sugerido que a condição mais adequada para se conseguir uma transferência mais estável é a de uma gota se transferindo ao final de cada pulso (UGPP). Tem sido mostrado também (Nixon & Norrish,

1988) que, na maioria das condições, baixas correntes de base tem pouco efeito no desempenho da transferência. Para uma determinada combinação de materiais e gás de proteção, transferências similares são obtidas para combinações de parâmetros de pico, que seguem a Equação 2.26.

$$I_p^n \cdot t_p = D \quad (2.26)$$

Como esta equação retrata o fato de se conseguir UGPP e que esta se destaque ao final do pico, ela passa a representar o *Critério de Destacamento* (Rajasekaran et al, 1998) ou *Critério da Energia do Processo* (Subramaniam, 1996). Este critério, além de definir o instante de destacamento, também define a energia despendida no processo, pois a forma de se controlar o fluxo de material, para se obter UGPP, é através da medida da energia gasta. Se a combinação entre I_p e t_p proporcionar uma energia insuficiente, uma gota não se destaca por pulso e o processo de soldagem se torna irregular (Rajasekaran et al, 1998). Ao se observar a Figura 2.20 pode-se inferir que diferentes relações entre corrente e tempo de pico são utilizadas, podendo-se obter a mesma área, ou seja, a mesma energia despendida para proporcionar a transferência. Desse modo o produto $I_p^n \cdot t_p$ pode ser considerado uma constante de transferência (D). O expoente n aparece em decorrência da não linearidade do processo.

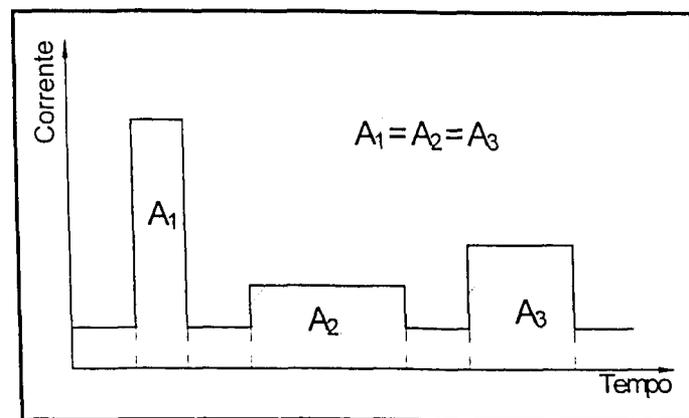


Figura 2.20 - Várias formas de onda com o mesmo gasto de energia para o destacamento.

A determinação da região que satisfaz a premissa de uma gota por pulso, hachurada na Figura 2.21, é realizada através da solução matemática do modelo proposto na Equação 2.26, ou seja, deve-se determinar D e n para descrever os limites de contorno esquerdo (n_e , D_e) e direito (n_d , D_d) entre três modos de transferência (Subramaniam et al, 1998):

- Destacamento ocorrendo após mais de um pulso (menos de UGPP);
- Uma gota por pulso (igual a UGPP);
- Múltiplos destacamentos por pulso (mais de UGPP).

As constantes D e n são obtidas experimentalmente, sendo uma função da composição do material, diâmetro do eletrodo e gás de proteção. Assim, faz-se necessário a realização de experimentos que, baseados na detecção do instante de destacamento através das várias técnicas experimentais descritas no item 2.3.2, possam determinar os valores destas duas constantes. Entretanto, alguns autores (Dutra, 1989; Nixon & Norrish, 1988; e Allum, 1985) assumem " $n = 2$ ", ou seja, " $D = I_p^2 \cdot t_p$ ", de tal sorte que a Equação 2.24 se torne uma relação linear entre a velocidade de alimentação e a corrente média, sendo função somente das constantes α e β , do comprimento do eletrodo (ℓ) e do período de pulso (T), que, por sua vez, pode ser calculado pela Equação 2.25. A constante D passa a ser representada apenas por pares I_p e t_p , que estes autores apresentam para vários materiais e diâmetros de eletrodo.

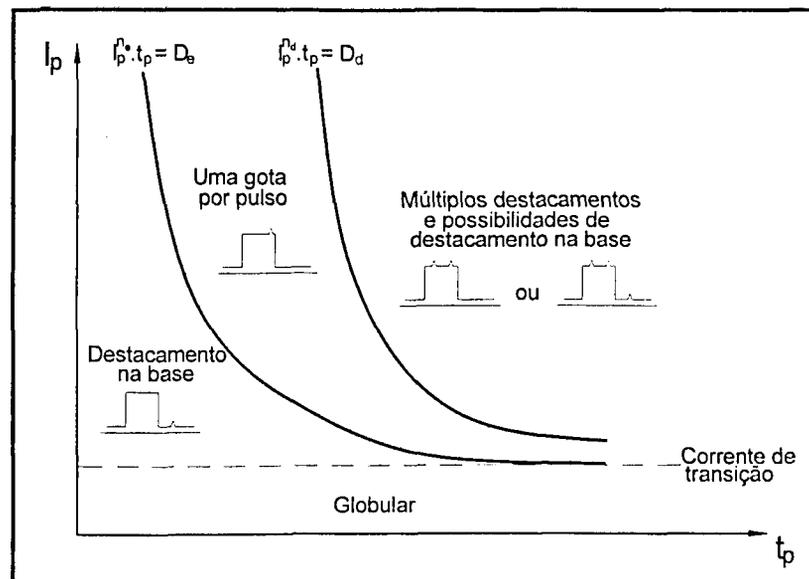


Figura 2.21 – Influência dos parâmetros de pico na transferência metálica (Elliott, 1985).

Existem três metodologias para cálculo de D e n e a conseqüente identificação dos contornos da região de UGPP (Figura 2.21), que são baseadas na análise dos oscilogramas de tensão e corrente na forma contínua e pulsada e através de Shadowgrafia.

✓ Análise dos oscilogramas de tensão e corrente na forma de onda pulsada

Nesta metodologia, o primeiro passo é determinar a corrente de transição (Nixon & Norrish, 1988), através dos oscilograma de tensão (item 2.3.2), pois há a premissa de que I_p deve ser maior que esta corrente. Uma vez determinada a corrente de transição, é necessário a utilização de uma fonte onde o ajuste dos parâmetros da corrente possam ser ajustados independentemente da velocidade de alimentação. Fixando valores usuais para os parâmetros de base (Tabela 2.3), por nesta abordagem não influenciarem a transferência metálica, varia-se o valor de I_p de 25 em 25 A e o valor de t_p de 0,5 em 0,5 ms (Nixon & Norrish, 1988). Varia-se

também o valor da velocidade de alimentação em função da corrente média obtida de forma a manter o comprimento do arco constante e determina-se o instante do destacamento através do oscilograma de tensão.

Tabela 2.3 - Valores usuais para os parâmetros de base.

Material	Diâmetro [mm]	I_b [A]	t_b [ms]	Autor
Alumínio	1,2	20	6	Rajasekaran et al (1998)
Aço carbono	1,2	50	15 - 20	Nixon & Norrish (1988)
Aço Inoxidável	1,0	30	10	Santos (1986)

Dutra (1989) em seus trabalhos determinou, através da análise do sinal de corrente e tensão em uma fonte transistorizada analógica, o valor de $D = 236 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ para arame ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm e gás de proteção Ar + 5% CO_2 . Logo, foi considerado neste trabalho a simplificação " $n = 2$ ".

Grubic & Andric (1995) através de experimentação também obteve soluções para a Equação 2.26, ou seja, calculou os valores de D e n para duas condições de soldagem, sendo o modo de transferência metálica também estudado através dos oscilogramas de tensão e corrente. Para este estudo, ele utilizou uma fonte transistorizada analógica e um osciloscópio ligado a uma impressora. Na Figura 2.22, estão apresentados os valores destas constantes obtidos para dois eletrodos de AlMg5 com diferentes diâmetros.

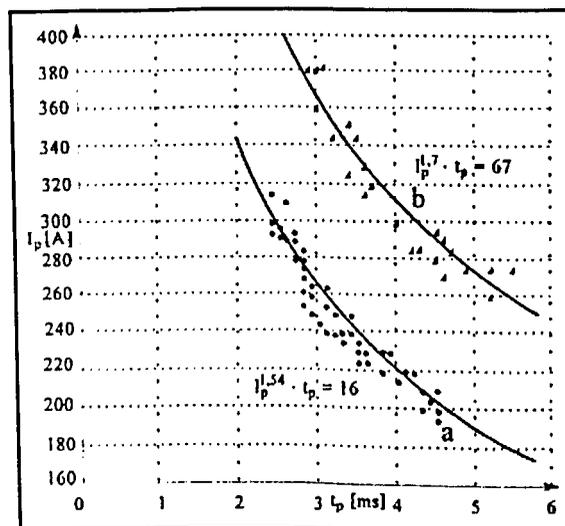


Figura 2.22 - Relação entre I_p e t_p para AlMg5 diâmetros: (a) 1,2 mm; (b) 1,6 mm para destacamentos ocorrendo ao fim de cada pico (Grubic & Andric, 1995).

Santos (1986) determinou o valor de D e n utilizando o oscilograma da tensão para o aço inoxidável em três diferentes diâmetros de arame (0,8, 1,0 e 1,2 mm) e com gás de

proteção Ar + 2%O₂. Foram determinados seis diferentes valores para estas constantes (Tabela 2.4), que expressam os dois limites de contornos (esquerda e direita) da Figura 2.26.

Tabela 2.4 - Resultados experimentais de Santos (1986).

Material	Gás	d_e [mm]	Contorno	D [A ^{<i>n</i>} .ms]	Equação
Aço inoxidável 304	Ar + 2%O ₂	0,8	Esquerda	0,931	$l_p^{1,033} \cdot t_p = 0,931$
			Direita	0,201	$l_p^{0,630} \cdot t_p = 0,201$
		1,0	Esquerda	0,997	$l_p^{1,034} \cdot t_p = 0,997$
			Direita	0,238	$l_p^{0,680} \cdot t_p = 0,238$
		1,2	Esquerda	0,568	$l_p^{0,882} \cdot t_p = 0,568$
			Direita	0,393	$l_p^{0,730} \cdot t_p = 0,393$

✓ Análise dos oscilogramas de tensão e corrente na forma de onda contínua e constante

Um outro método para se determinar o valor de D , utiliza-se de uma forma de onda contínua e constante, como apresentado em Rajasekaran et al (1998), Alcan (1993) e Dutra (1989). Este método consiste inicialmente em utilizar um corrente pulsada para se determinar o valor de n , fixando-se a velocidade de alimentação e os parâmetros de base (l_b e t_b) e variando-se os parâmetros de pulso (l_p e t_p). Dessa forma, obter-se-á várias condições de destacamentos (transferência) em diferentes comprimentos de arco³, denominadas destacamento na base, destacamento de uma gota no pico, destacamento de duas gotas no pico e destacamento de três gotas no pico. Estes destacamentos são monitorados através do oscilograma de tensão. Nesta primeira etapa não se considera o tamanho da gota, mas somente a característica do seu destacamento.

Após a execução dos ensaios, traça-se o gráfico l_p versus t_p para os diferentes tipos de destacamento, conforme mostra a Figura 2.23. Estas curvas foram obtidas para a soldagem da liga de alumínio AA 5083 (AlMg) com arame ER 5356 de 1,2 mm. Como as escalas dos eixos estão sob a forma logarítmica, as curvas obtidas são retas e possuem a mesma inclinação de 1,7, que é o valor de n . Nesta figura são mostrados valores que numa primeira vista poderiam ser utilizados como valores de constante de destacamento (34, 40, 50 e 62 A^{1.7}s). Entretanto, numa análise mais profunda, o valor de 40 A^{1.7}s, não pode ser utilizado como valor de D , pois, apesar de satisfazer a condição de UGPP, não satisfaz a segunda condição de diâmetro do eletrodo igual ao diâmetro da gota, lembrando que nesta primeira etapa não se levou em conta o volume da gota.

³ O comprimento do arco varia, pois a corrente média é alterada e a velocidade de alimentação é mantida constante.

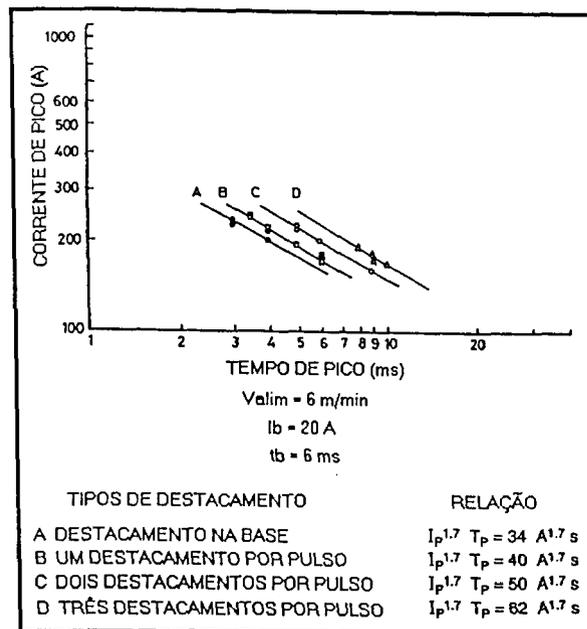


Figura 2.23 - Relação entre I_p e t_p para diferentes tipos de destacamento (Rajasekaran et al, 1998).

Determinado o valor de n , o próximo passo é a execução de soldas com transferência goticular, utilizando uma forma de onda de corrente constante e contínua. Poucos experimentos são feitos através da variação da velocidade de alimentação (e da corrente), de forma a manter a taxa de fusão constante e, conseqüentemente, o comprimento do arco. Através do oscilograma da tensão, determina-se o intervalo entre os vários destacamentos existentes, conforme mostra a Figura 2.4a. Os vários intervalos de tempo obtidos, para uma mesma corrente, são distribuídos na forma de histograma (Figura 2.24), e aquele que apresentar maior repetibilidade é considerado como o tempo de destacamento modal (T_{MD}).

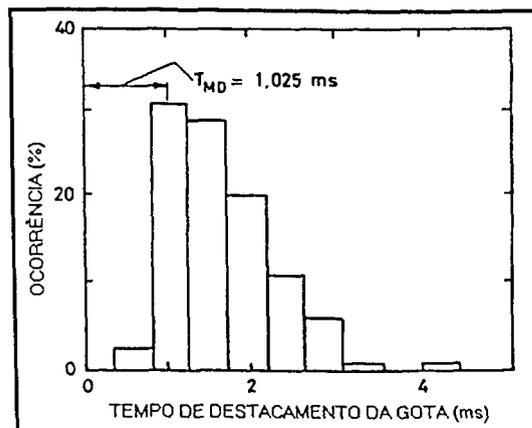


Figura 2.24 - Distribuição em frequência dos intervalos de tempo de destacamento (Rajasekaran et al, 1998).

Para cada corrente utilizada é determinado um tempo de destacamento modal. A partir do tempo de destacamento modal é possível determinar o volume de destacamento modal da gota (V_{MD}) formada na transferência goticular a partir da Equação 2.23, onde o período é o tempo de destacamento modal. Determinando-se os vários volumes obtidos em função dos vários tempos de destacamento modal e várias correntes, pode-se verificar qual o volume modal que é igual ao volume obtido a partir do diâmetro do eletrodo (1,2 mm), ou seja, de forma a se obter um diâmetro de gota igual ao do eletrodo, que neste caso é $0,905 \text{ mm}^3$.

A partir do valor de $0,905 \text{ mm}^3$, obtém-se a corrente que nas condições utilizadas fornece uma gota de diâmetro igual ao do eletrodo no modo goticular com forma de onda de contínua e constante. No trabalho de Rajasekaran et al (1998), a corrente que proporcionou um volume de gota igual a $0,905 \text{ mm}^3$, ou seja, com diâmetro igual a 1,2mm foi de 150 A. Finalmente, a partir desta corrente determinada e do tempo modal que levou a este volume ($T_{MD}=5,5 \text{ ms}$), pode-se calcular o valor da constante de transferência D , substituindo $I_p = 150 \text{ A}$ e $t_p = 5,5 \text{ ms}$ na Equação 2.24. Rajasekaran et al encontraram $D = 27,5 \text{ A}^{1.7} \text{ s}$.

Dutra (1989) apresenta uma limitação desta metodologia. Soldando ER70S-6 (1,0 mm) em 240 A em corrente contínua, não foi possível identificar tempos de destacamentos modais, por serem muito pequenos, ou seja, diâmetros das gotas muito pequenos.

✓ Visualização das gotas transferidas através da Shadowgrafia e Shadowgrafia sincronizada

Santos (1986) confirmou alguns de seus experimentos obtidos pela análise do oscilograma de tensão na forma pulsada, medindo apenas a frequência de destacamento. Assim foi possível determinar se estava havendo mais ou menos de uma gota por período, ou exatamente uma gota por período. Entretanto, não é possível se determinar onde ela se destacou. Subramaniam (1996) fez uso da Shadowgrafia sincronizada e confirmou seus resultados obtidos pela análise do oscilograma de tensão na forma pulsada. Entretanto, o autor afirma que analisar somente o oscilograma de tensão é muito mais prático e garante os mesmos resultados obtidos pelo sistema de Shadowgrafia sincronizada que é muito mais caro e que requer análises muito mais complicadas e trabalhosas. Entretanto, este mediu o diâmetro das gotas por Shadowgrafia, o que é mais prático do que se utilizar os tempos de destacamentos modais propostos por Rajasekaran et al (1998), Alcan (1993) e Dutra (1989).

2.4.3 Condição para a estabilidade do arco

As condições de pulso são também limitadas pelo requisito de que a corrente de base deve exceder a um valor mínimo, porque abaixo deste valor o arco torna-se instável (Rajasekaran et al, 1998 e Alcan, 1993). Este limite pode ser expresso pela Equação 2.27 onde C é a corrente de base limite para se ter um arco estável. Em outras palavras, este valor

mínimo limita as condições de pulso estimadas com base nos critérios de fusão e de transferência metálica de forma a que elas também satisfaçam o critério de estabilidade do arco (Alcan, 1993).

$$I_b \geq C . \quad (2.27)$$

De um modo geral, C assume os valores já descritos na Tabela 2.3. Rajasekaran et al (1998) encontrou que este valor mínimo para a corrente de base que garante um regime estável depende da velocidade de alimentação utilizada. Quanto maior a velocidade de alimentação, maior o valor de C .

2.4.4 Novos modelos e relações

Além destes modelos obtidos a partir dos três critérios apresentados, alguns autores propõem novos modelos que levam em conta principalmente os parâmetros de base. Grubic & Andric (1995), além de verificarem a relação exponencial entre I_p e t_p , investigaram a relação existente entre I_b , F e V_{alim} e propõem a Equação 2.28 para eletrodo AlMg5 e diâmetro de 1,2mm, pois na prática ajusta-se normalmente a frequência de pulsação. Os autores concluem que, para um dado tipo e diâmetro do eletrodo, existem relações constantes, que podem ser descritas por modelos matemáticos.

$$I_b = -0,70.F + 20,97.V_{alim} . \quad (2.28)$$

Subramaniam (1996) afirma que os modelos convencionais apresentados não conduzem a bons resultados, quando aplicados numa faixa maior de parâmetros de pulso. Assim, através de regressão múltipla, é proposta a Equação 2.29, que representa os parâmetros de pulso para se obter UGPP para o eletrodo ER 4047 de 1,2 mm de diâmetro e Ar puro. Neste trabalho também foi investigado o uso de redes neurais do tipo "back-propagation" para modelar o processo.

$$I_p.t_p = 3,18e^{-7}(I_b.t_b)^4 - 2,67e^{-4}(I_b.t_b)^3 + 0,062(I_b.t_b)^2 - 2,55(I_b.t_b) + 143,21 . \quad (2.29)$$

Comparando os resultados obtidos pela regressão múltipla com os resultados obtidos pela rede, Subramaniam afirma que a regressão múltipla apresentou baixa precisão para prever a largura (coeficiente de determinação múltipla igual a 0,68) e grande precisão ao prever a penetração do cordão (coeficiente de determinação múltipla igual a 0,97), mas não conseguiu detectar soldagens impossíveis de serem realizadas, devido à combinação indevida dos parâmetros e velocidade de alimentação. Já com a utilização da rede, obteve-se desvios maiores em algumas situações, implicando que esta precisa ser melhor treinada com mais

experimentos. Entretanto, a rede apresentou a capacidade de detectar condições onde não é possível soldar, já que utiliza expressões booleanas em sua função transferência.

Ferreira & Alfaro (1997) também fizeram uso de redes neurais utilizando os parâmetros de soldagem como entrada e a geometria do cordão de solda como a saída desejada. Soldando eletrodo ER70S-6 de 1,0 mm com Ar + 25% CO₂, os autores afirmam que o emprego de redes neurais, como ferramenta computacional em soldagem MIG/MAG pulsada, mostrou-se útil e bastante promissor, pois os resultados obtidos pela rede mostraram que esta possui melhor desempenho que se comparada a modelos já desenvolvidos. Entretanto, quando se faz uso de redes neurais, o estudo da física do processo passa a ser inexistente, já que a função transferência da rede é desconhecida.

Além desses novos modelos baseados em regressão múltipla e redes neurais, Rajasekaran et al (1998) e Alcan (1993) propõem uma nova forma de mapear a região de UGPP, levando-se em conta os três critérios apresentados e a realização de experimentos para delimitar os contornos. Nestes trabalhos são traçados gráficos I_p versus I_b , como mostra a Figura 2.25.

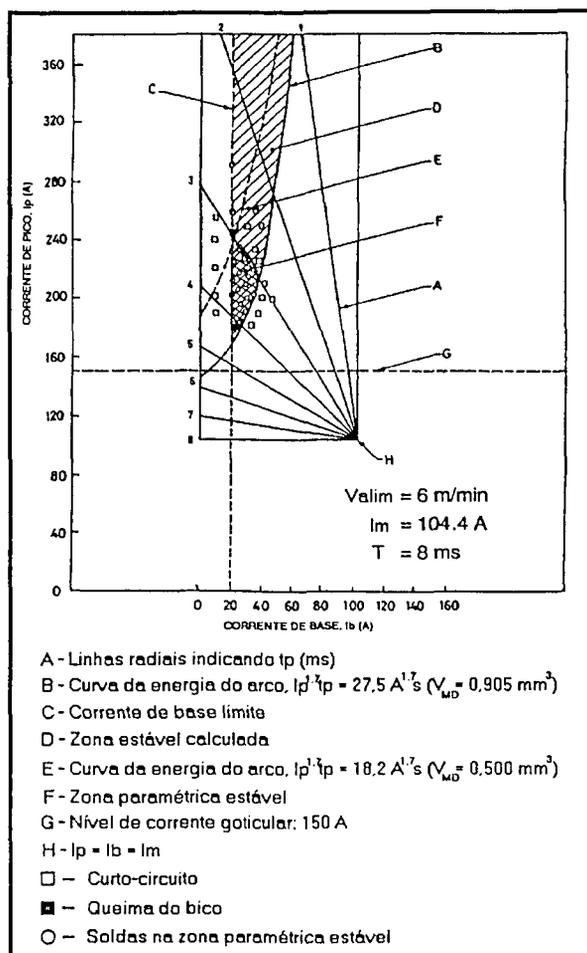


Figura 2.25 - Zona paramétrica estável para eletrodo ER5356 (Rajasekaran et al, 1998).

Nesta figura, pode-se identificar os três critérios:

- Baseando-se no critério de fusão, a velocidade de alimentação utilizada (6 m/min) corresponde a uma única corrente média (104,4 A), ou seja, para cada V_{alim} utilizada deve haver um mapa, o que já representa uma dificuldade de sua utilização;
- Existem duas curvas $I_p^n \cdot t_p$ (critério do destacamento ou da energia), delimitando a região de UGPP ($n_d = 1,7$ e $D_d = 27,5 A^{1,7} \cdot s$; $n_e = 1,7$ e $D_e = 18,2 A^{1,7} \cdot s$). Estas curvas são traçadas substituindo a Equação 2.26 na 2.15, chegando-se na Equação 2.30.

$$\frac{I_b}{I_m} = \frac{\left(\frac{I_p}{I_m} - \frac{T}{D} \cdot I_p^n \right)}{\left(1 - \frac{T}{D} \cdot I_p^n \right)}. \quad (2.30)$$

- Existe uma corrente de base mínima (20 A), que é o critério da estabilidade.

Além destes três critérios que definiram os limites da região de UGPP, foi necessário a realização de experimentos que mostraram que a região é ainda mais restrita. Os limites foram então definidos em função de dois tempos de picos (linhas radiais), que na figura são 3 e 4 ms.

A utilização de todos estes modelos na prática se torna difícil pelo grande número de equações e constantes, que demandam a existência de banco de dados com valores experimentais. Assim, as fontes ditas sinérgicas têm sido desenvolvidas para aprimorar a seleção de parâmetros e promover uma melhor utilização do processo.

2.5 O MIG sinérgico

Apesar das vantagens inerentes do processo MIG pulsado, a complexidade do ajuste dos parâmetros de soldagem demandou o desenvolvimento de equipamentos com "Controles de um Único Botão" ("*Single-knob Controls*") por volta de 1968 (Norrish, 1992). Estes sistemas baseavam-se na seleção de combinações de parâmetros pré-definidos através de um único controle. Entretanto, devido ao número limitado destes parâmetros e limitações da tecnologia das fontes na época, este sistema foi descartado (Norrish, 1992). Um novo avanço foi dado com o chamado "Controle Sinérgico", que proporcionou um ajuste contínuo dos parâmetros do processo numa maior faixa.

O termo *MIG/MAG Sinérgico* foi primeiramente utilizado pelo "*The Welding Institute*", no início dos anos 70, para descrever o melhor método de se comandar o processo MIG/MAG pulsado. Posteriormente, este método denominado erroneamente de "controle" foi definido da seguinte forma: "*Controle Sinérgico engloba qualquer sistema (malha aberta ou fechada) pelo*

qual um parâmetro de pulso significativo é modificado tal que uma condição de equilíbrio (UGPP) é mantida sobre uma faixa de velocidade de alimentação do arame (ou níveis de corrente média)" (Norrish, 1992).

De fato, apesar do termo *controle* ser usado universalmente, o termo "Comando Sinérgico", utilizado por Bálamo et al (1999), parece ser o mais adequado, pois neste sistema um algoritmo computacional calcula as diversas variáveis do processo e as envia para a fonte (comanda a fonte), quer seja num circuito interno, ou externo à fonte. Caso se deseje uma manutenção do comprimento do arco numa fonte operando em corrente constante, deve-se implementar um sistema AVC (controle da tensão do arco), que irá proporcionar uma variação na velocidade de alimentação ou na corrente média para corrigir o comprimento do arco. Assim, uma fonte, que possua microprocessadores capazes de ajustar as variáveis do processo para se conseguir UGPP e um comprimento de arco constante, possui um sistema denominado de "Comando Sinérgico com Controle Adaptativo".

Em um sistema de comando sinérgico típico (comercial), I_p e t_p são mantidos constantes (Norrish, 1992), a fim de se preservar o princípio básico do MIG/MAG pulsado de UGPP, estabelecido na Equação 2.26 ($I_p^n \cdot t_p = D$). O valor da velocidade de alimentação é determinado por um ajuste do operador ou através de um tacômetro e, em seguida, calcula-se a frequência através da Equação 2.25. Baseando-se na equação linear para o critério da taxa de fusão (Equação 2.24), calcula-se a corrente média. Falta apenas calcular t_b e I_b , o que é feito, respectivamente, pela relação entre F , t_p e t_b , mostrada na Equação 2.2 e pela equação que expressa um formato de onda perfeitamente retangular (Equação 2.15). Este sistema, descrito por Norrish (1992) e utilizado nas fontes sinérgicas comerciais, é esquematizado na Figura 2.26.

Porém, este sistema comercial possui algumas limitações descritas por Bálamo et al (1999). A primeira delas é o parâmetro de comando, o qual nas máquinas convencionais é a velocidade de alimentação, ou seja, a corrente torna-se uma consequência do valor imposto para a alimentação do arame. O fato de se utilizar velocidade de alimentação ao invés da corrente média como parâmetro de comando dificulta ao operador ajustar o equipamento para a energia de soldagem desejada. Uma segunda limitação é a utilização de uma relação linear entre a velocidade de alimentação (V_{alim}) e corrente média (I_m). A terceira diz respeito à forma de onda do sinal de corrente, assumida como perfeitamente retangular. O uso de equação linear e formato de onda não real podem incorrer em alguns erros nas condições otimizadas, principalmente em altas correntes médias. Além disso, pode-se incorrer em um comprimento de arco diferente do desejado, o que implicaria na necessidade de um ajuste fino por parte do operador para corrigir o comprimento do arco.

Finalmente, os sistemas de controle do comprimento do arco são feitos ou pela variação da velocidade de alimentação ou da corrente média. Uma correção do comprimento do arco através da variação da corrente média ou velocidade de alimentação, traz modificações na formação do cordão, podendo se tornar crítico em soldagem de chapas finas.

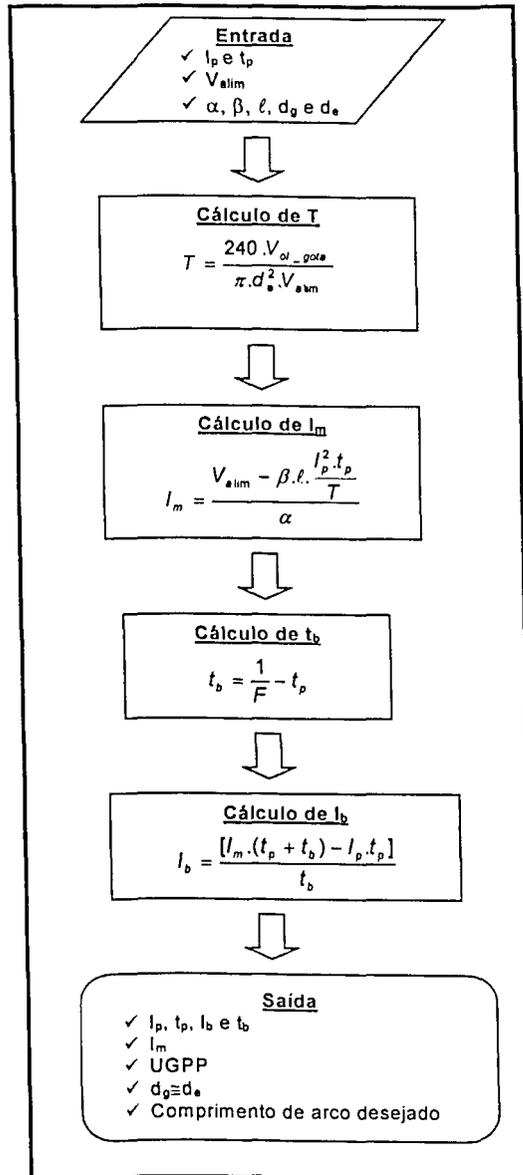


Figura 2.26 - Equacionamento de um sistema sinérgico comercial.

Em decorrência dos problemas apresentados, Bálsamo et al (1999) propõem o desenvolvimento de uma nova concepção de um sistema sinérgico. Neste novo sistema, o ajuste dos parâmetros se faz pelo valor da corrente média desejada, mantendo-se uma condição otimizada de destacamento de gotas em qualquer faixa de corrente. Para tanto, são propostas duas configurações básicas de sistemas sinérgicos (Figura 2.27), baseadas na formulação apresentada no item 2.5.1.

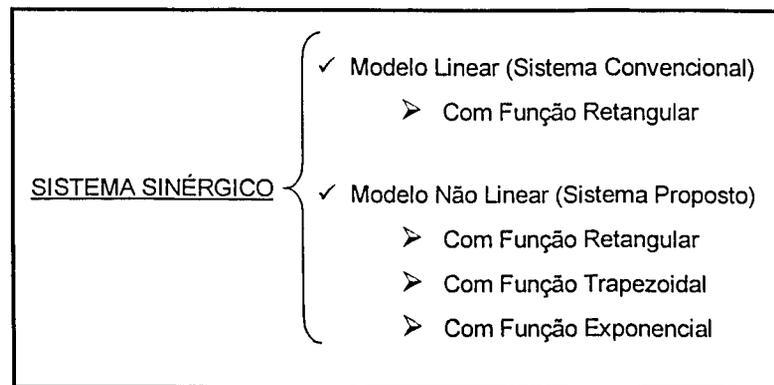


Figura 2.27 – Tipos de sistemas sinérgicos (Bálsamo et al, 1999).

Para desenvolver os sistemas sinérgicos propostos e compará-los entre si e com o sistema sinérgico típico, Bálsamo et al (1999) realizaram algumas séries de simulações computacionais e experimentações. Na primeira série, efetuou-se um estudo da corrente média calculada por três formatos de onda (retangular, trapezoidal e exponencial), comparando-se os valores simulados com a corrente média medida durante uma soldagem real. Uma segunda série consistiu em verificar a diferença entre os valores de velocidade de alimentação calculados pelos dois modelos (linear típico e não linear nas três versões). Por último, foi verificado a influência do material e diâmetro do eletrodo na sensibilidade dos modelos.

Durante o estudo da corrente média, foram feitos 20 cordões (aço carbono, seis gases diferentes e soldagem de simples deposição na posição plana) monitorando-se o sinal da corrente. Calculou-se o valor da corrente média do sinal adquirido, bem como o valor dos parâmetros de pulso (I_p , I_b , t_p e t_b) da onda. Os valores de corrente média para as três formas de onda foram calculados através de um programa feito em Matlab, tendo como entrada os parâmetros de pulso monitorados durante a soldagem e as constantes que definem a geometria da onda: λ_1 e λ_2 (Equação 2.17) para a onda exponencial e as constantes C_1 e C_2 , para a onda trapezoidal. C_1 e C_2 representam a porcentagem dos tempos t_1 e t_3 em relação a t_p , sendo consideradas iguais e definidas como:

$$t_1 = t_3 = C_{1,2} \cdot t_p \quad (2.31)$$

Alterando-se os valores destas constantes computacionalmente e comparando-se os valores obtidos com o valor real de corrente média, Bálsamo et al (1999) encontraram que, de uma forma geral, a corrente média calculada através do formato de onda trapezoidal com $C_1 = C_2 = 0,05$, é a que melhor representa o formato de onda real, uma vez que apresenta a menor média do erro relativo. Os desvios padrão não sofreram muita variação entre os resultados nas diversas condições. Desta forma, uma maneira de se corrigir o erro no cálculo dos parâmetros

de pulso seria usar um formato de onda mais próxima da onda real, que neste trabalho mostrou ser o modelo trapezoidal com $C_1 = C_2 = 0,05$.

Para comparar os diversos modelos, Bálsamo et al desenvolveram um programa em Matlab para simular o cálculo da velocidade de alimentação utilizando equações que representam os diferentes formatos de onda. Para realizar a simulação, utilizaram os seguintes parâmetros:

- Material: aço inoxidável com $d_g = d_e = 0,9$ mm;
- Gás de proteção: Ar + 2% O_2 ;
- DBCP = 18 mm e $\ell = 13$ mm, ou seja, comprimento do arco igual a 5mm.
- $\alpha = 0,57 \text{ s}^{-1}\text{A}^{-1}$ e $\beta = 27,47 \cdot 10^{-5} \text{ A}^{-2}\text{s}^{-1}$;
- Taxa de variação da corrente iguais para a subida e descida e iguais a 400 A/ms;
- $\lambda_1 = 2,0$ e $\lambda_2 = 3,0$;
- $C_1 = C_2 = 0,05$;
- $I_p = 280$ A;
- $t_p = 3$ ms.

Os resultados desta simulação estão apresentados na Figura 2.28, onde pode-se observar que, para uma mesmo valor de corrente média, cada representação de modelo fornece um valor diferente de velocidade de alimentação de arame. O modelo linear com função retangular (usado nos sistemas sinérgicos típicos) é o que mais difere em termos de valor calculado para a velocidade de alimentação, principalmente para correntes maiores. Os demais se aproximam bastante entre si, apesar de se poder notar uma velocidade de alimentação maior na ordem decrescente para os modelos exponencial, retangular e trapezoidal. Desta forma, uma maneira de se corrigir o erro no cálculo da velocidade de alimentação do arame seria usar um modelo não linear. No entanto, não é ainda possível dizer quais dos três modelos fornecerá os resultados mais precisos.

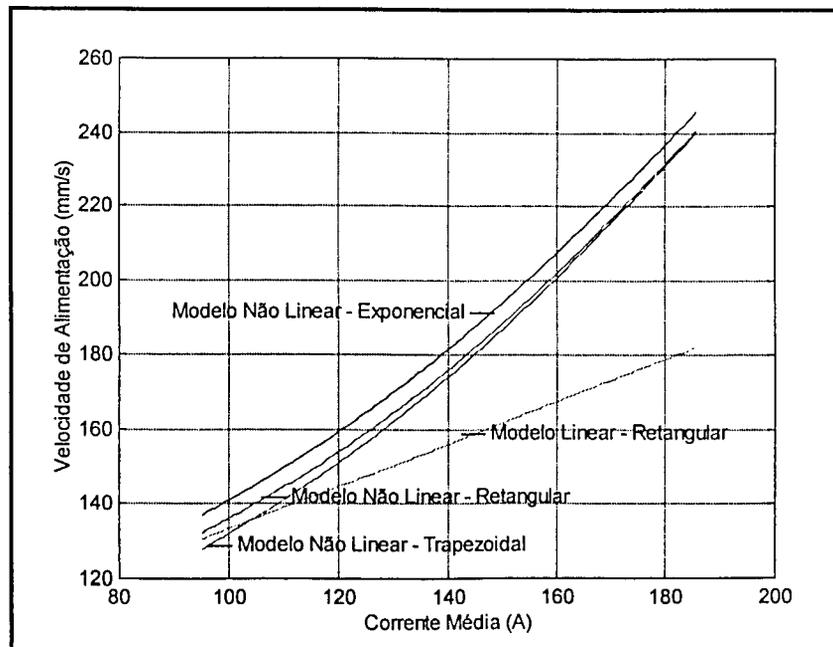


Figura 2.28 - Resultados da simulação para se comparar os diferentes modelos (Bálsamo et al, 1999).

Por fim, Bálsamo et al investigaram, por simulação, o efeito da influência do material e diâmetro do eletrodo no desempenho dos modelos lineares e não lineares. Considerando a pouca diferença entre as funções usadas para os modelos não lineares, a simulação computacional foi realizada comparando-se apenas o modelo linear e o não linear com formato de onda trapezoidal, utilizando-se dois materiais (aço carbono e inoxidável) com 3 diâmetros distintos (0,9; 1,0 e 1,2 mm). Os resultados estão mostrados na Figura 2.29.

Por esta figura, pode-se verificar que o aço inoxidável é mais sensível do que o aço carbono, ou seja, para um mesmo diâmetro de eletrodo as diferenças entre as velocidades calculadas pelos dois modelos é mais significativa no caso do aço inoxidável. Verifica-se também que quanto menor o diâmetro do eletrodo, maior a sensibilidade para o mesmo material. Além disso, para um mesmo diâmetro de eletrodo, a velocidade de alimentação é maior para o aço inoxidável. Outra verificação que a Figura 2.29 fornece, é que quanto menor o diâmetro do eletrodo maior é a velocidade de alimentação para uma mesma corrente média e mesmo material.

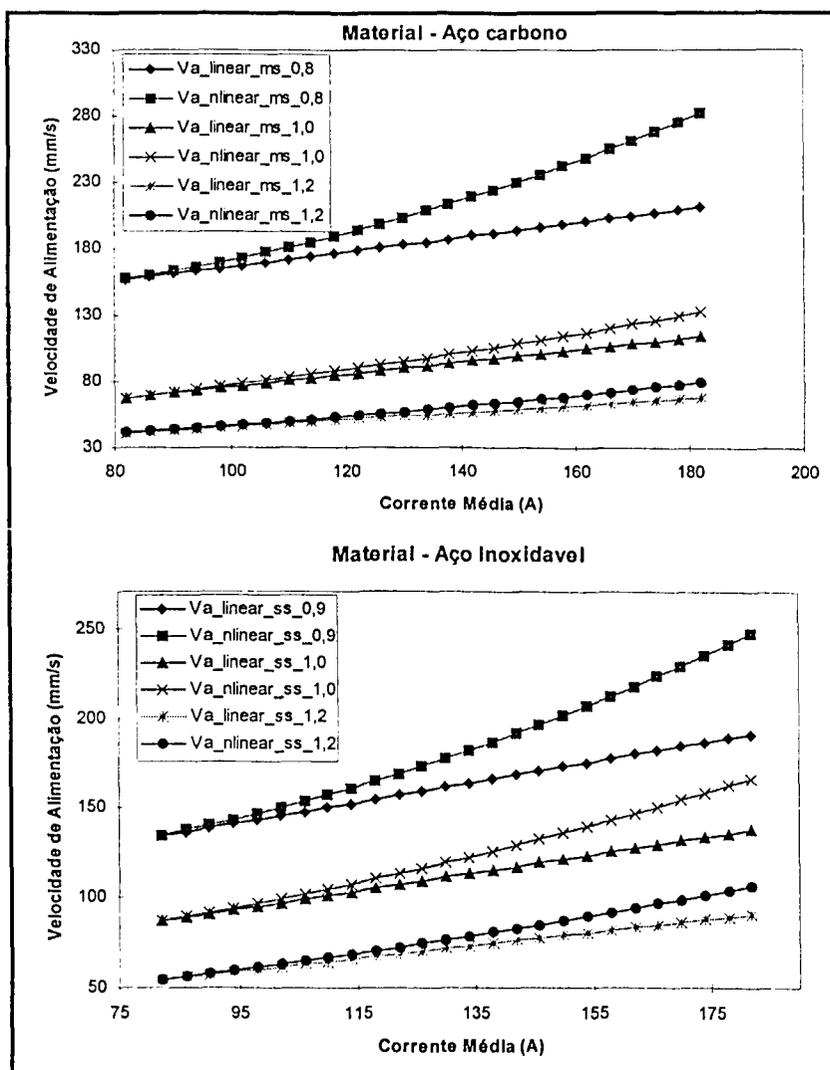


Figura 2.29 - Influência do material e diâmetro do eletrodo nos modelos (Bálsamo et al, 1999).

A maior sensibilidade do aço inoxidável pode ser explicado pela sua maior resistividade elétrica. No modelo não linear, o peso da parcela não linear, onde está caracterizada a resistividade elétrica, é maior. Esta mesma explicação pode ser utilizada para a diferença entre o mesmo material e diâmetros diferentes. Quanto menor o diâmetro do eletrodo, maior o peso da parcela referente ao termo não linear. A maior velocidade de alimentação obtida para o aço inoxidável em relação ao aço carbono também está vinculada à menor resistividade elétrica do aço carbono.

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O objetivo deste capítulo é descrever a seqüência de procedimentos adotada para a montagem experimental e realização dos ensaios, bem como os equipamentos e consumíveis utilizados, de forma que o leitor possa reproduzir as condições dos ensaios, caso necessite.

3.1 Equipamentos utilizados

A montagem experimental para o desenvolvimento deste trabalho visava a verificação da modificação da transferência metálica (tamanho, frequência e instante de destacamento da gota) em função da variação dos parâmetros de pulso. Para tal, os equipamentos e dispositivos foram arranjados de tal forma (Figura 3.1) que soldas de alumínio de simples deposição sobre chapa pudessem ser feitas automaticamente, mantendo-se a tocha fixa e movimentando-se a placa de teste. Um feixe laser, devidamente tratado por um sistema óptico, atravessa o arco e a imagem interceptada é registrada por uma câmera de vídeo de alta velocidade. Os sinais de corrente e tensão são adquiridos sincronizadamente com o auxílio de um circuito eletrônico desenvolvido para tal. As imagens, gravadas em fitas de vídeo, eram posteriormente analisadas por um sistema digital de aquisição de imagens. Maiores detalhes dos subconjuntos desta montagem são descritos nos itens a seguir.

Pode-se notar na Figura 3.1 o cuidado que se teve com a alimentação do arame, que é crítico para a soldagem do alumínio. O cabeçote alimentador foi suspenso e o conduíte mantido alinhado e esticado com a tocha.

3.1.1 Fonte de soldagem

Utilizou-se uma fonte eletrônica multiprocessado chaveada no secundário, operando no modo corrente constante, sem controle externo da velocidade de alimentação, ajustada para trabalhar com processo MIG/MAG pulsado. Denomina-se controle externo às alterações promovidas na velocidade de alimentação pela fonte, de tal forma a manter uma mesma tensão de referência pré-ajustada. Nesta fonte é possível, no modo corrente constante, ajustar os quatro parâmetros de pulso (I_p , t_p , I_b , t_b) e a velocidade de alimentação independentemente, através de potenciômetros.

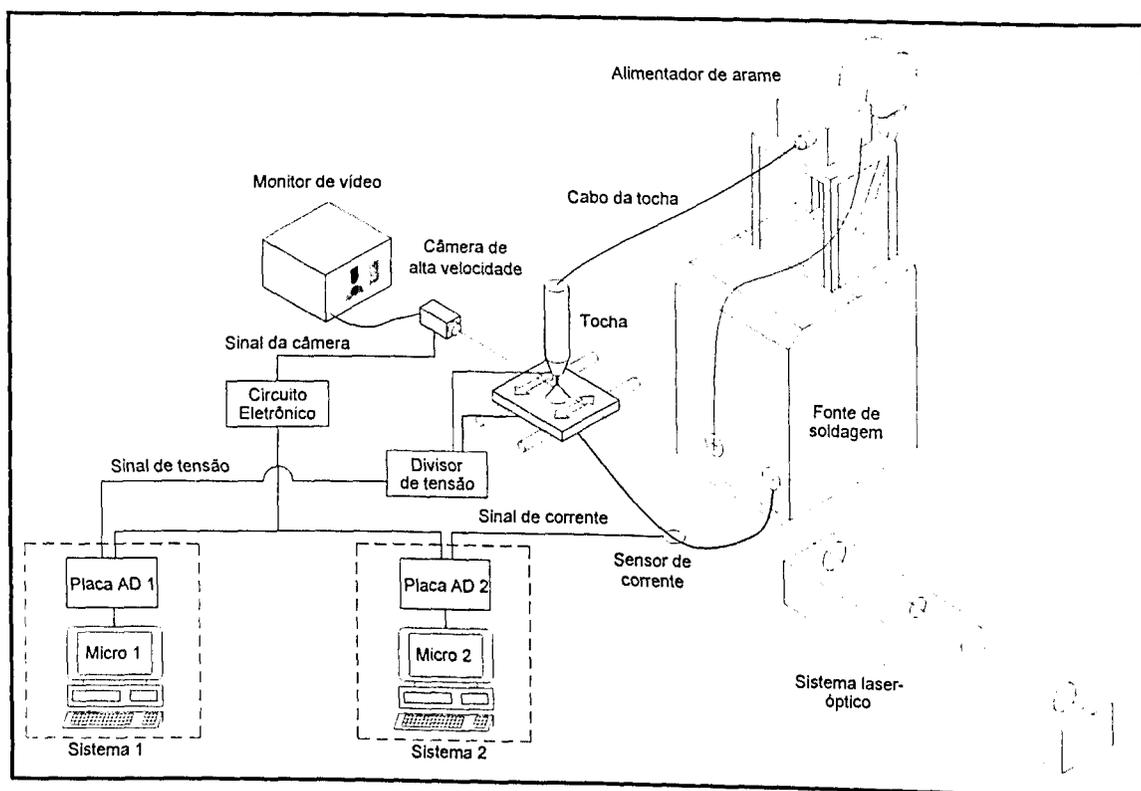


Figura 3.1 - Esquema geral da bancada experimental.

3.1.2 Sistema laser-óptico

O sistema laser óptico utilizado para se obter a sombra do eletrodo, gotas, cordão e chapa é esquematizado na Figura 3.2. Nesta figura observa-se um cabeçote laser He-Ne de 20 mW que emite um feixe de diâmetro de 1,2 mm. Este passa por um conjunto de filtros neutros, para conseguir uma luminosidade adequada, e é expandido por uma lente divergente (plano-côncava, diâmetro 6,35 mm, material BK7 e revestimento AR.14, especificações do fabricante Newport) com distância focal de 12,5 mm. O feixe é novamente colimado ao passar por uma lente convergente (plano-convergente, diâmetro 50,8 mm, material BK7 e revestimento AR.14) de distância focal 500 mm, ficando com um diâmetro de 48 mm. Todo este sistema é apoiado sobre suportes na forma de postes, que por sua vez estão sobre carros, que permitem a mobilidade sobre um trilho que suporta todo o conjunto.

Ao deixar a última lente o feixe laser atravessa um vidro de proteção (vidro comum de 2 mm de espessura) e chega ao arco de solda. Após passar pelo arco e por outra janela de proteção, o feixe chega à câmera de vídeo de alta velocidade, que possui na sua entrada um filtro passa-banda e um filtro neutro. A importância do filtro neutro deve-se ao fato do arco emitir radiação, ainda que pequena, no comprimento de onda do laser. Assim, deve-se ajustar mais uma vez a luminosidade do sistema para que não supere a necessidade da câmera e do jogo de lentes.

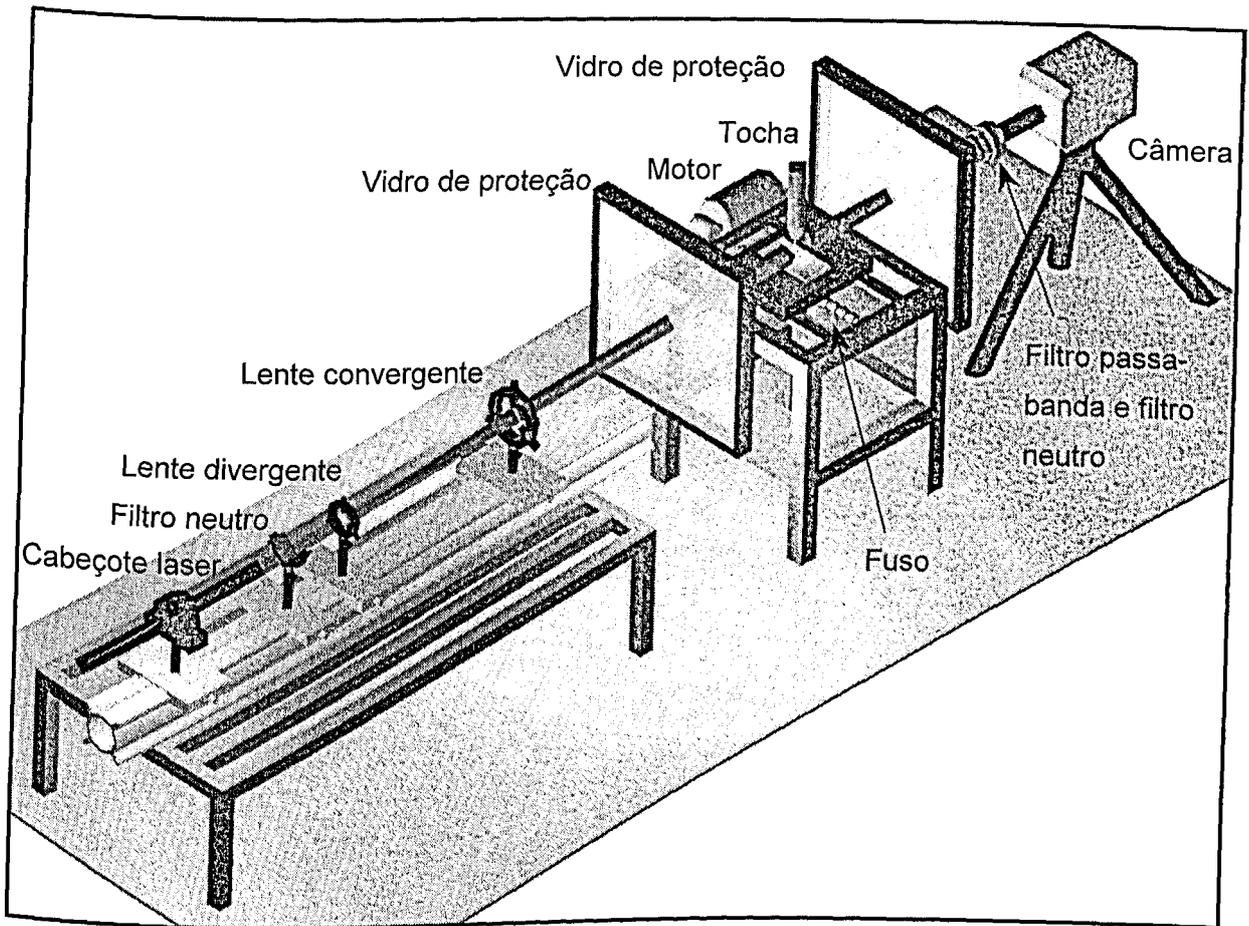


Figura 3.2 - Detalhe do sistema laser-óptico utilizado.

Foram utilizadas duas câmeras digitais em momentos distintos do trabalho. No início, havia à disposição a câmera denominada "Câmera 1" que opera no máximo a 500 quadros por segundo (2,0 ms entre cada quadro) com um tempo de gravação de 2 s. Esta câmera foi utilizada para determinar a corrente de transição do material, onde foi possível determinar os vários modos de transferência metálica. Num segundo momento, outra câmera ("Câmera 2") foi adquirida para se efetuar os estudos em corrente pulsada. Esta câmera consegue gravar até 13 s e opera em 2000 quadros por segundo (0,5 ms entre cada quadro), o que é necessário para definir claramente o instante de destacamento, se no pulso ou se na base. Esta determinação clara do instante de destacamento para a corrente pulsada não foi possível com a Câmera 1, devido ao pequeno número de quadros que se é possível obter durante um pulso de corrente. As telas de trabalho típicas de cada câmera são mostradas na Figura 3.3, onde são mostrados instantes onde ocorre a transferência da gota. A imagem do eletrodo na Câmera 2 aparece deitada, pois a câmera foi colocada nesta posição para permitir um maior campo de visão.

Ambas as câmeras fornecem um sinal elétrico quando abrem o diafragma para registrar uma imagem (quadro) em sua memória, este sinal foi utilizado para se efetuar a sincronização

como será descrito em 3.1.4. Com relação ao jogo de lentes utilizado, foi utilizado um conjunto de lentes com distância focal da objetiva de 200 mm, devido à necessidade de uma grande ampliação da imagem e devido à necessidade em se manter uma certa distância (aproximadamente 2 m) da soldagem, pois eventuais respingos podem danificar as câmeras. Outro aspecto importante é o tempo de exposição de cada quadro ("*shutter*"), onde tempos grandes provocam imagens borradas. A Câmera 1 possui um "*shutter*" digital, o que pode induzir ruídos na imagem, sendo ajustado no máximo (1/10000 s). A Câmera 2 além de possuir um "*shutter*" digital, possui um "*shutter*" mecânico, que reduz os ruídos na imagem. Foi utilizado o "*shutter*" mecânico no valor de 1/24000 s.

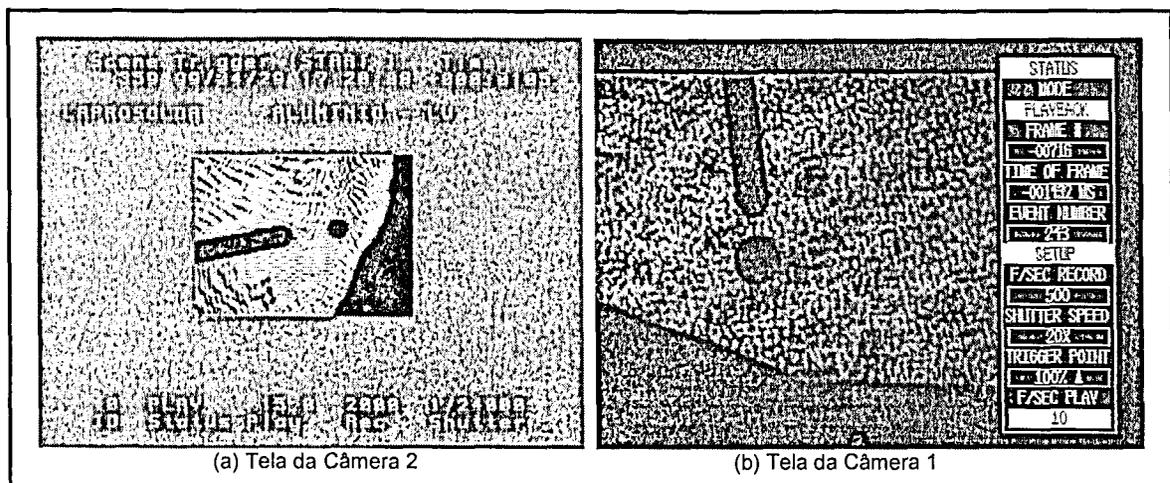


Figura 3.3 - Telas de trabalho das câmeras utilizadas

3.1.3 Sistema de gravação das imagens

As imagens obtidas pelas filmadoras foram gravadas em sistema S-VHS (Super VHS), através de um cabo Y/C que conecta a filmadora ao gravador de vídeo. O formato S-VHS foi escolhido pois, se comparado com o vídeo VHS comum, apresenta uma maior resolução (400 linhas do S-VHS contra 240 linhas do VHS comum), o que é de extrema importância para a posterior digitalização destas imagens. Esta digitalização foi efetuada com uma placa e programa específicos, que permite obter as dimensões lineares e de áreas do comprimento do arco e gotas. A placa conecta-se por um cabo BNC ao gravador de vídeo.

3.1.4 Sistema de aquisição e sincronização de imagem e sinais elétricos

A Figura 3.4 mostra esquematicamente o sistema de aquisição e sincronização utilizados. A partir de um pulso elétrico que a câmera fornece quando inicializa a gravação de um quadro, é possível efetuar, via programação, a sincronização dos sinais de imagem e dos sinais elétricos do arco. O sinal da câmera é composto por um nível DC de aproximadamente

5V e, quando há um quadro, o sinal vai a zero durante $1\mu\text{s}$. Este sinal foi observado com a ajuda de um osciloscópio digital (Tektronic TDS210) a uma taxa de aquisição de 6 MHz. Como este intervalo de tempo é muito pequeno, as placas de aquisição convencionais, como as existentes no LAPROSOLDA, não conseguem identificá-lo. Assim, foi desenvolvido um circuito eletrônico que quando o sinal da câmera vai a zero, este circuito "segura" o sinal em zero até a vinda do próximo sinal a zero, quando retorna a 5 V e aguarda o próximo quadro, como mostrado na Figura 3.4. A sobreposição dos sinais elétricos do arco (tensão e corrente) com os sinais da câmera permite, então, identificar os níveis do sinal elétrico durante a existência de cada quadro. É importante ressaltar que o tempo gasto para a câmera adquirir a imagem ("shutter") foi desprezado.

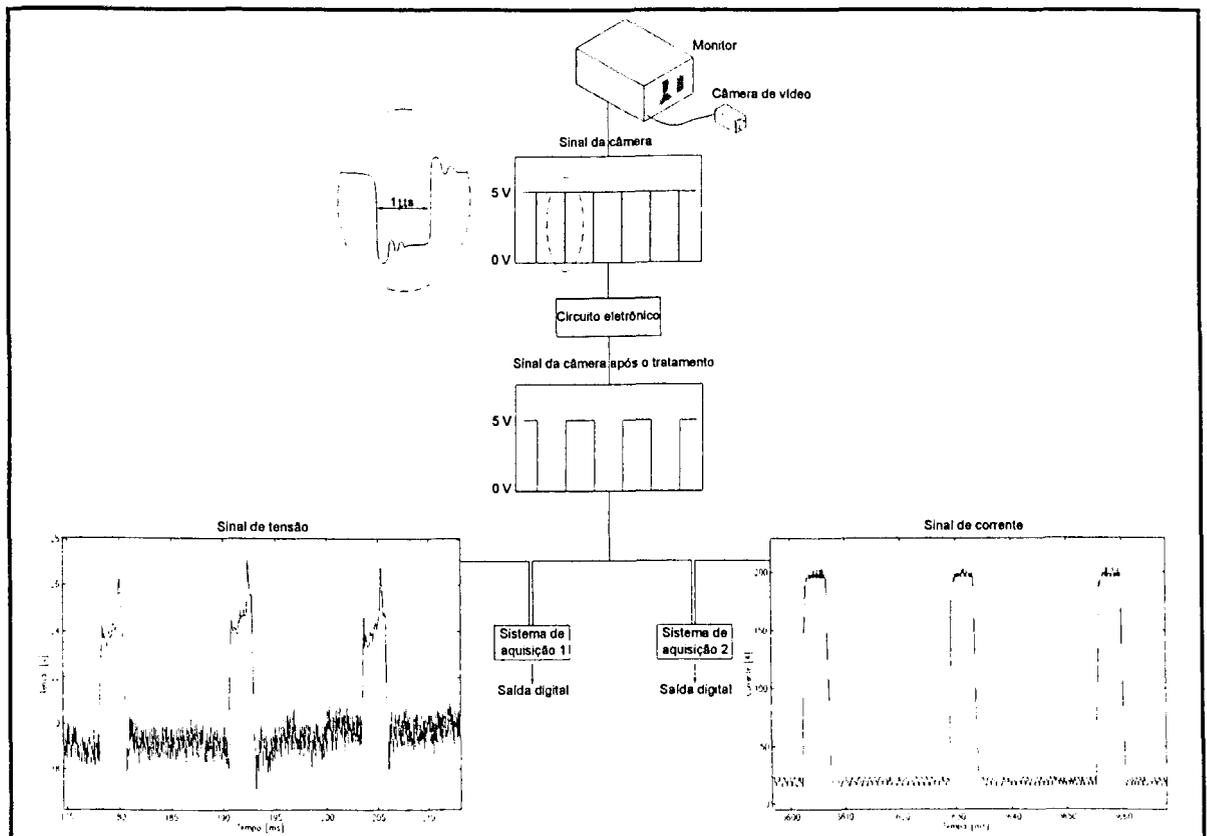


Figura 3.4 - Esquemática do sistema sincronizado de aquisição de imagem e sinal elétrico.

Como não havia disponível um sistema de aquisição de dados para trabalhar com a frequência desejada e com no mínimo três canais, foi necessário a utilização de dois sistemas de aquisição A/D independentes. O primeiro sistema (Sistema 1) foi ajustado para dois canais a uma taxa de aquisição de 16834 Hz para cada canal em 8 bits. O segundo (Sistema 2) foi também ajustado para dois canais, a uma taxa de aquisição de 17200 Hz por canal em 8 bits. As taxas de aquisição foram ajustadas para serem as maiores possíveis e ficarem o mais próxima em valor.

Com relação à maior frequência de aquisição possível, a limitação imposta foi dada pelo Sistema 1. Foi verificado que este sistema possui uma memória que é capaz de comportar 2^{14} -1 pontos, ou seja, aproximadamente 16000 pontos. Após este número, estes pontos são gravados, o que leva algum tempo (39 ms, obtido com o osciloscópio digital) e implica numa perda de dados (o sinal fica "costurado"). Assim, a sincronização dos dois sistemas só é possível para os primeiros 16000 pontos do Sistema 1. Assim, a taxa de aquisição de 16834 Hz foi escolhida como taxa máxima de forma a proporcionar um intervalo de análise de 0,975 s ($16000/16384$).

Para efetuar a aquisição dos sinais elétricos, procedeu-se da seguinte forma:

- O sinal de tensão é adquirido por meio de um fio conectado à placa de teste e outro ao bico de contato, por meio de um furo no bocal. O sinal passa por um divisor de tensão que o reduz dez vezes e então é conectado, por meio de um cabo coaxial à entrada BNC do Sistema 1. Este sistema também recebe o sinal elétrico proveniente da câmera que indica a mudança de quadro.
- O sinal de corrente, adquirido pelo Sistema 2, é capturado por meio de um sensor de Efeito Hall e levado diretamente à placa de aquisição do sistema, que já está previamente calibrada para o sensor. Simultaneamente também é levado o sinal da câmera.

Posteriormente, via programação ambos os sistemas de aquisição são sincronizados no tempo, já que em ambos os sistemas há um sinal conhecido e simultâneo. Esta sincronização é descrita no item seguinte.

3.2 Programas computacionais utilizados e desenvolvidos

Para a aquisição dos sinais foram utilizados programas já disponíveis no laboratório, que acompanham as placas de aquisição utilizadas nos respectivos sistemas. Estes programas geram arquivos no formato texto. Um programa desenvolvido em Matlab foi então elaborado para se efetuar a sincronização dos dois sistemas de aquisição, efetuar medidas de vários parâmetros (I_p , t_p , I_b , t_b , I_m , I_{ef} , V_p , V_b , V_m , V_{ef}) e obter o valor da corrente e da tensão instantâneos para cada quadro a partir dos arquivos no formato texto. O diagrama de blocos do programa desenvolvido, denominado de "*contaquadros*", é mostrado na Figura 3.5.

Um cuidado especial foi tomado com relação à perda de dados devido à limitação de memória do Sistema 1. A contagem dos quadros e a sincronização só é feita até o ponto número 16000. Após este valor o sinal da tensão é anulado, indicando que a sincronização é válida somente até este ponto.

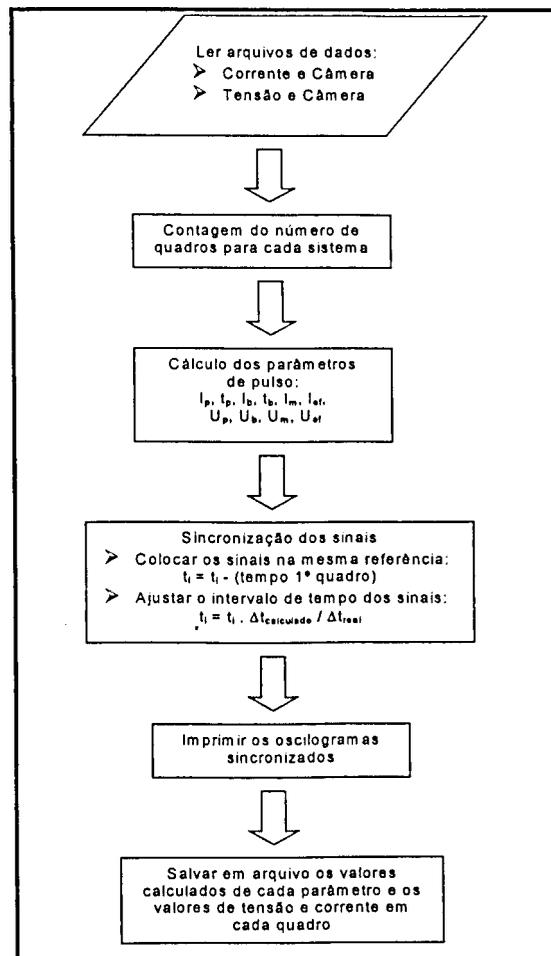


Figura 3.5 - Diagrama de blocos do programa "contaquadros".

A sincronização é o ponto mais importante do programa. Além de se atentar ao fato de que ela só pode ser obtida até o ponto 16000, deve-se levar em conta que o sinal da câmera pode ser medido, diferentemente no tempo, pelos dois sistemas de aquisição. Pode-se fazer analogia com uma corrida de atletismo. Se duas pessoas cronometrassessem um mesmo atleta, que para um relógio ideal fizesse a corrida em 10 s, a primeira pessoa poderia cronometrar 9,9 s e a segunda pessoa 10,1 s, devido a características intrínsecas de cada cronômetro. Assim, as duas pessoas representariam os dois sistemas de aquisição, que, além de trabalharem em frequências diferentes, utilizam placas A/D em micros com "clocks" diferentes. O relógio ideal é o tempo indicado pela câmera.

Foram, então, efetuadas duas transformações lineares no sinal na escala do tempo. A primeira (3.1), refere-se à colocação dos sinais dos dois sistemas numa mesma origem, que é o primeiro quadro observado ($t_{1^\circ \text{ quadro}}$). A segunda (3.2) traduz a necessidade de se corrigir o sinal para um relógio ideal. Assim, deve-se multiplicar cada instante t_i pelo intervalo de tempo de deveria ser o certo ($\Delta t_{\text{calculado}}$). Por exemplo, 1000 quadros devem ocorrer, para a Câmera 2, em 500 ms ($\Delta t_{\text{calculado}}$). Contudo, devido a fenômenos aleatórios existentes no sistema de

medição, o programa determina que estes mesmos 1000 quadros ocorreram em 501,5 ms (Δt_{real}). Assim, deve-se fazer um ajuste considerado linear no tempo dividindo cada instante t_i por 501,5 e multiplicando por 500.

$$t_i = t_i - t_{1^\circ quadro} ; \quad (3.1)$$

$$t_i = t_i \cdot \frac{\Delta t_{calculado}}{\Delta t_{real}} . \quad (3.2)$$

Na amplitude existem pequenas variações devido à calibração distinta dos dois sistemas que, para este trabalho, não importam, pois não é de interesse medir tal amplitude. Interessa apenas saber se o sinal está "em cima" ou "embaixo".

Além do programa "contaquadros", desenvolveu-se um outro programa em Matlab denominado de "sinergico" que, baseado no modelo proposto por Bálamo et al (1999), calcula os parâmetros de pulso a partir de determinadas entradas, como mostrado em seu fluxograma da Figura 3.6. Isto é, ao contrário dos programas para comando sinérgico convencionais, este programa utiliza-se uma relação não linear entre a velocidade de alimentação e a corrente média, o que passa a demandar os valores de I_b e t_b .

O programa "sinergico" calcula inicialmente os parâmetros de base e a velocidade de alimentação para o modelo linear, que servirão como uma estimativa inicial para o cálculo nos outros modelos. Mesmo sendo uma estimativa inicial, deve-se refinar este cálculo de forma a se obter um diâmetro de gota o mais próximo possível do diâmetro do eletrodo, sem contudo transgredir os limites impostos para I_b e t_b . Isto é conseguido durante a etapa denominada de cálculos corretivos para o modelo linear. Estes novos parâmetros corrigidos serão a estimativa inicial para os modelos não linear com onda retangular e com onda trapezoidal. Com efeito, o modelo que interessa é o modelo não linear com onda trapezoidal, que foi o que melhor se comportou para o modelo de Bálamo et al (1998), conforme descrito no item 2.5. Entretanto, para melhor se estudar os modelos inseriu-se a rotina para cálculo do modelo não linear com onda retangular. Mais uma vez, é necessário corrigir os parâmetros de base e a velocidade de alimentação de forma a se encontrar um diâmetro de gota o mais próximo do diâmetro do eletrodo. Caso o diâmetro da gota seja maior que 10% do diâmetro do eletrodo (considerou-se que um erro permitido de 10%) deve-se reduzir o t_b . Caso contrário, deve-se aumentar t_b .

A estratégia de modificar t_b aumentando-o, caso o diâmetro da gota estivesse pequeno e vice-versa, foi adotada depois de algumas simulações efetuadas como mostra a Figura 3.7. Escolheu-se t_b e não I_b , pois variando-se I_b em correntes médias baixas (40 A) não se consegue um diâmetro de gota em torno de 1,0 mm que é o diâmetro do eletrodo a ser utilizado, como demonstrado na Figura 3.7.

3.3 Consumíveis

Foram utilizados arame de alumínio AWS ER 4043 (AlSi5,0) de diâmetro 1,0 mm, gás de proteção argônio comercialmente puro e placas de teste retiradas de um chapa de liga AA 5052 (AlMg2,5). As dimensões das placas de teste são 250x50x6,35 mm. Esta dimensão foi definida com base no sistema de fixação da chapa, no aproveitamento máximo da chapa (2,0 x 1,0 m) e numa largura adequada para se efetuar a deposição do cordão. A combinação eletrodo-chapa foi escolhida com base em recomendações da Alcan (1993) e através da análise da possibilidade de ocorrência de trincas.

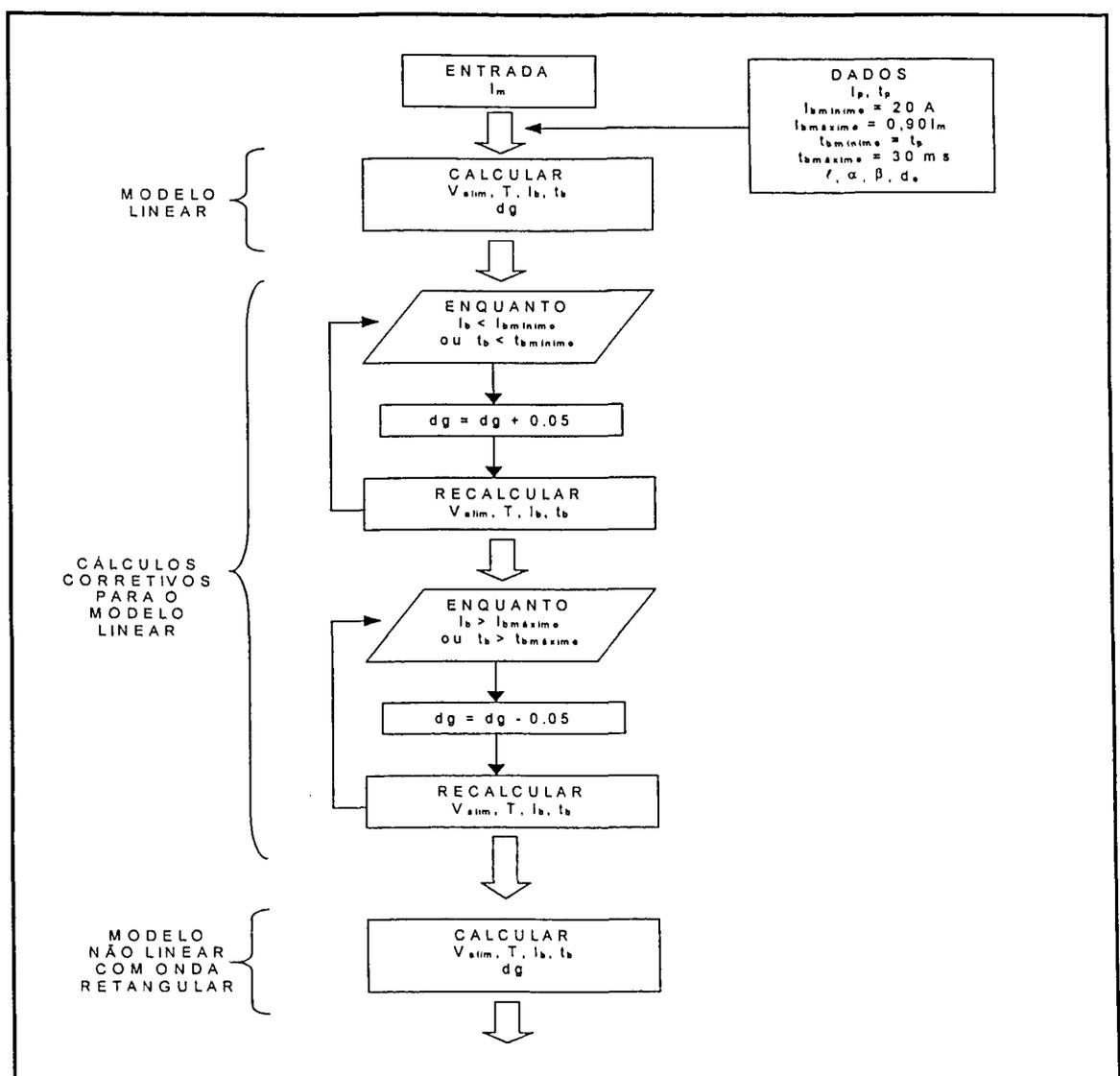


Figura 3.6 - Fluxograma do programa "sinergico".

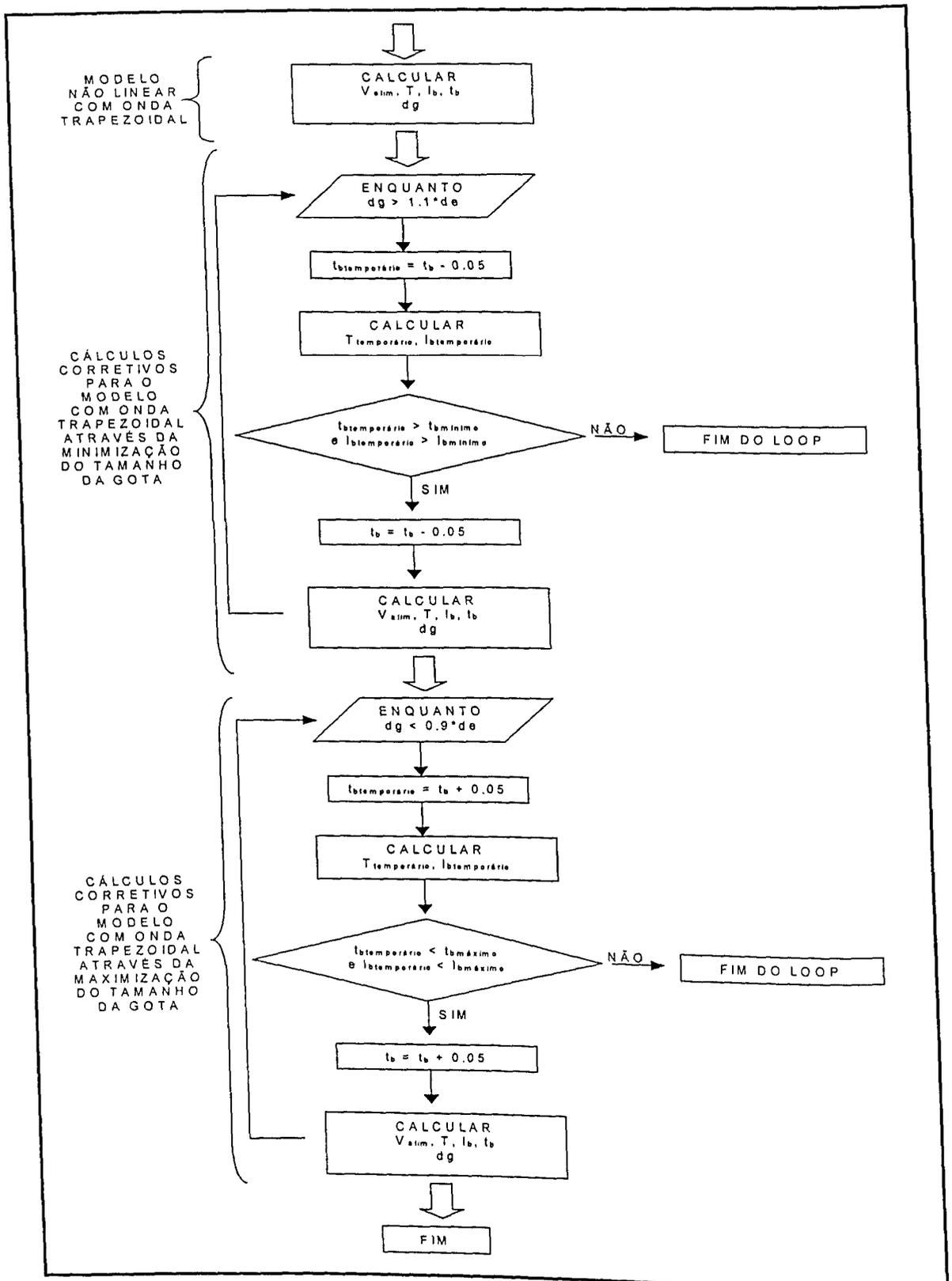


Figura 3.6 - Fluxograma do programa "sinergico" (continuação).

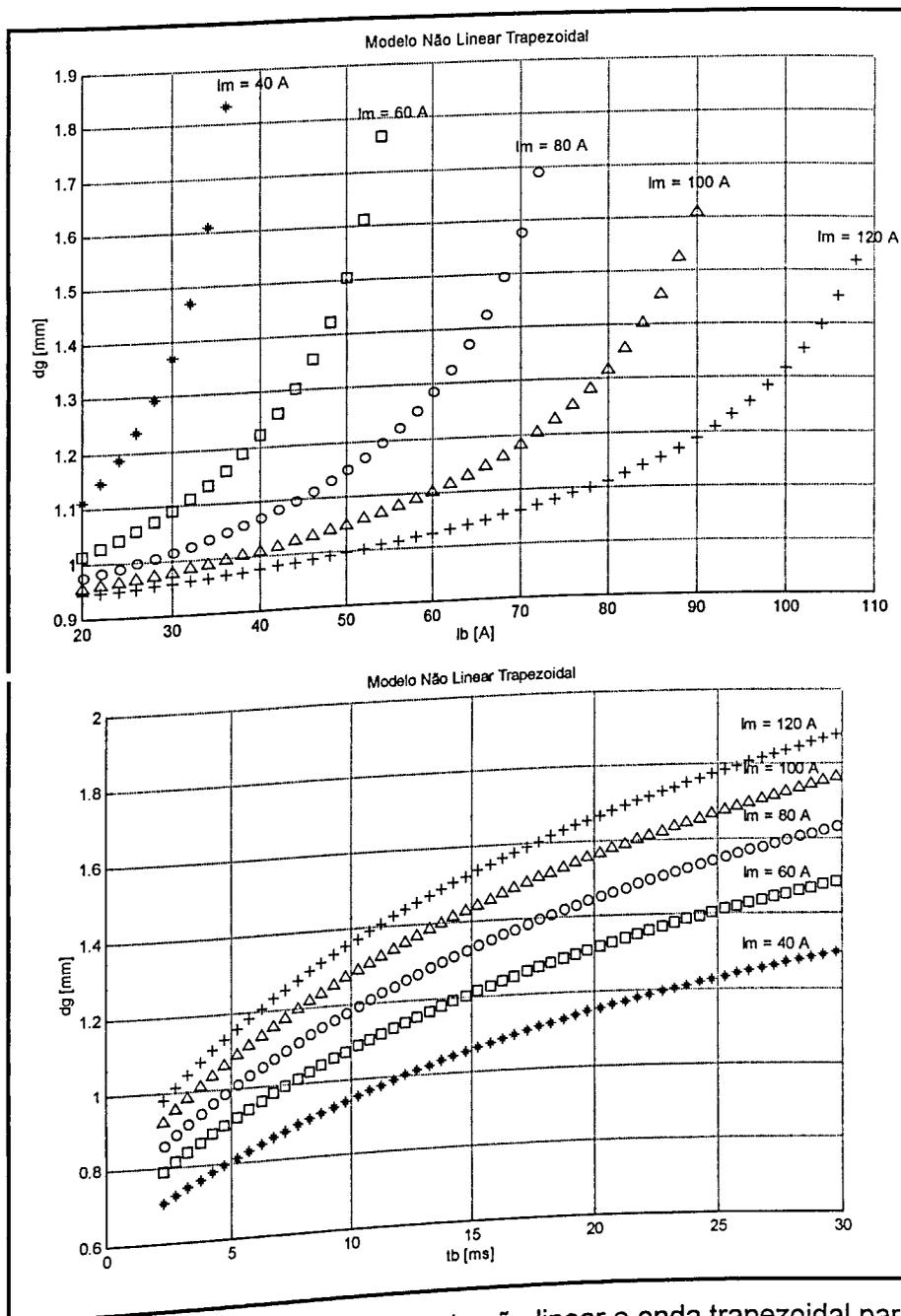


Figura 3.7 - Simulações efetuadas com o modelo não linear e onda trapezoidal para $I_p = 200$ A e $t_p = 2,25$ ms.

3.4 Sistema de fixação e translação da placa de teste

No sistema utilizado, a tocha foi mantida fixa e a placa de teste, fixada conforme Figura 3.8, posta em movimento com a ajuda de um fuso e um motor comandado por um sistema cuja velocidade de soldagem pode ser ajustada até um valor máximo de 80 cm/min. A fixação da placa de teste foi feita para evitar distorções da mesma e, conseqüentemente, variação no comprimento do arco durante a soldagem.

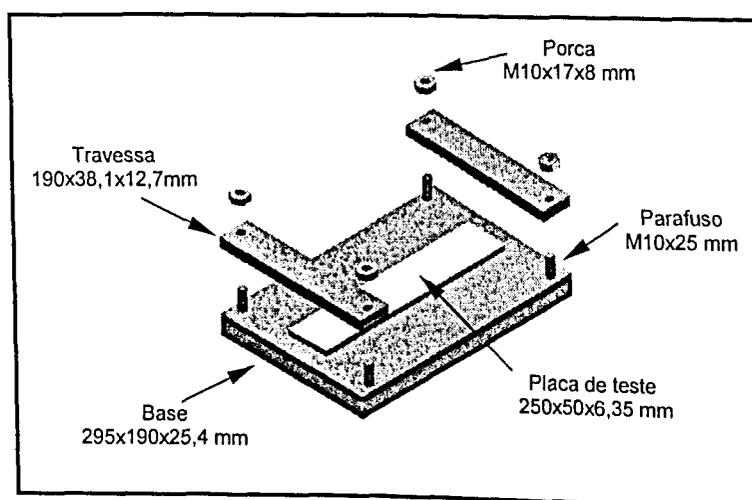


Figura 3.8 - Sistema de fixação da placa de teste.

3.5 Planejamento experimental

As etapas realizadas no procedimento experimental estão subdivididas abaixo e foram executadas de tal forma a garantir a repetibilidade dos resultados.

✓ Condições experimentais e metodologia

Todos os experimentos foram realizados com gás de proteção argônio industrialmente puro a uma vazão de 15 l/min, distância bico de contato peça igual a 15 mm e com o eletrodo na posição empurrando a 10°, conforme recomendações da Alcan (1993). Manteve-se também constante a relação entre a velocidade de alimentação e de soldagem em torno de 15, a fim de manter o volume do cordão constante.

A determinação da região de UGPP (uma gota por pulso), no gráfico $I_p \times t_p$, se inicia pela identificação do nível da corrente de transição, que é o nível mínimo que I_p pode possuir. Foram realizados sete ensaios, no modo tensão constante para identificar tal nível. Inicialmente, ajustou-se uma tensão de referência igual a 18,0 V, o que gerou transferência por curto circuito. Aumentando-se esta tensão para 22,3 V, acarretou num comprimento de arco próximo de 5 mm. Passou-se, então, a variar a velocidade de alimentação numa faixa de 5,6 a 8,5 m/min, para a tensão de ajuste de 22,3 V, de forma a observar a transição globular-Shadowgrafia.

Uma vez determinada a corrente de transição, passou-se a variar t_p para três níveis de I_p (155, 200 e 255 A), mantendo-se $I_b = 20$ A e $t_b = 6,0$ ms, de forma a mapear a região de UGPP. Os valores de I_b e t_b foram escolhidos baseando-se no trabalho de Rajasekaran et al. (1998). A velocidade de alimentação foi ajustada para cada ensaio de forma a se obter um comprimento de arco próximo de 5 mm. Todos os ensaios para se mapear a região de UGPP

foram conduzidos com imposição de corrente sem controle externo¹. Foram propostos sete ensaios iniciais que foram posteriormente refinados para delinear a região procurada, chegando a um total de 19 ensaios.

Como a região de UGPP foi mapeada em somente uma condição de base (20 A e 6 ms), restava saber qual a influência dos parâmetros de base no modo de destacamento, pois a faixa de corrente média em que se é possível soldar nesta região de UGPP é pequena (60 a 80 A) para estes parâmetros de base. Assim, foram realizados mais dez ensaios para várias correntes médias (40, 50, 65, 75, 90 e 110 A) mantendo-se $I_p = 200$ A e $t_p = 2,25$ ms (valores centrais da região de UGPP). Os valores de I_b , t_b e V_{alim} foram calculados a partir do programa "sinergico" desenvolvido, ou seja, ao contrário dos programas para comando sinérgico convencionais, neste programa utilizou-se uma relação não linear entre V_{alim} e I_m , o que passa a demandar os valores de I_b e t_b . As entradas deste programa, denominado "sinergico", foram os dados obtidos durante o mapeamento da região de UGPP.

Um ajuste importante da fonte diz respeito à rampa de velocidade de alimentação utilizada durante o acendimento do arco. Existe uma escala de 0 a 10, na forma de potenciômetro, que regula o intervalo de tempo em que a velocidade de alimentação vai de zero até o seu valor nominal. Esta rampa só é utilizada quando não existe o controle externo e é de extrema importância para o acendimento adequado do arco, evitando que o eletrodo "cole". As rampas a serem utilizadas para cada ensaio foram obtidas a partir de testes preliminares (próximo capítulo).

✓ Preparação das placas de teste

As placas de teste foram retiradas através do corte a plasma, imprimindo uma velocidade de corte de 80 cm/min, a uma corrente de 35 A e pressão de ar comprimido em 4 bar, com base em recomendações da Alcan (1993). Posteriormente, foram rebarbadas e, instantes antes de se iniciar a soldagem, foram escovadas com escova de cerdas de aço inoxidável e limpas com acetona.

✓ Ajustes na bancada e realização das soldas

Inicialmente montou-se o sistema de aquisição dos sinais (corrente, tensão e câmera) e de gravação da imagens. Posteriormente, ajustou-se o sistema óptico com relação aos focos de cada lente e em relação à altura do feixe laser que sai do sistema, de forma que este interceptasse uma pequena porção da face superior da placa de teste (fixada e nivelada no

¹ O modo corrente constante sem controle externo foi utilizado, baseando-se nos testes preliminares, onde foram realizadas soldas em três modos possíveis: corrente constante com e sem controle externo e no modo misto. Estes testes preliminares serão descritos no próximo capítulo

suporte) e uma parte do eletrodo, o que é conseguido observando-se a imagem proporcionada pela filmadora, previamente focada para se visualizar nitidamente o eletrodo sem a existência do arco.

Filmou-se e gravou-se, então, na fita S-VHS uma grade de 1x1 mm, feita em uma folha de transparência desenhada no programa AutoCad, colocada no mesmo plano do eletrodo para que se tenha um fator de escala como mostra a Figura 3.9. Cada vez que o foco é alterado, deve-se gravar novamente a imagem da grade. Em seguida, ajustou-se os parâmetros de corrente e tensão e velocidade de alimentação na fonte, a velocidade de soldagem no sistema de comando do fuso e os parâmetros da câmera.

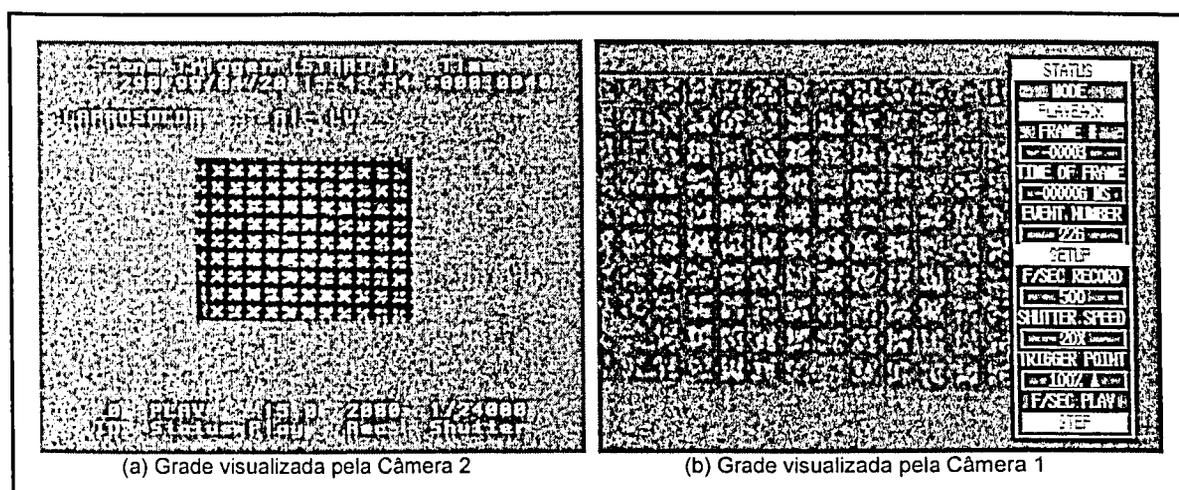


Figura 3.9 - Grade utilizada em cada seqüência de experimentos

Procedeu-se, então, à realização das soldas num comprimento de aproximadamente 15 cm, aguardando em torno de 2 s para iniciar a aquisição e filmagem, de forma a se evitar prováveis instabilidades decorrentes do acendimento do arco. Terminada a aquisição, ajustada para adquirir 5 s, e a filmagem, ajustada para gravar 12 s, procedeu-se à gravação dos dados. Os arquivos de sinais foram gravados nos computadores e a filmagem (imagens) gravadas na fita de S-VHS. Como, devido à limitação do Sistema 2, só se pode utilizar o sinal nos 0,975 s iniciais, gravou-se apenas de 0 a 1 s do arquivo de dados e 2 s de filmagem. A filmagem foi gravada num intervalo maior, de forma a se possuir um maior número de transferências onde se é possível medir o diâmetro das gotas. Não se gravou por mais de 2 s devido ao grande tempo de gravação (gravou-se em 15 quadros por segundo) o que torna oneroso devido ao alto custo da fita S-VHS.

✓ Visualização da fita e medição do comprimento do arco e do diâmetro da gota

Uma vez gravadas as imagens na fita S-VHS, reproduziu-se as filmagens no gravador de vídeo, parando-se aleatoriamente a imagem. Em cada parada, a imagem foi digitalizada, medindo-se o comprimento do arco. A medida do comprimento do arco foi adotada como sendo a distância do ponto onde o eletrodo perde a sua cilindricidade até a metade da altura do cordão, como mostra a Figura 3.10. Nas paradas onde havia transferência, acompanhou-se toda a transferência, digitalizando quadro por quadro e medindo-se a área de uma mesma gota várias vezes durante a sua "queda". Este procedimento foi adotado para reduzir os erros ao medir a área das gotas numa mesma posição, pois o que se mede na verdade é a projeção da gota (sombra) e durante a queda ela pode ir rodando o que dá um melhor média das áreas. Para se calcular o diâmetro, assumiu esta área como sendo a de um círculo perfeito.

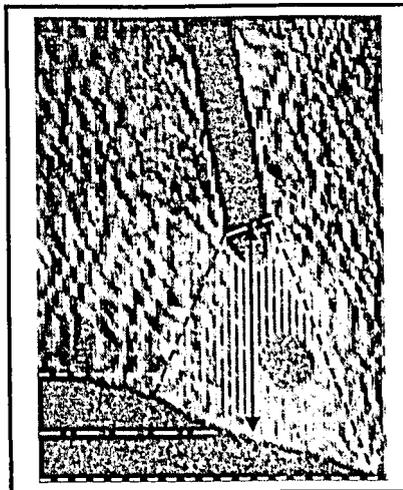


Figura 3.10 - Critério adotado para se medir o comprimento do arco

✓ Medição dos parâmetros de corrente e tensão médios e instantâneo

O programa "*contaquadros*" foi construído para calcular o valor dos vários parâmetros de corrente e tensão médios e calcular o valor da corrente e da tensão em cada quadro (imagem), gerando um arquivo de dados, como mostra a Figura 3.11.

ENSAIO03										
Ip[A]	tp[ms]	Ib[A]	tb[ms]	Im[A]	Ief[A]	Vp[V]	Vb[V]	Vm[V]	Vef[V]	
255.1818	4.0759	20.8265	6.0980	115.1468	160.1131	25.7201	18.3014	21.2125	21.5784	
Frame	U	I								
0	17.5781	23.0000								
1	19.2871	19.1000								
2	18.9941	19.1000								
3	18.0664	23.0000								
4	18.7988	19.1000								
5	24.9023	241.3000								
6	24.5117	252.8000								
7	26.4160	252.8000								
8	24.5117	256.6000								
9	24.9023	256.6000								
10	24.6094	256.6000								
11	25.7812	252.8000								
12	24.2676	256.6000								
13	17.2363	49.8000								
14	19.0430	23.0000								
15	17.0898	15.3000								
16	17.1875	23.0000								
17	19.0430	23.0000								
18	16.1133	19.1000								
19	17.7246	19.1000								
20	17.0898	15.3000								
21	15.6738	19.1000								
22	17.0898	23.0000								
23	16.6992	15.3000								
24	16.2598	19.1000								
25	23.6328	249.0000								
26	22.9980	256.6000								
27	23.2422	256.6000								
28	26.4160	256.6000								
29	26.9043	256.6000								
30	27.6367	252.8000								
31	27.9785	256.6000								
32	28.2227	252.8000								
33	16.3086	19.1000								
34	19.6777	19.1000								
35	18.9453	19.1000								
36	16.2109	23.0000								
37	16.7969	19.1000								
38	19.3359	19.1000								
39	19.8730	23.0000								
40	16.6992	19.1000								
41	16.8457	23.0000								
42	15.4785	23.0000								
43	15.1367	15.3000								
44	21.8750	65.1000								

Figura 3.11 - Exemplo de uma parte do arquivo de dados gerado pelo "contaquadros", onde são mostrados os períodos de pico e de base.

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

Foram realizados alguns testes iniciais de forma a verificar a exiguidade de alguns procedimentos, estimar valores iniciais e calibrar algumas grandezas, conforme será descrito a seguir.

4.1 Calibração das velocidades de soldagem e de alimentação

A velocidade de soldagem a ser ajustada no carro foi calibrada numa faixa de 5 a 50 cm/min, onde cronometrou-se o tempo gasto para o carro percorrer 15 cm (comprimento de um cordão) nos dois sentidos possíveis de movimento (esquerda e direita). Para cada velocidade, indicada na Figura 4.1, foram feitas médias de três valores para a esquerda e três para a direita, totalizando um total de 60 ensaios. A equação de calibração também é mostrada nesta figura.

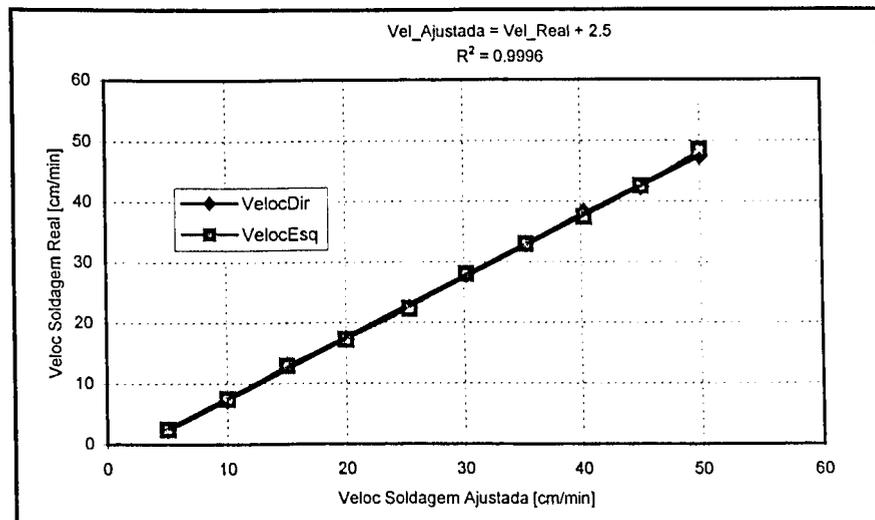


Figura 4.1 - Calibração da velocidade de soldagem.

A velocidade de alimentação também foi calibrada. O arame foi deixado fluir do bico de contato sem restrição, de forma a não entrar em contato com o cabo terra. Cronometrou-se em torno de 30 s de alimentação do arame, medindo-se o seu comprimento. Foram ajustados, no potenciômetro do cabeçote de alimentação, valores de 2 a 8 m/min. Cada teste foi repetido duas vezes, aumentando-se e reduzindo-se os valores de forma a verificar o efeito de histerese, totalizando 17 ensaios. O gráfico obtido e a equação de calibração são mostrados na Figura 4.2.

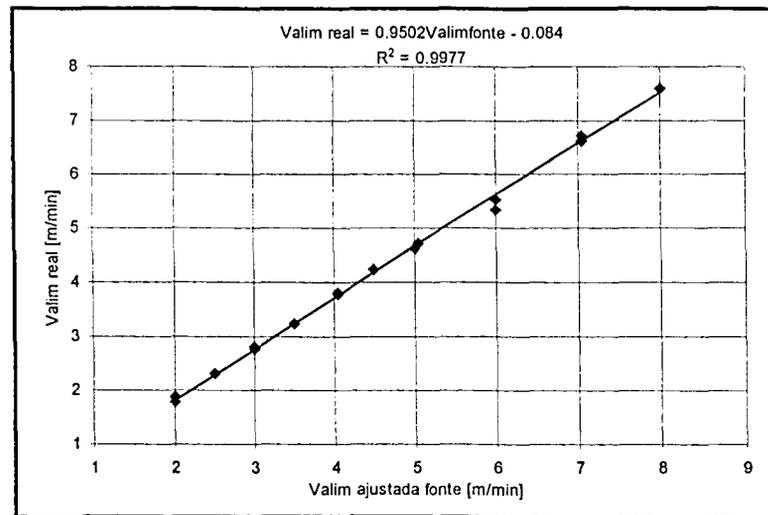


Figura 4.2 - Calibração da velocidade de alimentação.

Para efeitos práticos, todos os valores referidos doravante neste trabalho serão os valores reais e não os ajustados.

4.2 Característica estática da fonte

Para os três modos possíveis de se ajustar a fonte (modo misto, modo corrente constante com controle externo e modo corrente constante sem controle externo) foram propostos os testes listados na Tabela 4.1. Estes testes foram realizados mantendo-se constante $t_p = 3$ ms, $I_p = 20$ A, $t_b = 6$ ms e $V_{\text{sold}} = 50$ cm/min. Os resultados obtidos para estes oito testes são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Testes para seleção da característica estática da fonte

Teste	I_p [A]	U_{ref} [V]	V_{alim} [m/min]	Modo
CE1	200	22,3	—	Corrente constante com controle externo
CE2	200	21,0	—	Corrente constante com controle externo
CE3	200	15,0	—	Corrente constante com controle externo
CE4	200	15,0 a 21,0	—	Corrente constante com controle externo
CE5	200	—	5,5	Corrente constante sem controle externo
CE6	230	22,3	7,0	Misto
CE7	190	22,3	6,0	Misto
CE8	210	23,5	6,0	Misto

Tabela 4.2 - Resultados dos testes propostos para avaliação da característica estática da fonte

Teste	Observações
CE1	Queima do bico de contato
CE2	Queima do bico de contato
CE3	O arco inicia grande e depois há curto circuito
CE4	Para uma pequena tensão de referência (15 V) foi possível acender o arco sem queimar o bico. Entretanto, para conseguir um comprimento de arco em torno de 5 mm, foi necessário aumentar U_{ref} até 21 V
CE5	A soldagem ocorreu sem problemas
CE6	Ocorrência de curto-circuito
CE7	Ocorrência de um número menor de curto-circuito
CE8	Soldagem sem problemas com comprimento de arco em torno de 3 mm

Por estes resultados, ficou comprovada a inviabilidade de se soldar no modo corrente constante com o controle externo da velocidade de alimentação, provavelmente devido ao fato deste sistema de controle ser ajustado de fábrica mais para a soldagem do aço, que possui uma maior inércia de fusão comparado ao alumínio. Já o modo misto não mostrou-se interessante, pois a corrente de pico flutua durante a soldagem, o que torna problemática a definição do mapa de UGPP. Assim, o modo corrente constante sem controle externo foi utilizado, por não necessitar de ajustes durante a soldagem.

4.3 Rampa de velocidade de alimentação

Uma vez determinado o tipo de característica estática a ser utilizada, restava saber quanto tempo o arame demora para atingir a sua velocidade nominal. Este levantamento é de suma importância, pois só após a completa estabilização do processo é que o estudo pode ser iniciado. Neste sentido, foi proposto verificar qual a rampa de subida que a velocidade de alimentação possui para o acendimento adequado do arco.

Inicialmente foi feito um levantamento, mostrado na Tabela 4.3, para verificar a variação da rampa com a velocidade de alimentação. Estes testes foram conduzidos mantendo-se constante $I_b = 20$ A e $t_b = 6$ ms, observando-se a mínima rampa para qual foi possível acender o arco. De uma forma geral, observa-se que quanto maior é a velocidade de alimentação menor é o valor da rampa necessária para acender o arco, provavelmente porque a corrente também seja maior, sendo maior a geração de calor no contato durante o toque do eletrodo no instante do acendimento.

Tabela 4.3 - Testes para correlacionar a rampa e a velocidade de alimentação ($I_b = 20$ A e $t_b = 6$ ms) - Valores ajustados.

Teste	I_p [A]	t_p [ms]	I_m^* [A]	V_{alim} [m/min]	V_{sold} [cm/min]	Rampa mínima
RM1	155	2.0	53.8	4.2	28.5	10
RM2	155	3.0	65.0	4.8	32.5	10
RM3	155	4.0	74.0	5.3	35.5	10
RM4	200	2.0	65.0	4.7	31.5	2
RM5	200	3.0	80.0	5.8	39.0	4
RM6	200	4.0	92.0	6.7	44.5	3
RM7	255	2.0	78.8	6.1	41.0	2
RM8	255	3.0	98.3	7.4	49.5	2
RM9	255	4.0	114.0	8.2	55.0	2

* Calculada através da Equação 2.15.

A partir da Tabela 4.3, pode-se escolher uma condição na qual o arco possa acender a partir de uma rampa supostamente menor (supondo que a rampa 2 seja mais rápida que a rampa 10) de forma a verificar o tempo decorrido desde a abertura do arco até a sua estabilização. A condição escolhida foi a do teste RM8 e ajustou-se a rampa em cinco níveis diferentes como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores de tempo observados para cinco diferentes rampas.

Teste	Rampa	Tempo [ms]
RA1	1	341
RA2	2,5	381
RA3	5	465
RA4	7,5	494
RA5	10	628

A determinação do tempo de subida de cada rampa foi feita adquirindo-se, através do Sistema 1, os sinais de tensão e de um "encoder" preso à roldana de alimentação do arame, sem se preocupar com a calibração dos mesmo, pois o objetivo foi de medir apenas o instante em que o arco acende. A Figura 4.3 mostra como exemplo os oscilogramas obtidos para a rampa ajustada em 1 e em 10, onde é possível visualizar a tensão em vazio da fonte e o momento em que o arco se estabiliza. O momento onde há a estabilização do sinal do "encoder" foi adotado como o tempo da rampa.

Pela análise da Tabela 4.4 e da Figura 4.3 é possível concluir que há um relação direta entre a rampa ajustada e o tempo que a velocidade de alimentação demora para atingir seu valor nominal. Esta relação está expressada na Figura 4.4. Assim, o estudo do processo só deverá ser iniciado após decorrido este tempo, que é máximo para a rampa 10 e vale 0,63 s. Como para todos os ensaios de mapeamento da região de UGPP foi adotado um intervalo inicial de aproximadamente 2 s, não existe nenhuma interferência da rampa de subida nos resultados.

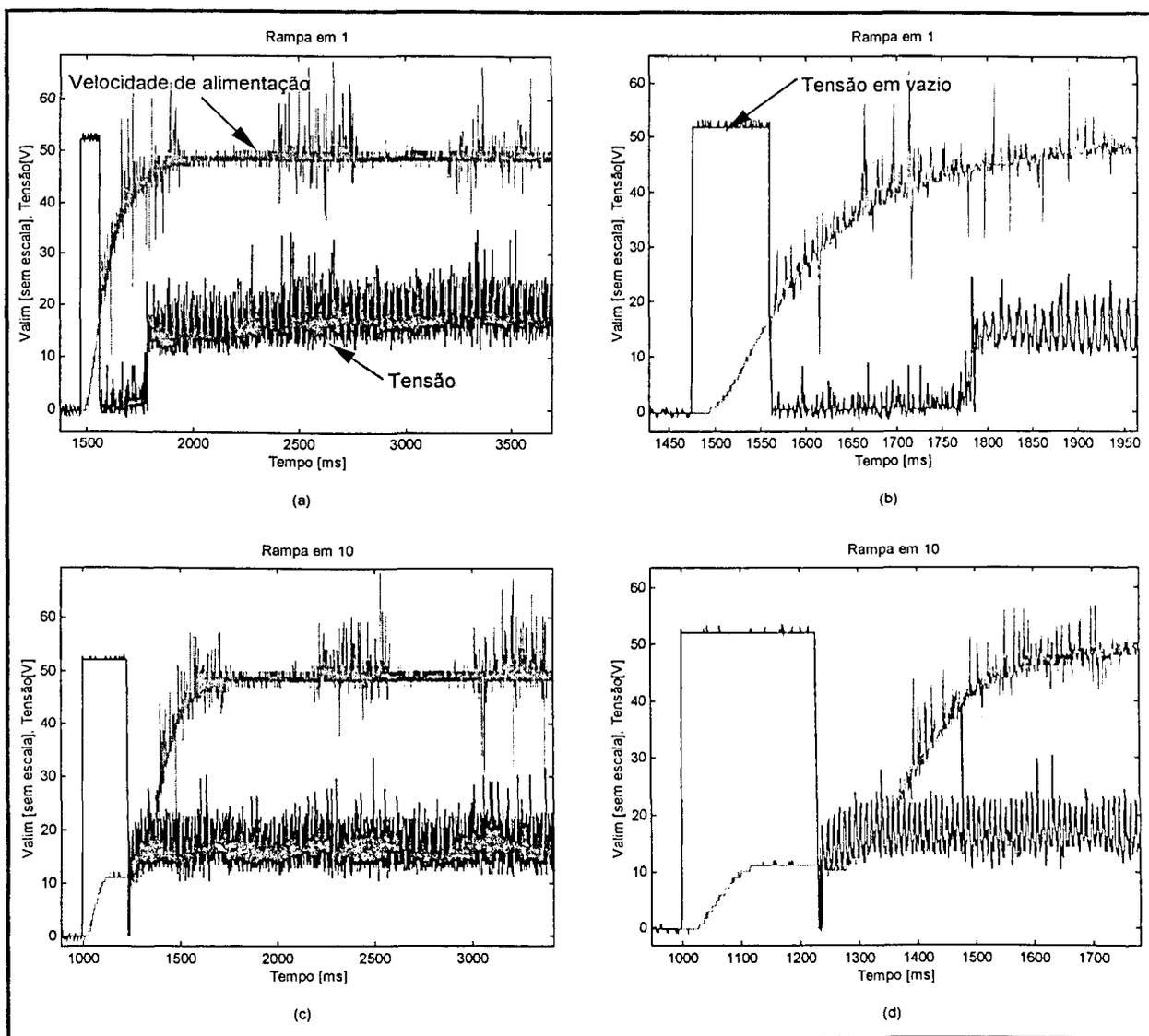


Figura 4.3 - Relação entre o ajuste da rampa de velocidade de alimentação e o acendimento do arco: (a) Rampa em 1; (b) Rampa em 1 com ampliação na escala do tempo; (c) Rampa em 10; (d) Rampa em 10 com ampliação na escala do tempo.

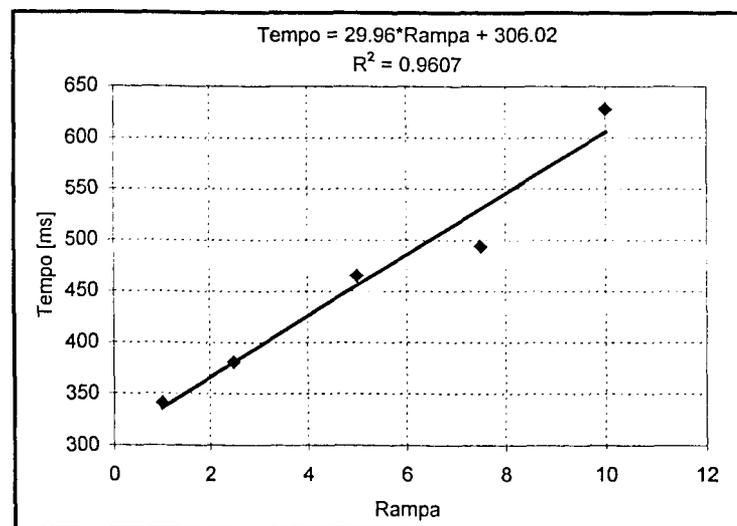


Figura 4.4 - Relação entre a rampa e o tempo para a velocidade de alimentação atingir seu valor nominal.

4.4 Verificação do sincronismo

Para a verificação do sincronismo entre os dois sistemas de aquisição de sinais, foi necessário inicialmente a aferição do número exato de quadros. Assim, foi efetuado o seguinte procedimento: filmou-se uma mão segurando um pino usado para fechar o contato do circuito de uma pilha de 1,5 V. O Sistema 1 de aquisição adquiriu o sinal desta pilha e o sinal da câmera. Ao observar na filmagem o pino tocando a pilha, pode-se anotar o número do quadro onde houve este contato. Ao observar os resultados do programa "contaquadros", nota-se que o contato ocorreu no mesmo quadro indicado visualmente pela câmera e indicado pelo pico de 1,5 V no oscilograma (antes do contato o circuito estava aberto). Deve-se ressaltar que a Câmera 1 inicia-se com o quadro número 1 e a Câmera 2 inicia-se no quadro 0.

Após determinar o número exato de quadros, verificou-se o quanto exato era a sincronia no tempo obtida pelo programa "contaquadros" entre os Sistemas 1 e 2. No teste RM8, suprimiu-se os oscilogramas de tensão e corrente e plotou-se apenas os sinais da câmera observados para cada sistema, como mostra a Figura 4.5. Nesta figura percebe-se, para momentos distintos do sinal, que o sincronismo obtido é muito bom e comprova as transformações descritas na metodologia para ambas as câmeras.

Posteriormente, o sincronismo foi mais uma vez confirmado com a aplicação do programa "contaquadros" para a soldagem de curto-circuito de diferentes materiais utilizados no LAPROSOLDA. Em cada momento onde haja um curto sendo visualizado na filmagem, os oscilogramas de tensão e corrente acompanham perfeitamente. Como conclusão, pode-se afirmar que o programa desenvolvido "contaquadros" funcionou muito bem, com relação ao sincronismo obtido.

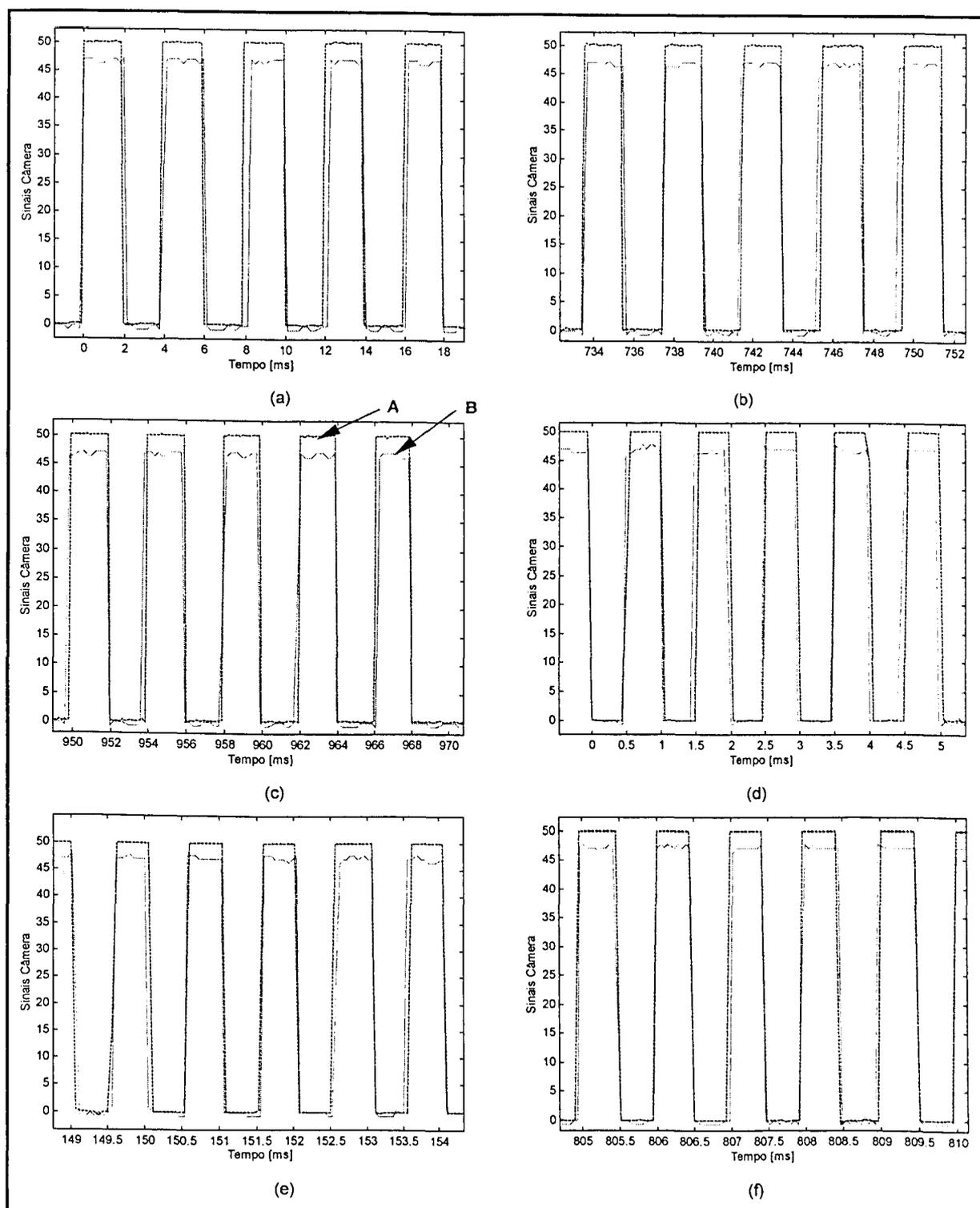


Figura 4.5 - Verificação do sincronismo entre os dois sistemas de aquisição: (a), (b) e (c) Câmera 1; (d), (e) e (f) Câmera 2; A - Sinal da câmera observado pelo Sistema 1; B - Sinal da câmera observado pelo Sistema 2.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Determinação da corrente de transição

Os valores utilizados na determinação da corrente de transição são mostrados na Tabela 5.1, bem como o tipo de transferência observada e os valores de corrente e tensão médios e eficazes obtidos. No caso dos ensaios TRANS1 e TRANS2, não se preocupou em efetuar uma medição mais detalhada, pois o objetivo era determinar a corrente de transição e não construir um mapa de transferência metálica. Na Tabela 5.2, encontra-se a média e o desvio padrão das medições efetuadas para o comprimento do arco (ℓ_a) e do eletrodo (ℓ). O comprimento do eletrodo foi calculado pela relação geométrica: $\ell = 15 - (\ell_a/\cos 10^\circ)$.

Tabela 5.1 - Ensaios para determinação da corrente de transição.

Ensaio	Transferência	U_{ref} [V]	V_{alim} [m/min]	V_{sold} [cm/min]	$\frac{V_{alim}}{V_{sold}}$	I_m [A]	I_{ef} [A]	U_m [V]	U_{ef} [V]
TRANS1	curto-circuito	18.0	8.5	60.0	14.1	—	—	—	—
TRANS2	curto-circuito	19.0	7.5	53.0	14.2	—	—	—	—
TRANS3	goticular	22.3	7.5	53.0	14.2	126.8	127	21.1	21.1
TRANS4	globular	22.3	5.6	40.0	14.0	95.9	96.3	21.2	21.2
TRANS5	transição	22.3	6.6	47.0	14.0	111.9	112	21.1	21.1
TRANS6	transição	22.3	7.0	50.0	14.1	121.2	121.4	21.1	21.1
TRANS7	goticular	22.3	7.2	51.5	14.1	124.2	124.5	21.1	21.1

Tabela 5.2 - Resultados obtidos para o comprimento do arco e do eletrodo.

Ensaio	ℓ_a médio [mm]	ℓ_a desvio padrão [mm]	ℓ [mm]
TRANS3	3.301	0.170199	11.648
TRANS4	5.495	0.115045	9.420
TRANS5	4.439	0.145571	10.493
TRANS6	4.521	0.121689	10.409
TRANS7	3.759	0.164102	11.183

Através dos resultados obtidos para V_{alim} , l_m , l_{ef} e ℓ , pode-se calcular as constantes α e β da Equação 2.14 (critério da taxa de fusão), fazendo uso de regressão não linear. Para tanto, utilizou-se um programa comercial de estatística, encontrando-se $\alpha = 9,55827 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ e $\beta = 1,71996 \cdot 10^{-5} \text{ A}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. O método de estimação adotado foi o Quase-Newton. O coeficiente de correlação encontrado foi de 99,622%, o que mostra o bom ajuste proporcionado pelo modelo teórico. Graficamente, pode-se comparar os resultados obtidos com AWS (1991), como mostrado na Figura 5.1. Nesta figura nota-se que os resultados obtidos (arame de 1,0 mm) se encontram entre os resultados da literatura (0,9 e 1,2 mm). Como o objetivo era somente identificar a corrente de transição, não varreu-se uma faixa de corrente média muito grande. Assim, os pontos experimentais mostrados na Figura 5.1 estão bem próximos e em níveis de corrente inferiores se comparados aos demais diâmetros mostrados.

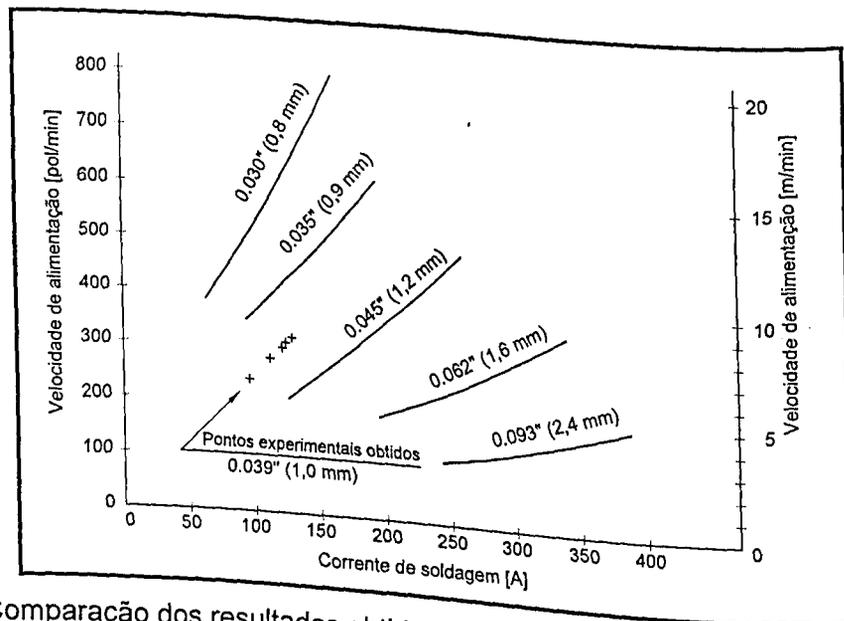


Figura 5.1 - Comparação dos resultados obtidos com AWS (1991).

Com relação ao diâmetro das gotas, a Tabela 5.3 traz os valores médios obtidos com os respectivos desvios padrões. Foram observadas duas formas de destacamento, referenciadas como gota única, quando havia somente uma gota se destacando num período e diâmetro aproximadamente constantes, e como gota primária e secundária, quando havia duas gotas distintas, uma maior se destacando inicialmente e outra menor destacando-se em seguida, com uma periodicidade e diâmetros também quase constantes. A frequência de destacamento das gotas (F_{gotas}) também é mostrada. Nota-se que a frequência de destacamento da transferência goticular, como é correntemente citado na literatura, aumenta e o diâmetro das gotas diminui a medida que a transferência vai de globular para

Baseando-se na frequência de destacamento e na velocidade de alimentação, pode-se fazer uso da Equação 2.25 e calcular o diâmetro teórico a ser obtido. Os resultados teóricos divergiram dos experimentais provavelmente devido a uma simplificação efetuada na Equação 2.25, que despreza a diferença de densidade existente entre a gota (líquida) e a ponta fundente do eletrodo (parcialmente sólida). Hatch (1984) apresenta que a densidade do alumínio puro (99,996%) a uma temperatura de 1173 K (líquido) é 2304 kg/m^3 e no estado sólido é em torno de 2697 kg/m^3 , ou seja, há um erro em torno de 15% na Equação 2.25 para o alumínio puro. Isto, se aplicado na liga do eletrodo ER 4043, pode justificar a discrepância obtida.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos para o diâmetro (d_g) e frequência das gotas (F_{gotas}).

Ensaio	d_g médio [mm]			d_g desvio padrão [mm]			F_{gotas} [Hz]	d_g [mm] calculado
	Primária	Secund.	Única	Primária	Secund.	Única		
TRANS3			1.259			0.04748	146.34	1.087
TRANS4			1.637			0.04844	47.62	1.434
TRANS5	1.678	1.185		0.05106	0.19888		87.84	1.232
TRANS6	1.589	1.213		0.05915	0.02494		90.00	1.251
TRANS7			1.243			0.00795	138.89	1.094

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são mostradas algumas imagens que caracterizam o tipo de transferência obtida, com os respectivos oscilogramas de tensão e corrente.

Como a transição entre o modo de transferência globular e goticular para o eletrodo ER 4043 (1,0 mm) encontrada foi para uma faixa de corrente média entre 112 e 122 A, adotou-se 155 A como o valor mínimo para a corrente de pico, com o qual se iniciará o mapeamento da região de UGPP, como mostrado no item seguinte.

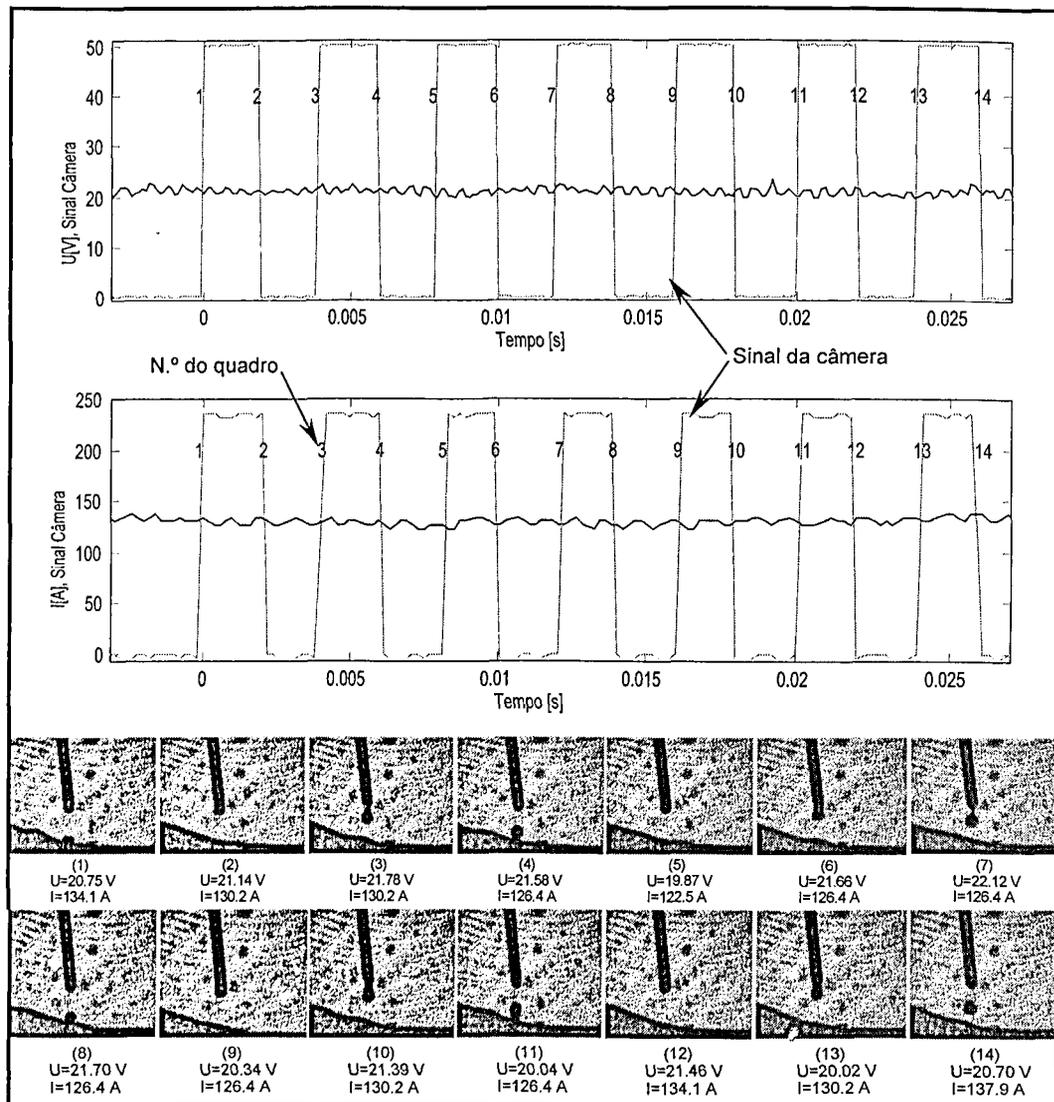


Figura 5.2 - Transferência goticular (ensaio TRANS3).

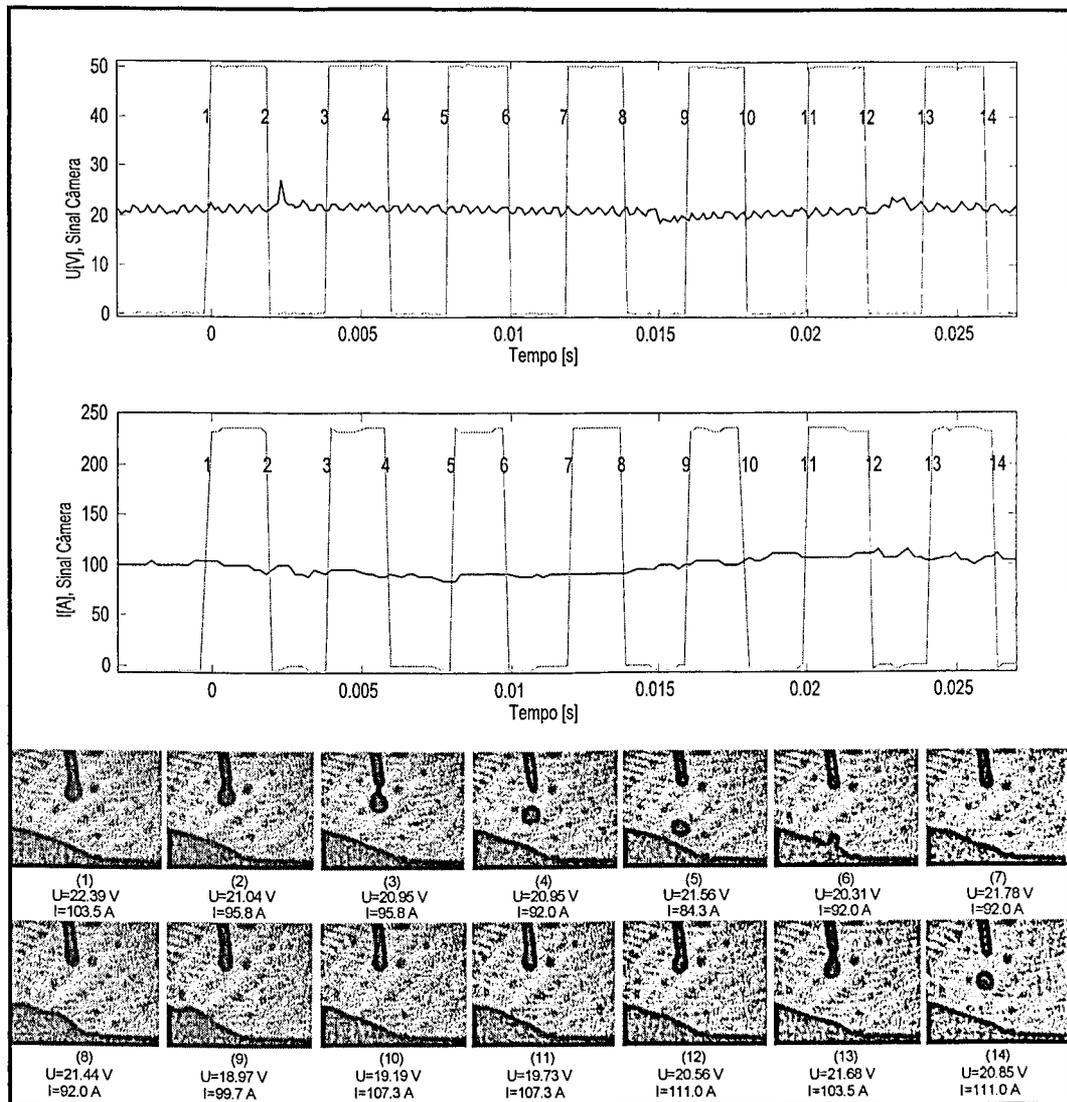


Figura 5.3 - Transferência globular (ensaio TRANS4).

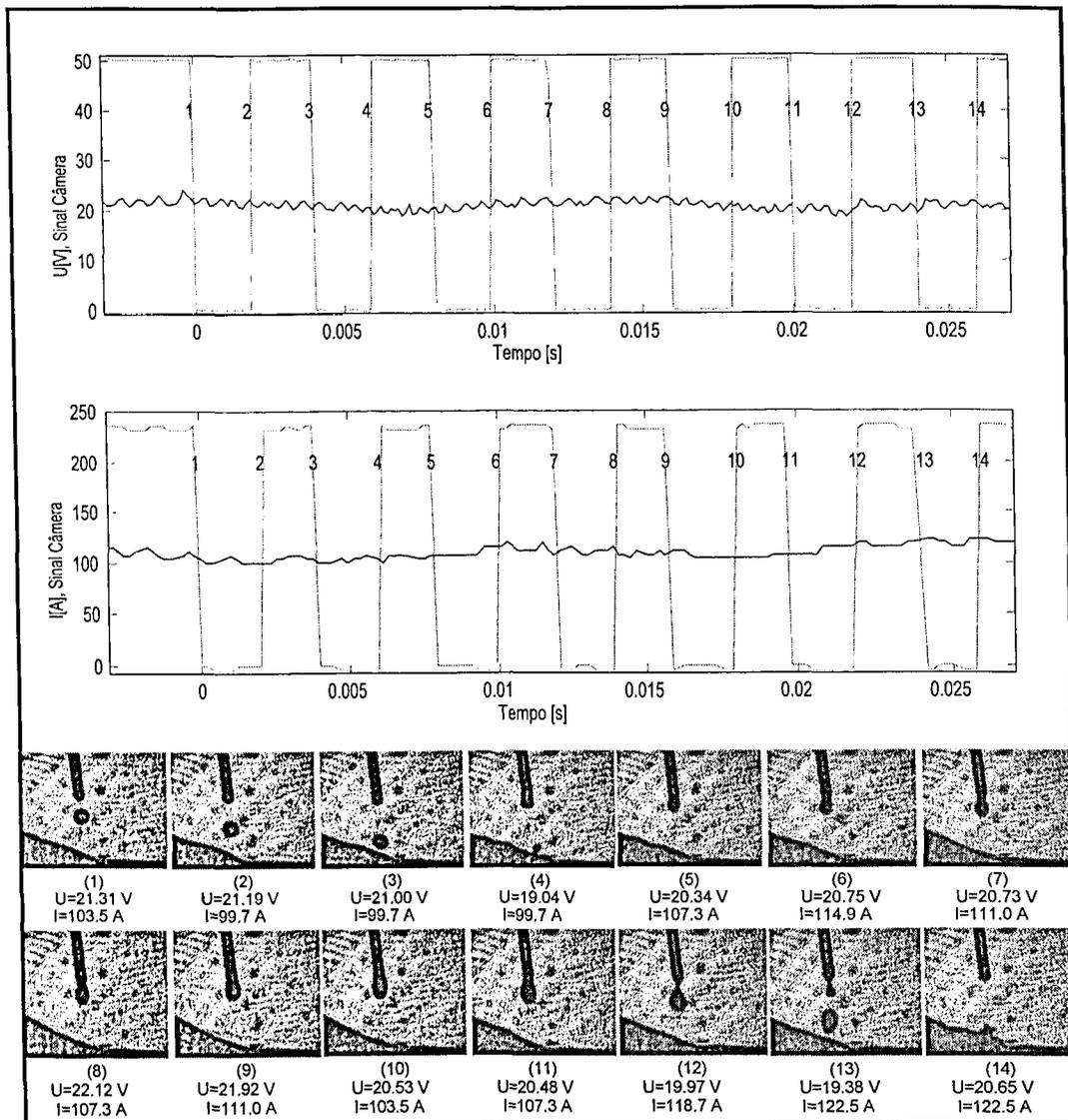


Figura 5.4 - Transferência de transição globular-gotícular (ensaio TRANS5).

5.2 Mapeamento da região de UGPP

Para se construir o mapa, inicialmente foram propostos nove ensaios (MAP01 a MAP09) para se ter uma estimativa dos limites da região de UGPP. Estes nove ensaios representam três níveis de I_p (155, 200 e 255 A) e três níveis de t_p (2,0; 3,0 e 4,0 ms). Para se estimar o valor inicial para a velocidade de alimentação a ser utilizada, calculou-se seu valor por meio da Equação 2.14, utilizando-se os valores de α e β obtidos durante a determinação da corrente de transição. Pela Tabela 5.4, que representa os valores iniciais ajustados e a velocidade de alimentação e de soldagem realmente utilizadas, fica claro que a corrente pulsada demanda valores de velocidade de alimentação maiores do que para corrente contínua constante, para uma mesma corrente média abaixo da corrente de transição. Este resultado discorda do apresentado por Rajasekaran et al (1998) mostrado na Figura 2.17. O principal motivo é que

este autor utilizou um eletrodo de material e diâmetros diferentes. Entretanto, pela premissa do processo pulsado de obter corrente médias menores do que o processo convencional para uma mesma velocidade de alimentação, os valores aqui obtidos concordam com tal premissa.

Tabela 5.4 - Testes iniciais para a determinação da região de UGPP ($I_b = 20$ A e $t_b = 6$ ms).

Ensaio	I_p^1 [A]	t_p^1 [ms]	I_m^2 [A]	I_{ef}^3 [A]	$V_{alim_calc}^4$ [m/min]	$V_{alim_usada}^5$ [m/min]	V_{sold}^6 [cm/min]	$\frac{V_{alim_usada}}{V_{sold}}$
MAP01	255	2.0	78.8	128.7	4.7	6.0	41.0	14.8
MAP02	255	3.0	98.3	148.1	5.9	7.1	49.5	14.3
MAP03	255	4.0	114.0	162.0	6.8	8.2	53.5	15.3
MAP04	200	2.0	65.0	101.5	3.8	4.8	32.5	14.9
MAP05	200	3.0	80.0	116.6	4.7	5.8	39.0	14.9
MAP06	200	4.0	92.0	127.4	5.4	6.7	44.5	15.1
MAP07	155	2.0	53.8	79.4	3.1	4.2	28.5	14.7
MAP08	155	3.0	65.0	91.0	3.8	4.3	32.5	13.4
MAP09	155	4.0	74.0	99.2	4.3	5.3	35.5	15.1

¹ Valores ajustados;

² Calculada através da Equação 2.15;

³ Calculada através da Equação 2.18;

⁴ Calculada através da Equação 2.14, a partir do α e β obtidos na determinação da corrente de transição;

⁵ Obtida por tentativa e erro para se conseguir um comprimento de arco em torno de 5 mm;

⁶ $V_{sold} = V_{alim_usada}/15$.

A partir destes nove primeiros ensaios, propôs-se o primeiro refinamento, mostrado na Tabela 5.5, compostos dos ensaios MAP10 a MAP16. Por fim, foi necessário realizar mais três ensaios (MAP17 a MAP19), mostrados na Tabela 5.6, de tal forma a delimitar adequadamente a região de UGPP. As rampas de velocidade de alimentação foram ajustadas em 5 para os ensaios onde $I_p = 155$ A e em 10 para os demais ensaios, de forma a simplificar a sua escolha e garantir o acendimento adequado do arco. Estes valores foram selecionados conforme já mostrado nos testes preliminares.

Deve-se ressaltar que nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 estão apresentados os valores ajustados para os parâmetros de pulso e os valores reais das velocidades de alimentação e de soldagem. Já a Tabela 5.7 traz os resultados para os parâmetros de pulso a partir do programa "contaquadros" (valores reais) para todos os ensaios. Na Tabela 5.8 estão apresentados os resultados obtidos pela medição do comprimento do arco, feito da mesma forma que aquele determinado durante a fase de determinação da corrente de transição.

Tabela 5.5 - Primeiro refinamento da região de UGPP ($I_b = 20$ A e $t_b = 6$ ms).

Ensaio	I_p^1 [A]	t_p^1 [ms]	I_m^2 [A]	$V_{alim_estimada}^3$ [m/min]	V_{sold}^4 [cm/min]	$V_{alim_usada}^5$ [m/min]	$\frac{V_{alim_usada}}{V_{sold}}$
MAP10	255	1.5	66.0	4.8	32.0	4.7	14.8
MAP11	255	2.5	87.5	6.2	41.5	6.3	15.3
MAP12	200	1.5	56.0	4.5	30.0	3.9	13.0
MAP13	200	2.5	73.0	5.3	35.5	5.1	14.4
MAP14	200	3.5	86.5	6.3	42.0	5.9	14.2
MAP15	155	2.5	58.0	4.6	30.5	4.2	13.9
MAP16	155	3.5	68.0	5.1	34.0	5.0	14.7

¹ Valores ajustados;

² Calculada através da Equação 2.15;

³ Estimada com base nos ensaios MAP01 a MAP07;

⁴ $V_{sold} = V_{alim_usada}/15$;

⁵ Obtida por tentativa e erro para se conseguir um comprimento de arco em torno de 5 mm.

Tabela 5.6 - Segundo refinamento da região de UGPP ($I_b = 20$ A e $t_b = 6$ ms).

Ensaio	I_p^1 [A]	t_p^1 [ms]	I_m^2 [A]	$V_{alim_estimada}^3$ [m/min]	V_{sold}^4 [cm/min]	$V_{alim_usada}^5$ [m/min]	$\frac{V_{alim_usada}}{V_{sold}}$
MAP17	255	1.0	52.9	3.9	26.0	4.0	15.4
MAP18	200	1.7	59.7	4.2	28.0	4.2	15.0
MAP19	200	2.7	75.9	5.2	34.5	5.7	16.5

¹ Valores ajustados;

² Calculada através da Equação 2.15;

³ Estimada com base nos ensaios MAP01 a MAP16;

⁴ $V_{sold} = V_{alim_usada}/15$;

⁵ Obtida por tentativa e erro para se conseguir um comprimento de arco em torno de 5 mm.

Tabela 5.7 - Valores reais obtidos pelo programa "contaquadros".

Ensaio	I_p [A]	t_p [ms]	I_b [A]	t_b [ms]	I_m [A]	I_{ef} [A]	U_p [V]	U_b [V]	U_m [V]	U_{ef} [V]
MAP01	255.5	2.07	21.1	6.08	81.1	126.6	25.34	18.48	20.30	20.58
MAP02	255.2	2.94	20.8	6.10	97.8	144.1	25.65	18.47	20.72	21.04
MAP03	255.2	4.08	20.8	6.10	115.1	160.1	25.84	18.41	21.21	21.58
MAP04	197.9	2.03	20.5	6.10	65.4	98.8	23.24	17.98	19.28	19.47
MAP05	198.2	2.99	20.5	6.10	79.6	113.7	22.80	17.76	19.79	20.00
MAP06	198.2	4.07	20.5	6.10	92.3	125.5	21.43	15.87	18.01	18.28
MAP07	156.0	1.91	20.5	6.03	53.3	77.2	21.70	17.60	18.84	19.03
MAP08	154.5	2.83	19.4	6.21	61.7	86.7	22.61	18.01	19.34	19.48
MAP09	154.5	3.88	19.3	6.21	71.3	95.9	26.08	18.98	19.49	19.63
MAP10	253.5	1.37	19.4	6.20	61.8	104.1	23.22	18.74	20.29	20.54
MAP11	253.5	2.35	19.3	6.20	83.8	130.2	21.49	17.61	21.12	21.43
MAP12	196.5	1.37	19.4	6.20	52.2	83.3	21.97	17.84	19.04	19.18
MAP13	196.7	2.32	19.4	6.20	67.9	101.9	21.76	17.89	20.29	20.51
MAP14	196.8	3.31	19.4	6.20	81.2	115.4	24.12	18.18	20.24	20.49
MAP15	154.5	2.38	19.4	6.20	56.9	81.7	24.72	18.81	19.24	19.37
MAP16	154.4	3.41	19.3	6.21	67.2	92.2	26.41	19.05	20.53	20.69
MAP17	253.0	0.92	19.7	6.10	51.7	89.2	23.88	17.32	18.32	18.50
MAP18	199.0	1.68	19.4	6.10	59.0	92.2	22.28	17.55	18.77	18.92
MAP19	198.9	2.77	19.7	6.10	76.4	111.2	22.38	16.77	18.51	18.75

Foram verificados também diferentes modos de transferência. Numa forma simples como mostrado na Figura 5.5 (confeccionada a partir dos valores reais de I_p e t_p da Tabela 5.7), pode-se dizer que existem três modos distintos: UGPP, mais de UGPP e menos de UGPP. Entretanto, as transferências que ocorrem fora da região de UGPP, podem ser subdivididas como mostra a Tabela 5.9. Unindo esta tabela com a Tabela 5.10, que traz os diâmetros das gotas, a frequência de pulsação e a frequência dos destacamentos, pôde-se construir a Figura 5.6.

Tabela 5.8 - Resultados obtidos para o comprimento do arco e do eletrodo.

Ensaio	l_a médio [mm]	l_a desvio padrão [mm]	l [mm]
MAP01	4.266	0.1805	10.668
MAP02	4.076	0.3252	10.861
MAP03	4.118	0.1683	10.818
MAP04	4.228	0.2059	10.707
MAP05	3.598	0.2332	11.346
MAP06	2.886	0.1793	12.069
MAP07	3.406	0.2425	11.542
MAP08	4.632	0.1006	10.297
MAP09	3.535	0.1772	11.410
MAP10	6.008	0.1190	8.899
MAP11	5.295	0.1259	9.624
MAP12	3.493	0.1143	11.453
MAP13	5.798	0.1564	9.113
MAP14	4.995	0.1768	9.928
MAP15	4.107	0.0542	10.830
MAP16	5.298	0.1148	9.621
MAP17	3.750	0.1316	11.192
MAP18	3.985	0.0720	10.954
MAP19	4.097	0.0658	10.840

Tabela 5.9 - Tipo de transferência observada.

Ensaio	Tipo de transferência observada
MAP01	UGPP
MAP02	Uma gota no pico seguida de uma gota na base
MAP03	Duas gotas no pico mais uma gota na base ou somente duas gotas no pico
MAP04	UGPP
MAP05	Uma gota no pico mais uma gota na base ou somente uma gota no pico
MAP06	Duas gotas no pico
MAP07	Uma gota na base após um ou dois picos
MAP08	UGPP
MAP09	Uma gota no pico mais uma gota na base ou somente uma gota no pico

Tabela 5.9 - Tipo de transferência observada (continuação).

Ensaio	Tipo de transferência observada
MAP10	UGPP
MAP11	Uma gota no pico mais uma gota na base ou somente uma gota no pico
MAP12	Uma gota por período se destacando na base
MAP13	UGPP
MAP14	Uma gota no pico mais uma gota na base ou somente uma gota no pico
MAP15	Uma gota se destaca na base por três períodos seguidos. No quarto período não ocorre destacamento, reiniciando por mais três períodos sucessivamente.
MAP16	UGPP
MAP17	Uma gota por período se destacando na base
MAP18	Uma gota por período se destacando na base
MAP19	Uma gota no pico mais uma gota na base ou somente uma gota no pico

Tabela 5.10 - Resultados obtidos para o diâmetro da gota, frequência de pulsação e de destacamento.

Ensaio	d_g médio e <i>desvio padrão</i> [mm]					F [Hz]	F_{gotas} [Hz]
	Primá.	Secund.	Terciá.	Únicgran	Únicpeq		
MAP01	1.1733 0.0439					122.70	125.71
MAP02	1.0403 0.0510	0.9074 0.0775				110.62	231.58
MAP03	1.1150 0.1391	0.9112 0.0969	1.0131 0.0553			98.23	251.94
MAP04	1.0776 0.0443					123.00	126.20
MAP05	1.1635 0.0498	0.9282 0.0235		0.8274 0.0561		110.01	165.32
MAP06	1.1643 0.0658	0.8176 0.0365				98.33	202.02
MAP07				1.2896 0.0621	1.0478 0.0546	125.94	79.39
MAP08	1.1725 0.0512					110.62	113.54

Tabela 5.10 - Resultados obtidos para o diâmetro da gota, frequência de pulsação e de destacamento (continuação).

Ensaio	d_g médio e <i>desvio padrão</i> [mm]					F [Hz]	F_{gotas} [Hz]
	Primá.	Secund.	Terciá.	Únicgran	Únicpeq		
MAP09	1.2221 0.0163	1.0102 0.0171		1.4810 0.0467	1.1349 0.0488	99.11	122.38
MAP10	1.0904 0.0628					132.10	135.59
MAP11	1.1499 0.0485	0.7954 0.0461		0.9709 0.0407		116.96	176.66
MAP12	1.0456 0.0205					132.10	135.02
MAP13	1.2388 0.0560					117.37	120.14
MAP14	1.3093 0.0456	0.9144 0.0561		1.0554 0.0601		105.15	150.44
MAP15				1.4578 0.0291	1.1450 0.0584	116.55	88.08
MAP16	1.2090 0.0433					103.95	106.76
MAP17	0.9481 0.0125					142.36	145.83
MAP18	0.9712 0.0270					128.56	132.01
MAP19	1.0998 0.0459	0.7694 0.0301		0.8535 0.0390		112.84	174.17

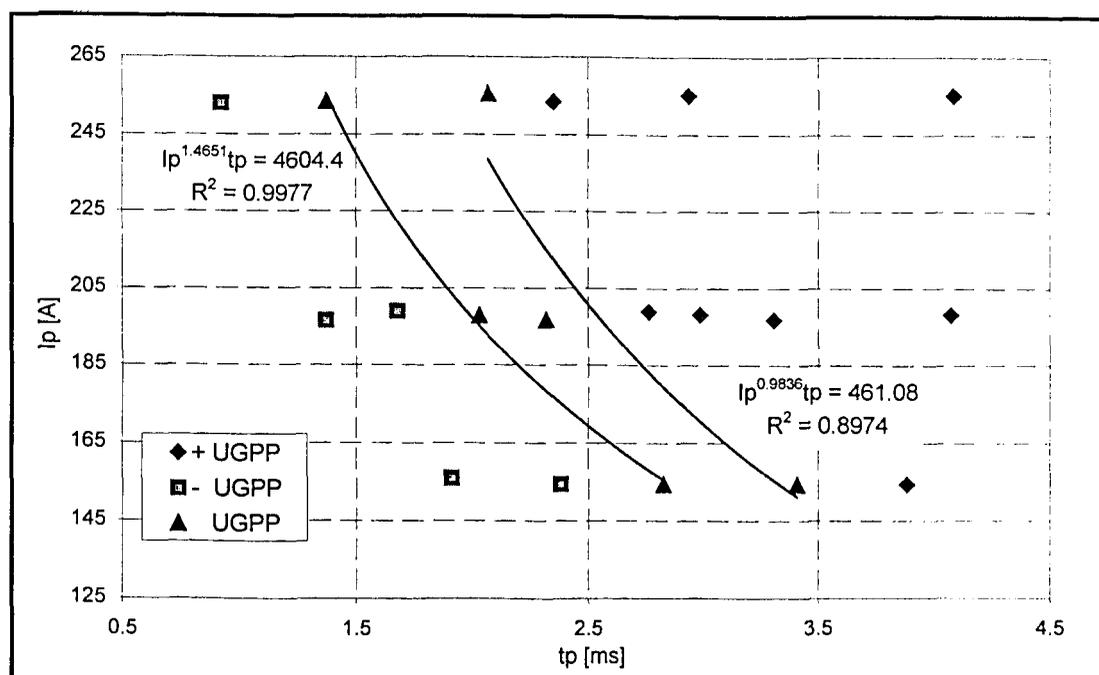


Figura 5.5 - Mapa da região de UGPP, ER 4043 (1,0 mm), Ar puro, $I_b = 20$ A e $t_b = 6$ ms.

No mapa da Figura 5.5 encontram-se os valores das constantes n e D para o lado direito e esquerdo da região. Pode-se comparar a região de UGPP obtida com a região mapeada por Grubic & Andric (1995), mostrada na Figura 2.22, apesar das diferenças entre as condições aqui utilizadas (arame de liga AlSi5,0 com diâmetro de 1,0 mm) e as condições utilizadas por Grubic & Andric (arame de liga AlMg5,0 e diâmetros de 1,2 e 1,6 mm). Esta comparação é necessária devido à escassez de dados na literatura. Ao se comparar os resultados, observa-se que a tendência das curvas ficaram bastante coerentes: mesma inclinação e de mesma largura. Naturalmente, quanto à posição, as regiões obtidas por Grubic & Andric são mais deslocadas para a direita e para cima devido aos maiores diâmetros, o que implica numa maior energia (maior produto $I_p \cdot t_p$) para fundir um mesmo comprimento de eletrodo.

Pode-se detalhar o mapa da Figura 5.5, subdividindo-se os tipos de transferência observados como mostra a Figura 5.6. Nesta figura também estão apresentados o nome de cada ensaio e os diâmetros de gota determinados. Pode-se observar que dentro da região de UGPP, os ensaios situados no limite esquerdo possuem um diâmetro de gota maior. Fora da região de UGPP, devido aos vários tipos de destacamento, torna-se difícil traçar qualquer comparativo.

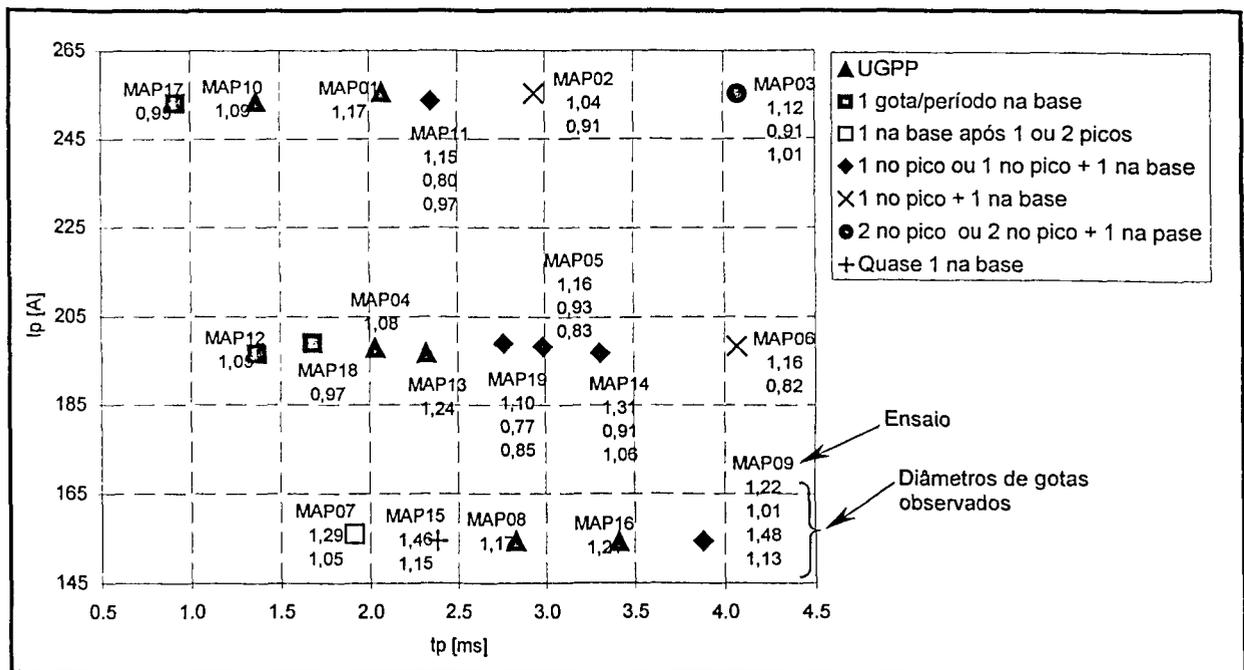


Figura 5.6 - Identificação dos vários tipos de transferência observados.

Uma outra forma de apresentar este mapa foi mostrada na Figura 2.23, e refere-se a fato de que independente do tipo de destacamento, a constante n é a mesma. Através dos resultados aqui obtidos, construiu-se a Figura 5.7, utilizando-se dos ensaios onde obteve-se UGPP, dos ensaios onde obteve-se menos de UGPP e dos ensaios próximos a UGPP, mas que proporcionaram mais de UGPP. Deve-se notar que os eixos sofreram uma transformação logarítmica. Analisando-se a Figura 5.7, nota-se que os ensaios com menos de UGPP e com UGPP apresentaram inclinações próximas ($n = 0.5485$ e $n = 0.6209$, respectivamente). Já para os ensaios que apresentaram mais de UGPP e próximos ao limite esquerdo da região de UGPP, a inclinação obtida foi bem diferente ($n = 0.9492$). Assim, para as condições utilizadas, não foi possível modelar os diversos tipos de destacamento com uma única constante n . Como o número de ensaios foi pequeno, é proposto, como trabalho futuro, investigar a possibilidade em se modelar os diversos tipos de destacamentos utilizando-se somente um valor n .

Como exemplo dos diversos tipos de destacamento observados são apresentadas as Figuras 5.8 a 5.12, que ilustram as imagens obtidas, juntamente com os oscilogramas de tensão e corrente, que comprovam a precisão da técnica Shadowgrafia Sincronizada. Durante a análise das filmagens, observou-se fenômenos interessantes como o mostrado na Figura 5.10. Nesta figura, a gota se desprende no quadro 14, permanece "imóvel" até o quadro 16, quando é novamente incorporada ao eletrodo no quadro 17. O estudo de fenômenos como este abrem um grande campo para estudos futuros sobre transferência metálica.

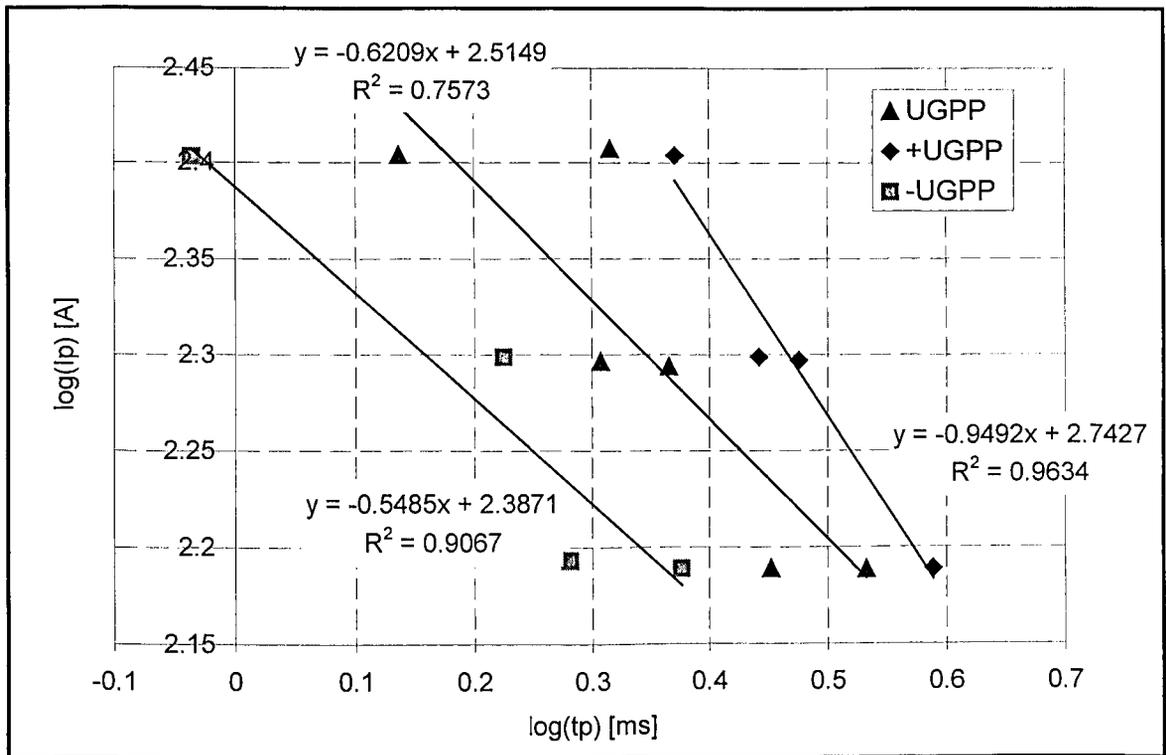


Figura 5.7 - Relação logarítmica entre I_p e t_p para três tipos de destacamento.

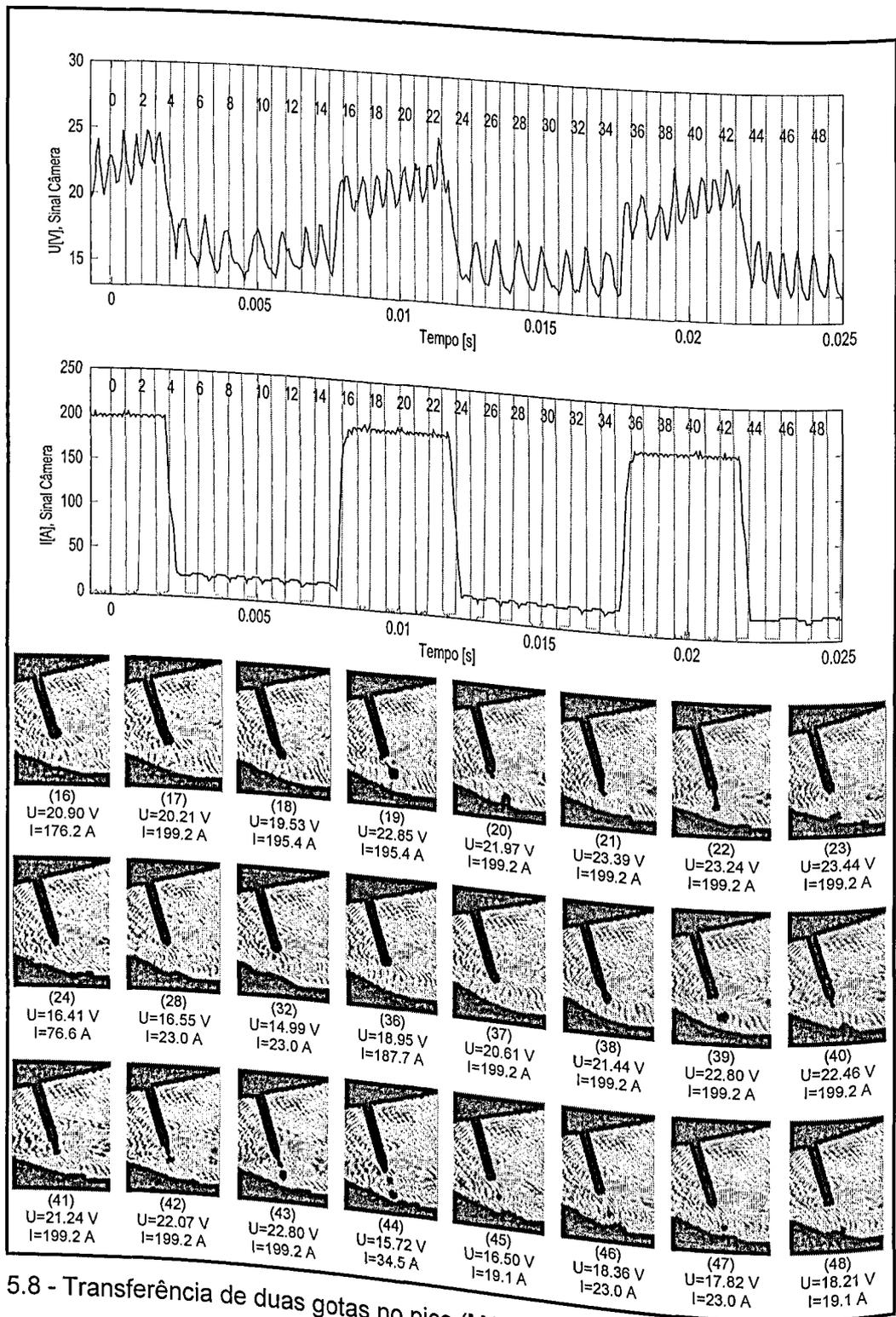


Figura 5.8 - Transferência de duas gotas no pico (MAP06).

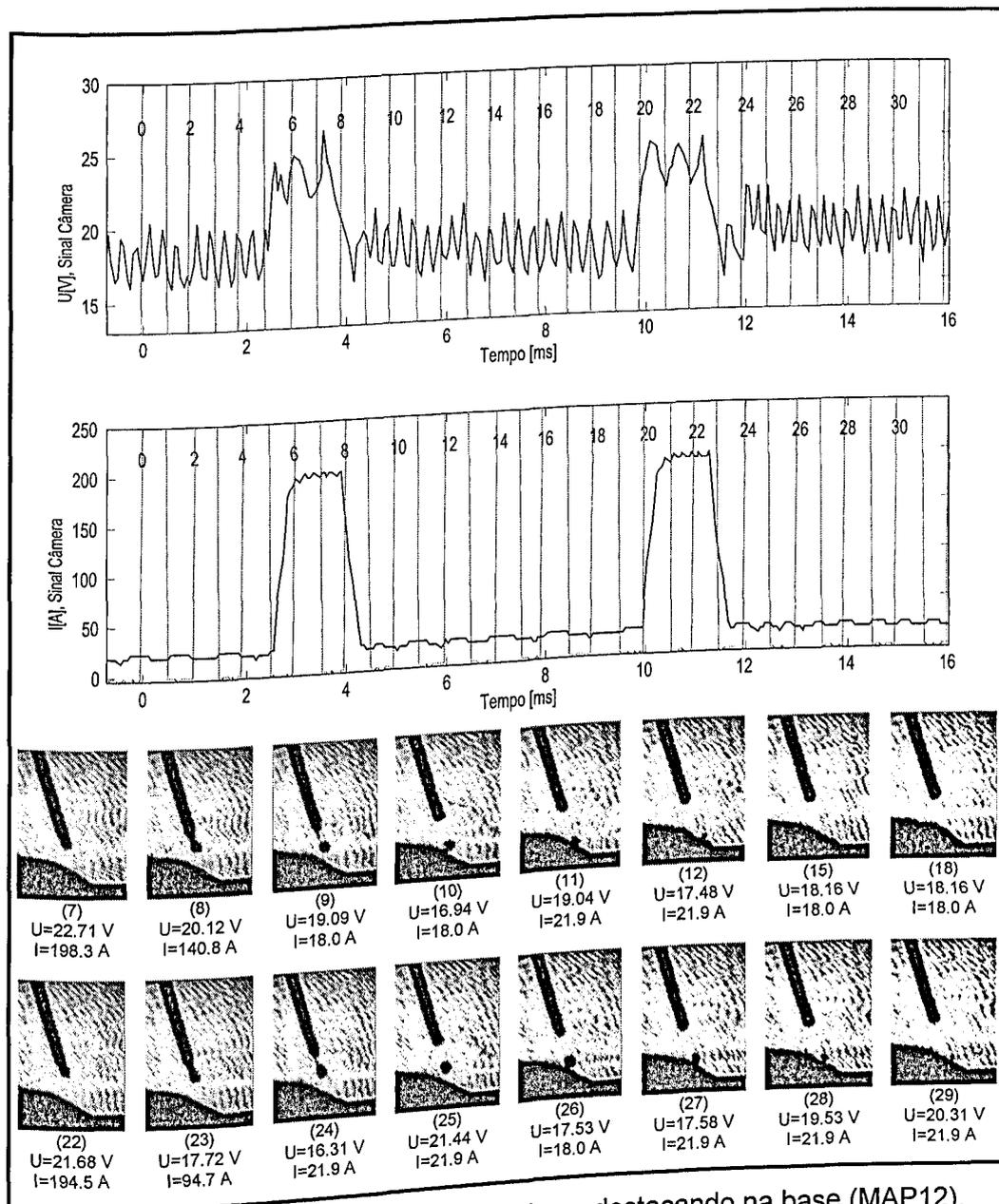


Figura 5.9 - Transferência de uma gota por período se destacando na base (MAP12).

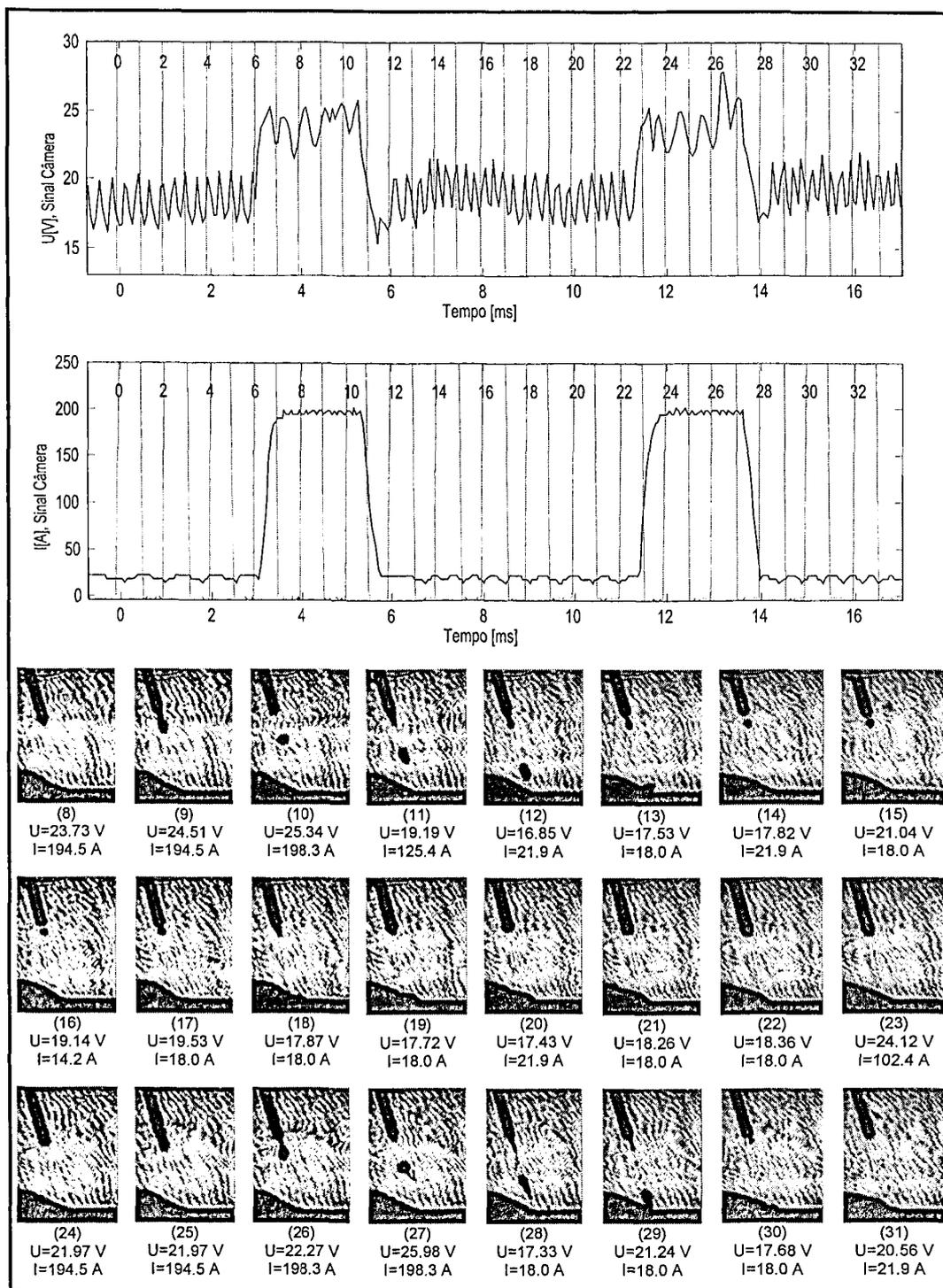


Figura 5.10 - Transferência de UGPP (MAP13). Observação de fenômenos interessantes como a gota "imóvel" (quadros 14 a 17).

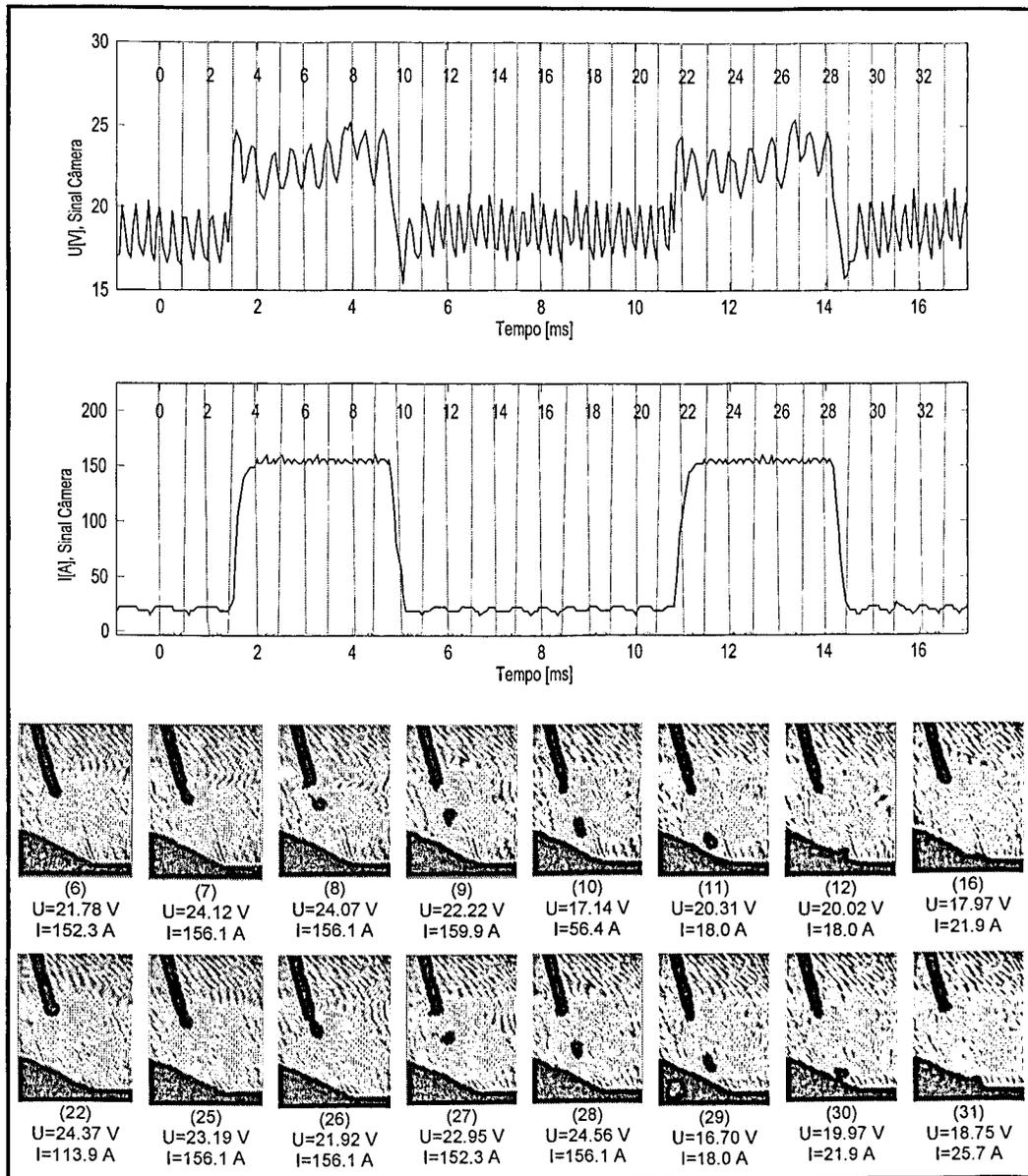


Figura 5.11 - Transferência de UGPP (MAP17).

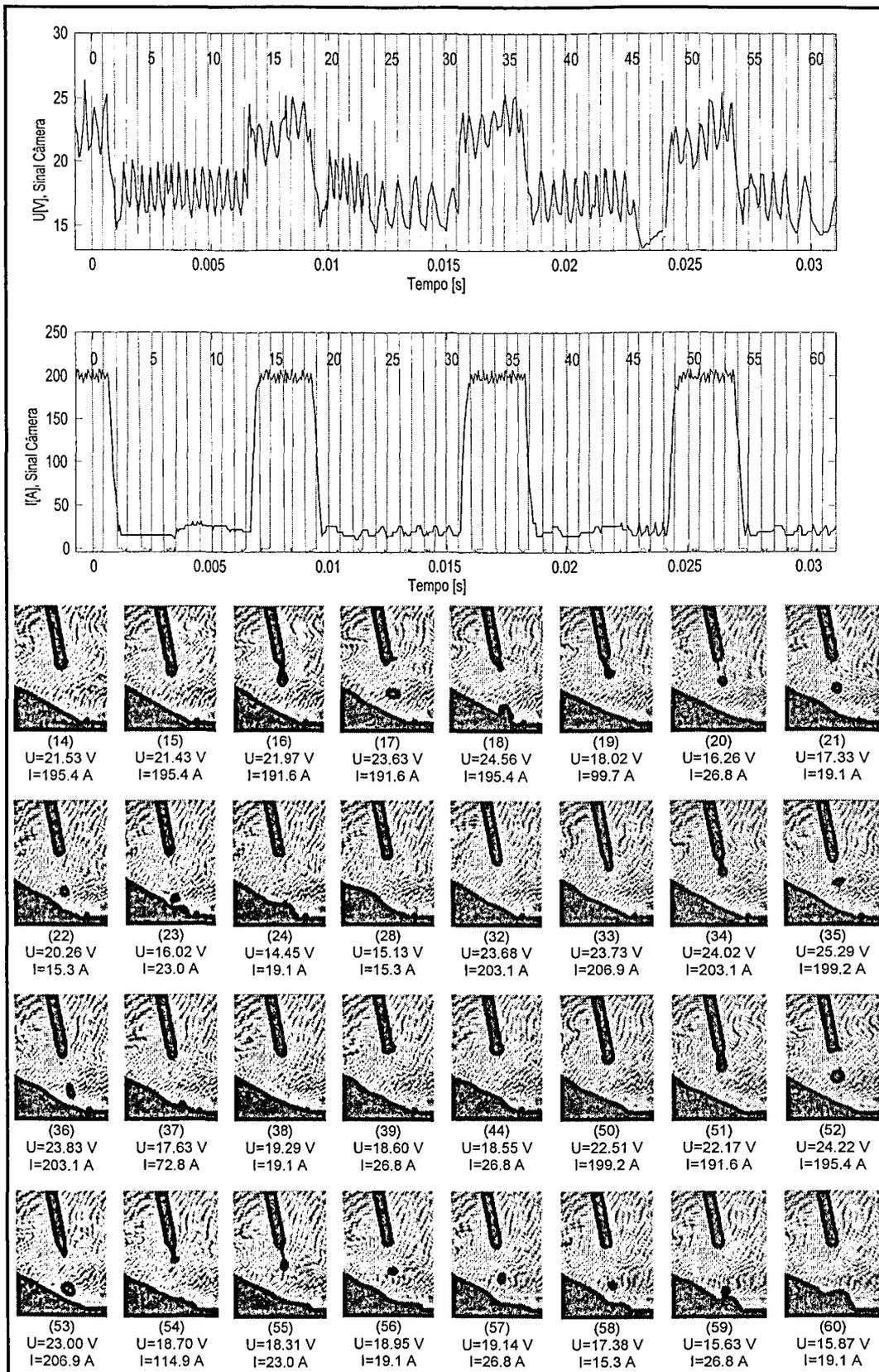


Figura 5.12 - Transferência de uma gota no pico ou uma gota no pico mais uma na base (MAP19).

Semelhantemente ao modo de tensão constante, calculou-se os valores das constantes α e β para os testes pulsado através do método de estimação Quase-Newton. Para este cálculo, utilizou-se dois conjuntos de parâmetros: somente os ensaios onde se obteve UGPP e utilizando-se todos os 19 ensaios. No primeiro caso, para os pontos onde se obteve UGPP encontrou-se $\alpha = 11,10026 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ e $\beta = 2,96770 \cdot 10^{-5} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, com um coeficiente de correlação de 95,321%. Para todos os 19 ensaios encontrou-se $\alpha = 12,03275 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ e $\beta = -2,95338 \cdot 10^{-5} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, com um coeficiente de correlação de 98,958%. Este valor negativo de β concorda com o obtido para o mesmo eletrodo (ER 4043), mas com diâmetro de 1,2 mm, como mostrado na Tabela 2.1. Apesar do valor negativo de β enfatizar a baixa resistividade elétrica do alumínio, era de se esperar que o seu valor mínimo fosse zero e não um valor negativo. Scotti (1991) comenta a respeito dos cuidados na interpretação de coeficientes obtidos através de uma regressão: quando há uma aparente contradição da intuição e um coeficiente apresenta um sinal "errado", pode ter como causa uma pequena faixa utilizada para os fatores, não inclusão de fatores importantes e a presença de multicolinearidade.

Como já dito, o modo pulsado demandou velocidades de alimentação maiores que o modo tensão constante, para uma mesma corrente média. Numa análise final, pode-se construir o gráfico mostrado na Figura 5.13. Por esta figura, tem-se que as inclinações das curvas que ajustariam os pontos obtidos para o modo pulsado e corrente constante e contínua (tensão constante) são aproximadamente constantes, já que a constante α para o processo pulsado foi próxima da obtida para o modo tensão constante. Os interceptos do eixo da velocidade de alimentação são diferentes, pois além da constante β do processo pulsado ser duas vezes maior do que a obtida para no modo tensão constante, há a influência dos parâmetros de pulso como mostram as Equações 2.16 a 2.18.

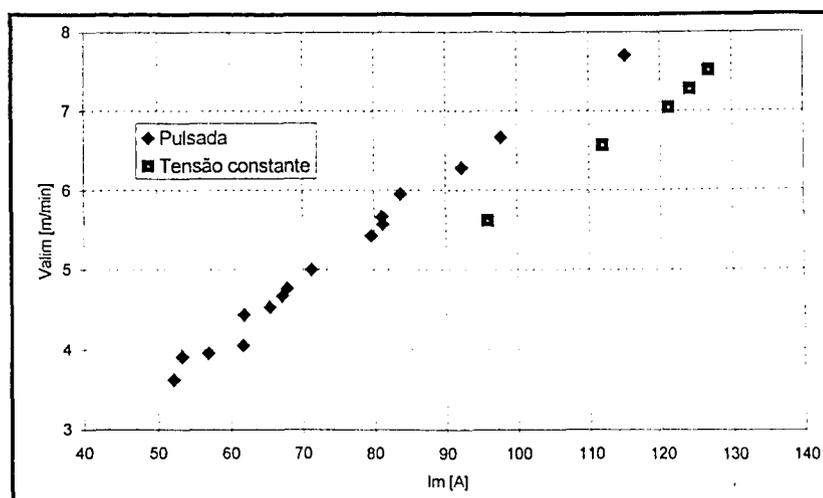


Figura 5.13 - Relação entre a velocidade média e a corrente para os ensaios MAP01 a MAP19 e a comparação com o modo tensão constante (determinação da corrente de transição).

Além da região de UGPP ter sido mapeada somente em uma condição de base, a faixa de corrente média, onde é possível soldar, é pequena ($61,7 < I_m < 81,1$ A) como mostra a Figura 5.14. Caso deseje-se soldar com uma corrente média superior ou inferior, deve-se alterar os parâmetros de base, uma vez que caso se altere os parâmetros de pico, sair-se-á da condição de UGPP. Assim, por estes dois motivos, foi verificada a influência dos parâmetros de base, cujos resultados são mostrados no item seguinte.

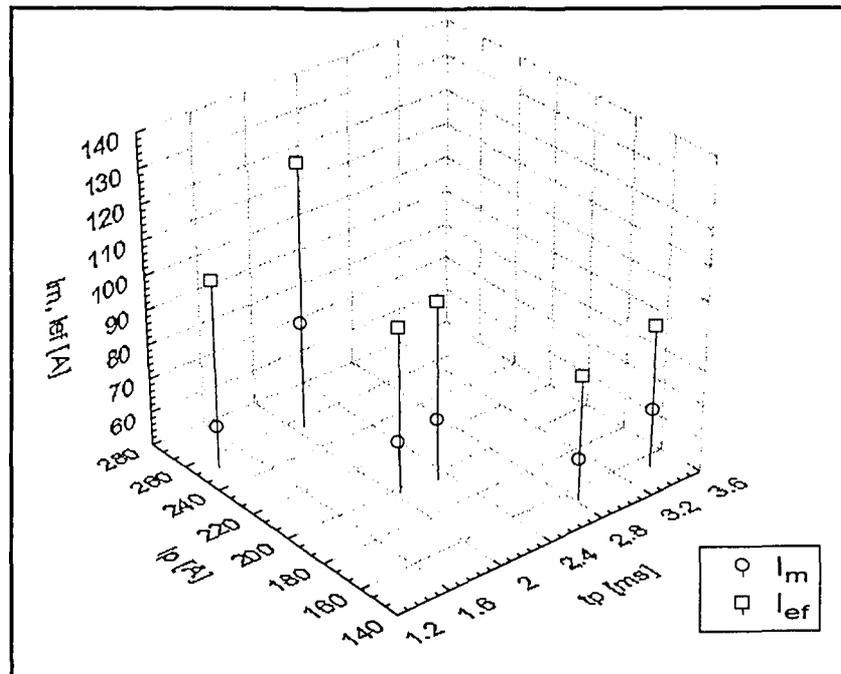


Figura 5.14 - Variação da corrente média e efetiva dentro da região de UGPP.

5.3 Influência de I_b e t_b e avaliação do programa "sinergico"

Para avaliar o programa "sinergico" e analisar a influência dos parâmetros de base, foram selecionadas seis correntes médias diferentes, de tal modo que as duas primeiras (40 e 50 A) ficassem abaixo da faixa de corrente média obtida na região de UGPP, as duas intermediárias (65 e 75 A) estivessem dentro da faixa e as duas últimas (90 e 110 A) estivessem acima. Os dados de entrada do programa foram:

- $\alpha = 11,10026 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$;
- $\beta = 2,96770 \cdot 10^{-5} \text{ A}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- $\ell = 10 \text{ mm}$;
- $I_p = 200 \text{ A}$ e $t_p = 2,25 \text{ ms}$, ou seja, entre os ensaios MAP04 e MAP13;
- $I_{\text{mínimo}} = 20 \text{ A}$;
- $I_m = 40, 50, 65, 75, 90, 110 \text{ A}$;
- $d_e = 1,0 \text{ mm}$.

Os resultados obtidos com o programa "sinergico" estão mostrados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultados obtidos com o programa "sinergico".

I_m [A]	Modelo	I_b [A]	t_b [ms]	d_g [mm]	V_{alim} [m/min]	I_{b_novo} [A]	t_{b_novo} [ms]	d_{g_novo} [mm]	V_{alim_novo} [m/min]
40	Retangular	10.779	12.166	1.0	2.775	20	17.775	1.1123	2.749
	Trapezoidal	10.801	12.175	1.0	2.773	20	17.775	1.1122	2.748
50	Retangular	14.118	9.280	1.0	3.469	20	11.100	1.0485	3.454
	Trapezoidal	14.143	9.287	1.0	3.467	20	11.100	1.0483	3.452
65	Retangular	19.773	6.617	1.0	4.512	20	6.650	1.0012	4.511
	Trapezoidal	19.805	6.621	1.0	4.509	20	6.650	1.0011	4.509
75	Retangular	24.056	5.432	1.0	5.207	—	—	—	—
	Trapezoidal	24.092	5.436	1.0	5.204	—	—	—	—
90	Retangular	31.435	4.149	1.0	6.251	—	—	—	—
	Trapezoidal	31.477	4.152	1.0	6.248	—	—	—	—
110	Retangular	43.601	2.982	1.0	7.646	—	—	—	—
	Trapezoidal	43.647	2.984	1.0	7.643	—	—	—	—

Os valores que foram utilizados nos ensaios são os obtidos para o modelo não linear com onda trapezoidal. Os outros valores estão mostrados a título de comparação, onde nota-se que os valores calculados para cada modelo estão muito próximos, pois o valor da constante β é muito pequena para o alumínio. Como mostrado nas Equações 2.16 a 2.18, esta constante define a maior ou menor importância do modelo. Assim, para este eletrodo, o modelo para a forma de onda da corrente tem pouca importância.

Os valores de I_b , t_b e V_{alim} foram os valores calculados pelo programa para $d_g = 1,0$ mm, sem observar os limites mínimos de I_b . Os valores de I_{b_novo} , t_{b_novo} , V_{alim_novo} e d_{g_novo} foram calculados durante as fases corretivas do programa "sinergico" respeitando os limites mínimos de I_b , pois pela Tabela 5.11, nota-se que quando $I_b < I_{b\text{mínimo}}$ ($I_b < 20$ A), o programa aumentou o diâmetro da gota até conseguir $I_b = 20$ A.

Como a priori não se sabia se seria possível soldar com I_b abaixo de 20 A, foram propostos oito ensaios (BASE01 a BASE08), a partir dos dados da Tabela 5.11, ou seja, propôs-se executar soldagem com I_b abaixo de 20 A, para verificar qual o seu valor mínimo para garantir a estabilidade do arco. Durante a execução destes ensaios, verificou-se que os

ensaios que estavam abaixo da faixa de corrente média obtida para a região de UGPP apresentaram um comprimento de arco maior do que 5 mm, como mostra a Figura 5.14, e os que estavam acima apresentaram um comprimento de arco menor que 5 mm. Assim, foram propostos mais dois ensaios (BASE09 e BASE10) onde o valor da velocidade de alimentação foi ajustado até conseguir um comprimento de arco igual a 5 mm, o que corresponde na prática ao ajuste fino requerido pelos comandos sinérgicos convencionais. O ensaio BASE09 é equivalente ao BASE01, que apresentou-se o mais crítico quando observando-se o maior comprimento de arco. Assim, o ensaio BASE09 apresentou uma maior velocidade de alimentação se comparado ao BASE01. Já o ensaio BASE10 é equivalente ao BASE08, que foi o que apresentou o menor comprimento de arco. Logo, o ensaio BASE10 apresentou uma menor velocidade de alimentação que o BASE08. Com relação ao ajuste da rampa, para todos os ensaios, utilizou-se a rampa em 10, a título de simplificação de ajuste e garantia do bom acendimento do arco.

Tabela 5.12 - Valores ajustados para a verificação da influência da base.

Ensaio	I_b [A]	t_b [ms]	I_m [A]	V_{alim} [m/min]	V_{sold} [cm/min]	$\frac{V_{alim}}{V_{sold}}$
BASE01	10.80	12.18	40.0	2.8	18.5	15.0
BASE02	20.00	17.78	40.0	2.8	18.3	15.0
BASE03	14.14	9.29	50.0	3.5	23.1	15.0
BASE04	20.00	11.10	50.0	3.5	23.0	15.0
BASE05	20.00	6.65	65.0	4.5	30.1	15.0
BASE06	24.09	5.44	75.0	5.2	34.7	15.0
BASE07	31.48	4.15	90.0	6.3	41.7	15.0
BASE08	43.65	2.98	110.0	7.6	50.9	15.0
BASE09	10.80	12.18	40.0	3.0	18.5	16.0
BASE10	43.65	2.98	110.0	7.0	50.9	13.8

Os resultados obtidos pelo programa "contaquadros" estão mostrados na Tabela 5.13 e os resultados obtidos durante a análise das filmagens na Tabela 5.14.

Tabela 5.13 - Resultados do programa "contaquadros".

Ensaio	I_p [A]	t_p [ms]	I_b [A]	t_b [ms]	I_m [A]	I_{ef} [A]	U_p [V]	U_b [V]	U_m [V]	U_{ef} [V]
BASE01	199.0	2.23	10.4	12.24	39.5	76.6	28.05	21.90	22.94	23.12
BASE02	198.1	2.22	19.6	17.67	39.3	67.0	26.08	20.86	21.48	21.57
BASE03	198.1	2.24	14.1	9.31	50.0	86.3	22.78	18.68	19.60	19.72
BASE04	198.0	2.23	19.6	11.03	49.6	81.3	24.94	19.38	20.39	20.52
BASE05	198.0	2.24	19.7	6.64	65.0	99.0	22.58	18.30	19.48	19.59
BASE06	198.1	2.24	23.7	5.47	75.1	107.1	21.39	17.83	18.84	19.02
BASE07	197.8	2.26	30.4	4.21	89.8	118.1	21.90	17.15	18.91	19.44
BASE08	198.0	2.27	42.4	3.09	109.3	131.5	21.48	15.45	17.35	18.31
BASE09	198.2	2.24	10.8	12.22	40.8	77.9	24.87	18.81	19.65	19.78
BASE10	198.1	2.24	42.7	3.05	108.8	131.3	22.93	18.69	20.42	20.53

Tabela 5.14 - Resultados obtidos através de medições do sistema de imagem.

Ensaio	ℓ_a médio [mm]	ℓ_a desvio padrão [mm]	d_g médio [mm]	d_g desvio padrão [mm]	ℓ [mm]	F [Hz]	F_{gotas} [Hz]
BASE01	> 8.0	—	1.1778	0.0422	6.877	69.13	71.13
BASE02	7.318	0.0807	1.2024	0.041927	7.569	50.27	51.41
BASE03	2.678	0.2089	1.0070	0.100314	12.281	86.57	88.89
BASE04	4.905	0.1015	1.1307	0.0528	10.020	75.43	77.48
BASE05	2.679	0.1073	1.0737	0.02551	12.280	112.62	115.49
BASE06	1.087	0.1082	Curto-circ.	—	13.897	129.73	132.93
BASE07	1.178	0.0796	Curto-circ.	—	13.804	154.63	158.90
BASE08	0.750	0.1790	Curto-circ.	—	14.239	186.53	105.50
BASE09	3.634	0.1404	1.0512	0.015883	11.310	69.15	70.84
BASE10	2.586	0.1650	0.9382	0.04256	12.374	188.93	194.23

Pela Tabela 5.14, observa-se que todas as frequências de destacamento ficaram próximas da frequência de pulsação, o que indica que há uma gota por período, com exceção da BASE08. Isto ocorreu pois, como a gota bate na poça e sofre repulsão, torna-se difícil identificar o instante do destacamento. O eletrodo fica enterrado na poça (observar que este foi o menor ℓ_a obtido), e como a fonte está no modo corrente constante, não há um aumento da corrente para soltar a gota durante o curto.

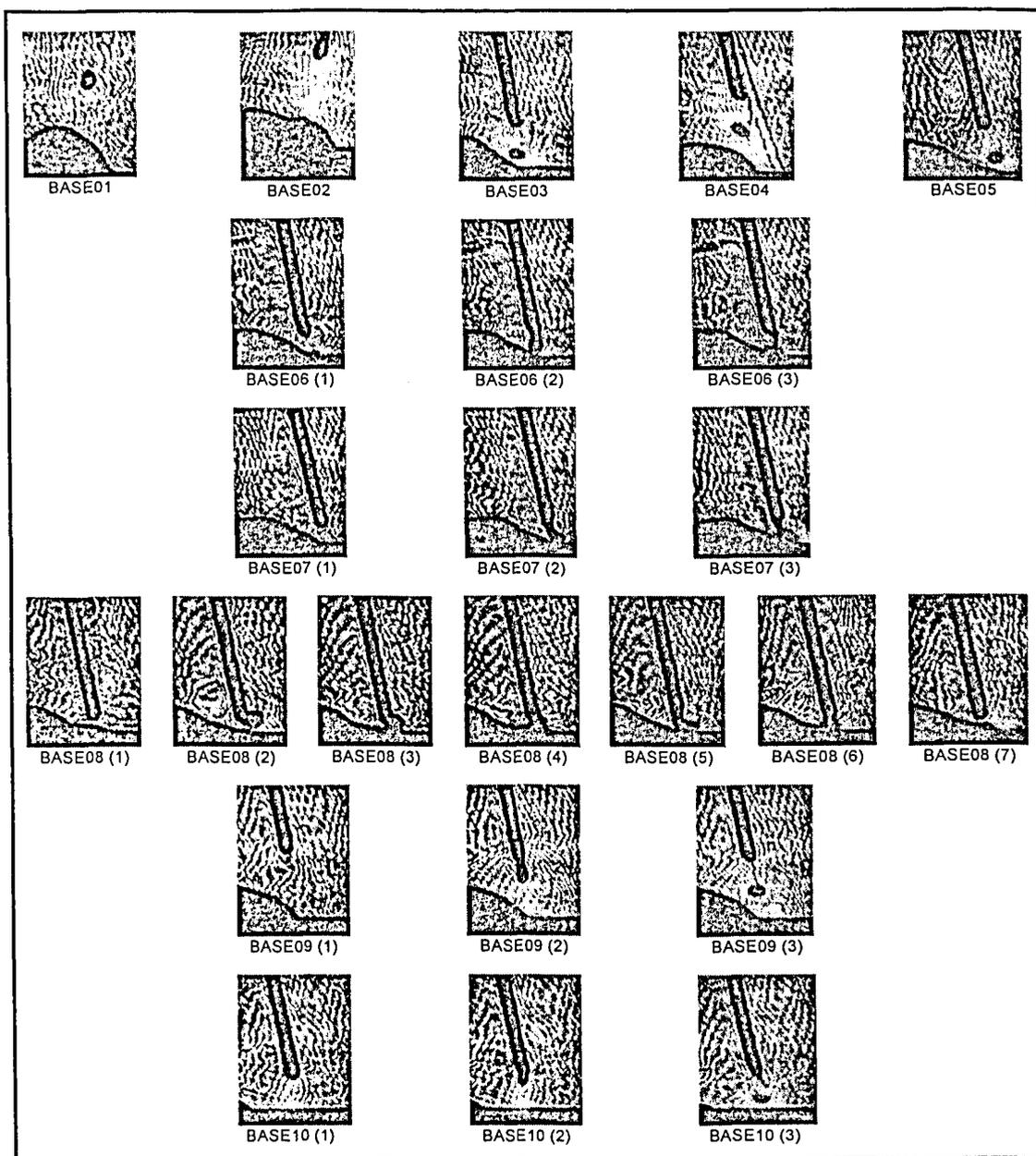


Figura 5.14 - Figuras ilustrando os vários ensaios realizados (BASE01 a BASE10).

Correlacionando-se as imagens obtidas com os respectivos oscilogramas de sinais elétricos (semelhantemente aos das Figuras 5.8 a 5.12), observou-se que uma variação significativa nos parâmetros de base ($10,5 < I_b < 44$ A e $2,98 < t_b < 12,17$ ms), de forma a variar a corrente média, não conduziu a uma alteração na condição de UGPP estabelecida no mapa da Figura 5.5, para a condição $I_p = 198$ A e $t_p = 2,25$ ms, ou seja, os destacamentos continuaram a ocorrer no fim do pico tal qual nos ensaios MAP04 e MAP13. Mesmo nos ensaios onde a velocidade de alimentação predita pelo programa "sinergico" não proporcionou um comprimento de arco em torno de 5 mm, sendo assim necessário corrigi-la, esta correção

não mudou a condição de UGPP. Esta necessidade de correção na velocidade de alimentação, semelhante ao ajuste fino requerido nos comandos sinérgicos convencionais, ocorreu devido ao fato dos parâmetros de base afetarem a taxa de fusão.

Assim sendo, o programa "*sinergico*" não foi aparentemente eficiente no cálculo dos parâmetros de pulso para se conseguir um dado comprimento de arco, em toda a faixa de corrente média utilizada. Porém, de posse dos valores corretos a serem ajustados para a velocidade de alimentação, obtidos durante a correção do comprimento de arco, pode-se calcular novas constantes experimentais e melhorar o cálculo dos parâmetros de base e da velocidade de alimentação. Calculando-se novas constantes α e β , utilizando-se os ensaios BASE02, BASE03, BASE04, BASE05, BASE09, BASE10, pois foram os que proporcionaram um comprimento de arco mais adequado, encontrou-se $\alpha = 12,80214 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ e $\beta = -8,84691 \cdot 10^{-5} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, com um coeficiente de correlação de 99,108%. Estes valores estão muito próximos daqueles obtidos para todos os 19 ensaios realizados para a determinação da região de UGPP ($\alpha = 12,03275 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ e $\beta = -2,95338 \cdot 10^{-5} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Conclui-se, portanto, que estes valores finais obtidos deverão ser utilizados como entrada no programa "*sinergico*", de tal forma a proporcionar um comprimento de arco adequado sobre a faixa de corrente média utilizada (40 a 110 A). Conclui-se também que a constante β que melhor se adapta ao modelo é negativa, mas deve-se fazer ressalva às observações feitas por Scotti (1991) para os valores de coeficientes obtidos por regressão, como já comentado.

Com relação ao diâmetro da gota, pela Tabela 5.14 fica claro que o programa obteve-se diâmetros de gotas muito próximos ao diâmetro do eletrodo, onde os maiores valores de diâmetro de gotas ocorreram quando foram efetuados os cálculos corretivos para se conseguir um $I_{b\text{mínimo}} = 20 \text{ A}$. Logo, os valores calculados pelo programa se encontram muito próximos dos obtidos experimentalmente.

Desta forma, a premissa utilizada para o critério de destacamento, na qual os parâmetros de base não possuem influência no modo de destacamento, é verdadeira para as condições utilizadas. Pode-se, assim, utilizar tanto o comando sinérgico comercialmente utilizado, que não leva em consideração o efeito de I_b e t_b nos seu cálculos, quanto o programa "*sinergico*" proposto. Trabalhos futuros, comparando soldagens efetuadas a partir dos parâmetros calculados com o programa "*sinergico*" proposto e com programas sinérgicos comerciais devem ser realizados a fim de verificar os benefícios oriundos da metodologia de cálculo proposta. De antemão, o programa "*sinergico*" leva vantagem por calcular o diâmetro da gota próximo ao diâmetro do eletrodo, satisfazendo os limites mínimos de I_b e t_b , além de não demandar ajustes finos na velocidade de alimentação para conseguir um comprimento de arco desejado, quando utilizando as novas constantes α e β corrigidas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se subdividir as conclusões obtidas em:

1. Metodologia experimental

- A técnica de Shadowgrafia Sincronizada, aqui apresentada, permite determinar com grande precisão a região de UGPP, determinando os vários modos de transferência metálica em MIG pulsado, minimizando, assim, limitações apresentadas por outras técnicas;
- O programa utilizado para sincronizar os sinais de tensão e corrente e determinar os parâmetros da onda pulsada (programa "*contaquadros*") simplificou bastante a análise dos resultados, tornando-se uma ferramenta muito útil, além de proporcionar o correto sincronismo entre os dois sistemas de aquisição;

2. Avaliação do novo comando sinérgico

- O algoritmo desenvolvido e implementado em Matlab (programa "*sinergico*") calcula adequadamente os parâmetros de pulso e a velocidade de alimentação, de forma a se obter um comprimento de arco desejado, desde que se utilize as constantes α e β corrigidas, propiciando um diâmetro da gota próximo ao diâmetro do eletrodo, satisfazendo os limites mínimos de I_b e t_b ;

3. Influência dos parâmetros de base

- Os parâmetros de base não possuem influência sobre o destacamento em soldagem MIG pulsado para o eletrodo de alumínio ER 4043 (1,0 mm de diâmetro), não alterando a condição de UGPP para um ponto situado no interior desta região. Assim, a premissa utilizada para o critério de destacamento, na qual os parâmetros de base não possuem influência no modo de destacamento, é verdadeira para as condições utilizadas.

CAPÍTULO VII

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a sedimentar os conhecimentos obtidos durante o desenvolvimento desta dissertação e contribuir para o desenvolvimento do processo MIG pulsado, sugere-se como possibilidade para trabalhos futuros:

1. Comparar soldagens efetuadas a partir dos parâmetros calculados com o programa "*sinergico*" proposto e com programas sinérgicos comerciais;
2. Investigar outros materiais e outros diâmetros para expandir a aplicabilidade do critério de destacamento nas estratégias de seleção das variáveis do processo dentro do comando sinérgico;
3. Utilizar o programa "*sinergico*" desenvolvido juntamente com um programa de controle adaptativo, testando as estratégias de controle propostas por Norrish (1992);
4. Estudar fenômenos de transferência metálica, como velocidade e aceleração da gota durante a sua queda e correlacionar com a estabilidade do processo;
5. Verificar qual forma de destacamento é melhor, sob vários critérios (metalúrgicos, aspectos do cordão, estabilidade do arco, ...);

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allum, C.J., 1985, "Recent Developments in Pulsed Gas Metal Arc Welding", Welding for Challenging Environments, October, pp 1-10.

Alcan, 1993, "Manual de Soldagem", 1ª edição, São Paulo, 133p.

Arima, A.A. et al, 1995, "Aplicação do Processo GMAW no Modo Pulsado na Soldagem de Aços Inoxidáveis Austeníticos", XXI ENTS, Caxias do Sul, RS, pp 613-625.

AWS, 1996, "Welding Handbook", Vol 2, 8ª ed.

AWS, 1991, "Welding Handbook", Vol 4, 8ª ed.

Baixo, C.E.I. e Dutra, J.C., 1989, "O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG através de Projeter e de Tratamento de Oscilogramas", XV ENTS, São Paulo, SP, Novembro, pp 193-209.

Bálsamo, P.S.S., Vilarinho, L. O. e Scotti, A., 1999, "Proposta de Uma Nova Concepção Sinérgica para Soldagem MIG pulsado de Aço Inoxidável", VI Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, Maio, São Paulo.

Biloni, H. et al, 1981, "Manual de Soldadura do Alumínio", Buenos Aires.

Carreira Neto, M.C. e Brandi, S.D., 1998, "Modelamento da Freqüência de Destacamento de Gotas na Soldagem de Ligas de Alumínio com o Processo SAMGp", Revista Soldagem & Inspeção – Suplemento Técnico, ano4, nº3, pp 5-12 .

Castner, H.R., 1995, "Gas Metal Arc Welding Fume Generation Using Pulsed Current", Welding Journal, February, pp 59s-68s.

Collard, J.F., 1988, "Adaptive Pulsed GMAW Control: the Digipulse System", Welding Journal, November, pp. 35-38.

Dickerson, P.B. and Irving, B., 1992, "Welding Aluminum: It's Not As Difficult As It Sounds", *Welding Journal*, April, pp. 45-50.

Dutra, J.C. et al, 1995, "O Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica", XXI ENTS, Caxias do Sul, RS, pp 889-902.

Dutra, J.C. et al, 1993, "Comparação entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto-circuito em Soldagem Automatizada", XIX ENTS, Águas de São Pedro, SP, pp 265-272.

Dutra, J.C. et al, 1992, "Uma Contribuição ao Estudo da Seleção de Variáveis na Soldagem MIG Pulsada", XVIII ENTS, Vol 2, Rio de Janeiro, pp 925-942.

Dutra, J.C., 1989, "Procedimento Computadorizado do estudo de Transferência Metálica para a Determinação das Variáveis de Soldagem com Corrente Pulsada", XV ENTS, São Paulo, pp 637-652.

Elliot, S., 1985, "Using Synergic MIG Successfully", *Metal Construction*, March, pp 148-151.

Ferreira da Silva, J.H. e Alfaro, S.C.A., 1997, "Aplicação de Redes Neurais na Otimização de Parâmetros em Soldagem MIG/MAG Sinérgico Pulsado", XXIII ENTS, São Paulo, pp 177-182.

Fujimura, H., Ide, E. and Inoue, H., 1987, "Estimation of Contact Tip-workpiece Distance in Gas Shielded Metal Arc Welding", *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, pp 522-528.

Ghosh., P.K., 1995, "An Analysis of Weld Characteristics as a Function of Pulse Current MIG Welding Characteristics", *Proceedings of the International Conference on the Joining of Materials*, JOM-7, pp 352-359

Ghosh, P.K. et al, 1991, "Influence of Pulse Parameters on Bead Geometry and HAZ During Bead on Plate Deposition by MIG Welding Process", *Zeitschrift Fur Metallkunde*, V82, N°10, Outubro.

Gonzalez, A.R. e Machado, I. G., 1997, "Efeitos da Energia Média de Soldagem sobre as Eficiências de Fusão no Processo MIG/MAG Pulsado", XXIII ENTS, São Paulo, pp 99-108.

Grubic, K. e Andric, S., 1995, "Factors at Pulsed MIG Welding, Their Relationships and Effects", Proceedings of the International Conference on the Joining of Materials, JOM-7, pp 360-367.

Hatch, J.E., 1984, "Aluminum-Properties and Physical Metallurgy", ASM, Metals Park/Ohio.

Heald, P. R., Madigan, R. B., Siewert, T. A. and Liu, S., 1994, "Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER100S-1 GMAW Electrode", Welding Journal, Vol. 73, nº. 2, pp 38s-44s.

Irving, B., 1994, "Welding the Four Most Popular Aluminum Alloys", Welding Journal, February, pp 51-55

Johnson, J.A. et al, 1991, "Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode", Welding Journal, April, pp 91s-99s.

Jönsson, P.G. et al, 1995, "Heat and Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding Using Argon and Helium", Metallurgical and Materials Transactions, Volume 26B, Abril, pp 383-395.

Kim, Y.S. and Eagar, T.W., 1993a, "Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", Welding Research Supplement, June, pp 269s-278s.

Kim, Y.S. and Eagar, T.W., 1993b, "Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, July, pp 279s-287s.

Kumar, R.S. and Parmar, R.S., 1986, "Weld Bead Geometry Prediction fo Pulse MIG Welding", Advances in Welding Science and Technology, TWR, Tennessee, May.

Lesnewich, A., 1958, "Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding: Part I – Control of Electrode Melting Rate", Welding Journal, August, pp 343s-353s.

Liu, S., 1997, "Curso Soldagem de Ligas de Alumínio", ABAL, Outubro.

Liu, S. and Siewert, T.A., 1989, "Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate", Welding Journal, February, pp. 52s-58s.

- Lucas, W. and Hall, A., 1981, "The Application of the Synergic Pulsed Process and the Influence of the Weave Pattern in Mechanized MIG-welding ", Dus Berichte, nº. 68, Proceedings of International Conference on Vertical Welding, April, Dusseldorf, West Germany, pp 19-26.
- Matsuda, F. et al, 1985, "Combined Effect of Current Pulsation and Zr Addition on Improvement of Solidification Cracking of Al-Zn-Mg Alloy Weld Metal", Transactions of JWRI, Osaka University.
- Merzkirch, W., 1987, "Flow visualization", 2nd Edition, Academic Press, pp 126-134.
- Modenesi, P.J., 1996, "Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais", Apostila UFMG, BH.
- Nixon, J.H. and Norrish, J., 1988, "Determination of Pulsed MIG Process Parameters", Welding and Metal Fabrication, pp 4-7.
- Norrish, J., 1988, "An Introduction to Synergic MIG", Welding and Metal Fabrication, pp 2-4.
- Norrish, J., 1992, "Advanced Welding Process", Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia and New York, pp 131-173.
- Norrish, J. and Ooi, C.L., 1993, "Adaptive Asymmetric Waveform Control in bipolar Gas Tungsten Arc Welding of Aluminum", Welding & Metal Fabrication, June, pp 230-232.
- Norrish, J. and Richardson, I. F., 1988, "Metal Transfer Mechanisms", Welding and Metal Fabrication, Jan/Feb, pp 17-22.
- Okumura, T. e Taniguchi, C., 1982, "Engenharia de Soldagem e Aplicações, LTC.
- Ostermann, F. et al, 1993, "Aluminium Materials Technology for Automobile Construction", London.
- Pandey, S. et al, 1995, "Metal Transfer and V-I Transients in GMAW of Aluminium", Proceedings of the 4th International Conference, Gatlinburg, Tennessee, 5-8 June, pp 385-397.

- Paula, O.S. e Dutra, J.C., 1996, "Uma Contribuição para a Comparação entre os Processos MIG/MAG Convencional e Pulsado", XXII ENTS, Blumenau, SC, pp 239-250.
- Pereira, W.A., 1995, "Comparação de Características Operacionais entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto-circuito", Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 140p.
- Pickering, E.R., 1997, "Welding aluminum", *Advanced Materials & Processes*, August.
- Piffer, W.D. e Martins, J.T., 1996, "Avaliação de Equipamentos de Última Geração para Soldagem MIG/MAG", XXII ENTS, Blumenau, SC, pp 263-274.
- Pixley, M., 1999, "The Microprocessor Revolution - Synergic Pulsed MIG/MAG Welding", *Welding & Metal Fabrication*, March, pp 17-18.
- Rajasekaran, S. et al, 1998, "Droplet Detachment and Plate Fusion Characteristics in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*, June, pp 254s-269s.
- Richardson, I.M. et al, 1994, "The Influence of Power Source Dynamics on Wire Melting Rate in Pulsed GMA Welding", *Welding Journal*, February, pp 32s-37s.
- Sadler, H., 1999, "A Look at the Fundamentals of Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*, May.
- Santos, J.O., 1986, "Controlled Transfer MIG Welding of Stainless Steel", PhD Thesis, Cranfield Institute Technology, UK, 169 p.
- Saunders, H. L., 1989, "Welding Aluminum: Theory and Practice", 1st ed, Aluminum Association.
- Scotti, A., 1991, "Process Modelling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW", PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology.
- Scotti, A. et al, 1998, "Mapeamento da Transferência Metálica em MIG com Aço Inoxidável", XXIV ENTS, Fortaleza, CE, Setembro, 10p.

- Scotti, A., 1998, "Report of Américo Scotti's Activities at Idaho National Engineering and Environmental Laboratory", Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU, 161p.
- Smati, Z., 1986, "Automatic Pulsed MIG Welding", Metal Construction, N.º 1, pp 38R-44R.
- Stenbacka, N. and Persson, K. A., 1989, "Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding", Welding Journal, November, pp 41-47.
- Subramaniam, S., 1996, "Process Modeling and Analysis for Pulsed Gas Metal Arc Welding of an Aluminum Automotive Spaceframe", Tese de Doutorado, West Virginia University, 227p.
- Subramaniam, S. et al, 1998, "Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum", Welding Journal, November, pp 458s-464s.
- Tuttle, W.H., 1988, "Electric Arc Welding Aluminum", Welding Journal, April.
- Vilarinho, L.O., Scotti, A. & Bálamo, P.S.S., 1996, "Controle Sinérgico no Processo MIG Pulsado", IV Creem, Florianópolis.
- Vilarinho, L.O. e Scotti, A., 1999, "Visualização de transferência explosiva do eletrodo ER5356 no processo MIG", Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU, 2p.
- Vishnu, R., 1995, "Modelling Microstructural Changes in Pulsed Weldments", Welding in the World, Vol.35, Nº4, pp 214-222.
- Wang, Q.L. and Li, P.J., 1997, "Arc Light Sensing of Droplet Transfer and its Analysis in Pulsed GMAW Process", Welding Journal, November, pp 458s-469s.
- Warsz, K., 1995, "Pulsed Arc Welding: Practical Specifications", Welding International, 9 (10), 1995: pp. 761-766.
- Waszink, J.H. and Piena, M.J., 1986, "Experimental Investigation of Drop Detachment and Drop Velocity in GMAW", Welding Journal, November, pp 289s-298s.
- Zhang, Y.M., Liguó and Kovacevic, R., 1998, "Active Metal Transfer Control by Monitoring Excited Droplet Oscillation", Welding Journal, September, pp 388s-395s.