

2.1 Introdução

Neste capítulo é feito um levantamento do atual estado da arte no que se refere ao processo de soldagem *MIG/MAG*. O capítulo abrangerá tópicos como o histórico do processo, suas vantagens e limitações, os principais equipamentos e variáveis, os possíveis modos de transferência metálica e, finalmente, a relação do processo frente ao atual avanço tecnológico da eletrônica e da informática.

Além disso, o objetivo principal deste capítulo recairá no estudo do modo de transferência metálica comandada, enfatizando-se as características da nova variante do processo *MIG/MAG* denominada de *pulsação térmica*.

2.2 O processo *MIG/MAG*

O processo de soldagem *MIG/MAG* (Metal Inerte Gas/Metal Active Gas) ou *GMAW* (Gas Metal Arc Welding), figura 2.1, ou ainda “Soldagem a Arco Metálico com Atmosfera Gasosa (*SAMG*)”, é caracterizado pela abertura e manutenção do arco elétrico entre o metal de base (poça de fusão quando em regime) e o metal de adição (arame alimentado continuamente). Como o arame/eletrodo não apresenta revestimento (comum no processo Eletrodo Revestido) torna-se necessário à inserção de uma proteção gasosa suprida com pressão e vazão adequadas. Tal inserção é justificada na necessidade de, ao mesmo tempo, viabilizar a proteção da gota metálica e da poça de fusão contra a atmosfera vizinha ao arco voltaico e, além disso, auxiliar na formação e manutenção do arco elétrico.

Outra característica do processo *MIG/MAG* é a sua aplicação em corrente contínua com eletrodo ligado ao pólo positivo (CC+, CCEP), onde o arco torna-se mais estável (Alcan, 1993; Machado, 1996; Altshuller, 1998). Por outro lado, utilização de corrente contínua com o eletrodo negativo (CC-, CCEN), no processo, não apresenta aplicação prática e, para o caso da corrente alternada (CA), o desenvolvimento de sua aplicação está sendo beneficiado pelo avanço conjunto da eletrônica e da informática. Em CC+ tem-se ainda a vantagem da limpeza do filme

de óxido, crítico na soldagem do alumínio e magnésio, permitindo uma adequada coalescência e um perfil do cordão mais uniforme (Alcan, 1993).

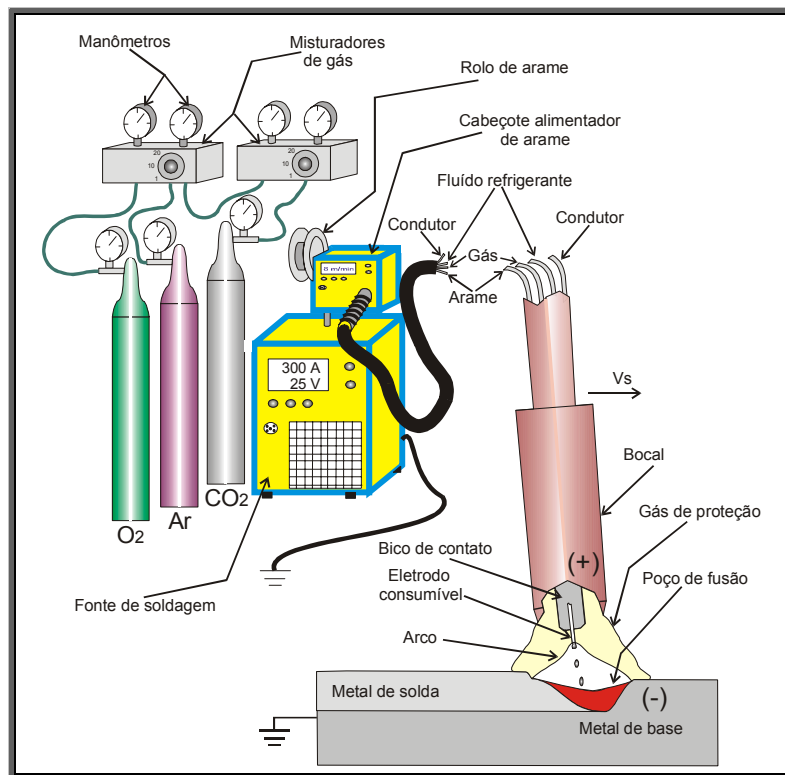


Figura 2.1 – Descrição genérica do processo MIG/MAG (Barra, 1998).

Em termos de geração de calor, pelo fato da utilização de **CC+**, o processo apresenta a maior parte do calor gerado no eletrodo (ânodo) e sendo esta energia transferida para a poça de fusão através das gotas metálicas superaquecidas. Este mecanismo de geração e transferência de calor provoca um elevado rendimento térmico e uma estreita zona termicamente afetada (Altshuller, 1998).

O processo MIG/MAG, em relação ao nível de atividade do gás de proteção, pode ser subdividido em:

- Metal Inert Gas (MIG) → Onde o gás (Ar ou He) ou a mistura gasosa empregada (rica em Ar e complementada por adições controladas de He, O₂ ou CO₂) não reage metalurgicamente com a gota metálica ou com a poça de fusão, atuando apenas na proteção destas regiões, auxiliando na formação e manutenção e do arco voltaico e melhorando a molhabilidade nas ligas ferrosas;

- Metal Active Gas (MAG) → Onde o gás (CO_2) ou mistura ($\text{Ar}+\text{CO}_2$ ou $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$), além das funções acima citadas, reage metalurgicamente com a gota e com a poça de fusão.

No caso da aplicação do processo *MIG/MAG* na soldagem de metais reativos (alumínio e titânio, por exemplo), pela reduzida atividade da proteção gasosa, o processo é especificado como *MIG* (Altshuller, 1998).

Com relação à evolução do processo pode-se chegar a seguinte cronologia (Amim, 1983; Dutra, 1989/1995; Street, 1990; Manz, 1990; AWS, 1991; Silva, 1995; Machado, 1996; Sullivan, 1998):

- 1926 → Primeira aplicação de gás inerte na formação e proteção do arco elétrico;
- 1928 → Descrição dos fundamentos do processo em artigo publicado no “Journal of American Welding Society”;
- 1948/1950 → Desenvolvimento do *GMAW* e solicitação de patente. Até então com aplicação voltada para a soldagem do alumínio;
- 1951/1953 → Emprego do *GMAW* na soldagem de aço, inicialmente adicionando O_2 e, em seguida, substituindo-se o Ar por CO_2 ;
- 1960/1962 → Desenvolvimento da transferência tipo goticular “spray”, seguida do advento da corrente pulsada (avanço da eletrônica);
- Dos anos 60 até a presente data, é nítido que a evolução do processo *GMAW*, bem como seu nível de aplicação, tenha como âncora o crescente desenvolvimento tecnológico da eletrônica e da informática. Um exemplo real dessa evolução está na aplicação de células de soldagem (Interfaceamento de fontes eletrônicas transistorizadas com a robótica), ou ainda pela junção das vantagens do processo *TIG pulsado* (Thermal pulsing) com o *MIG pulsado*, originando uma nova variante denominada de “*MIG/MAG Térmico* ou *Pulsção térmica*”.

2.2.1 Aplicações, vantagens e limitações do processo MIG/MAG

O processo *MIG/MAG*, em função da possibilidade do destacamento da gota metálica em diferentes níveis de correntes e modos de transferência (curto-circuito, globular, goticular ou pulsado), viabiliza sua aplicação numa faixa ampla de espessura, além de proporcionar condições para a soldagem em todas as

posições. A versatilidade do processo *MIG/MAG*, alavancado pelo crescimento industrial, vem elevando sua participação no mercado de soldagem, desbancando e contribuindo no declínio da soldagem com eletrodo revestido. Na realidade, é observada a possibilidade de se medir o nível de industrialização de um país, ou de uma determinada região, pelo grau de aplicação de processos convenientes à automação, por exemplo:

- ❑ Grã-Bretanha → Em 1988 a participação do *MIG/MAG* representava 56% do total de metal de solda depositado (Scotti, 1991).

Como vantagem do processo *MIG/MAG* pode-se enumerar as seguintes características (Quites, 1979; Street, 1990; AWS, 1991; Sadler, 1999; Norrish, 1992; Wainer, 1992; Alcan, 1993; Machado, 1996):

- ❑ Versatilidade de soldagem em todas as posições e possibilidade de adaptação à automação;
- ❑ Alta taxa de deposição devido a elevada densidade de corrente possível de ser aplicada (300 A/mm^2), o que corresponde até 10 vezes a densidade empregada no eletrodo revestido;
- ❑ Ampla faixa de aplicação em diferentes ligas e espessuras;
- ❑ Possibilidade de elevadas velocidades de soldagem bem maiores que outros processos como o eletrodo revestido (ER), que torna o processo *MIG/MAG* o mais atrativo industrialmente;
- ❑ Alimentação contínua do eletrodo nu, não formação de escória (menor tempo de limpeza) e reduzido nível de hidrogênio aportado (na ordem de 5 ml/100 g de metal).

Como limitações do processo pode-se enumerar (idem referência anterior):

- ❑ Alta velocidade de resfriamento (ausência de escória) propiciando a tendência ao surgimento de trincas;
- ❑ Investimento inicial em equipamento mais alto, quando comparado ao processo com eletrodo revestido (ER);
- ❑ Problemas de operação em locais de difícil acesso (penetração do bocal) e em ambientes com forte ventilação (deslocamento e contaminação da coluna gasosa);

- ❑ Difícil relação entre *flexibilidade x requisitos metalúrgicos* do arame maciço;
- ❑ Grande emissão de raios ultravioleta e produção de ozônio (em função da baixa produção de fumos – os fumos servem de barreira a emissão dos raios para a vizinhança do arco).

2.2.2 Equipamentos e consumíveis

Como esquematizado na figura 2.1, em termos de equipamento e consumíveis, a seguinte configuração básica é empregada no processo *MIG/MAG* (Barra, 1998):

- ❑ Fonte de soldagem em corrente contínua (**CC**) ou em corrente alternada (**CA**);
- ❑ Sistema de alimentação do arame em conjunto com um tipo específico de tocha de soldagem;
- ❑ Sistema de arrefecimento da tocha, quando necessário;
- ❑ Suprimento externo de gás ou misturas, devidamente acompanhado de reguladores de pressão e vazão (fluxímetro);
- ❑ Rolo de arame;
- ❑ Sistema de movimentação da tocha na soldagem automatizada.

a) Fontes

O avanço da eletrônica (iniciado nos anos 60), representado através do desenvolvimento de componentes eletrônicos do estado sólido (como os diodos que viabilizam o controle, os tiristores **SCR**, os transistores **IGBT** e os sistemas de memórias – EPROM, EEPROM e FLASH ROM, entre outros), em conjunto com o avanço da informática (iniciada nos anos 80), representado aqui pela disponibilidade de computadores (**hardware**) e programas (**software**) com velocidade de processamento cada vez maior, possibilitaram o desenvolvimento de fontes de soldagem eletrônicas com controle sobre a dinâmica de resposta (flutuação da corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame em função do tempo). Tal controle viabiliza o melhoramento, o desenvolvimento e a inserção de novas variantes na soldagem *MIG/MAG*, como (Dutra, 1995; Machado, 1996; Altshuller, 1998; Ting, 2000):

- ❑ Imposição de corrente pulsada com forma de onda próxima do formato retangular (idealizada como quadrada);
- ❑ Controle no processo de abertura do arco (avanço do arame ou nível de corrente), crítico na soldagem do alumínio e suas ligas;
- ❑ Controle da potência liberada no momento do curto-circuito, isto é, redução do nível de salpicos através do controle do efeito indutivo (simulação da indutância) ou do controle do patamar da corrente de curto-circuito (I_{cc});
- ❑ Pulsação de energia através do controle da frequência de pulsação (denominado de *MIG/MAG Térmico* ou *pulsação térmica*), como proposição para a obtenção de melhoramentos metalúrgicos e controle sobre o processo de deposição;
- ❑ Soldagem MIG/MAG em **CA**.

No processo MIG/MAG existe a possibilidade do emprego de fontes retificadoras (convencionais) ou de fontes eletrônicas, ambas podendo apresentar duas características estáticas (tensão x corrente) ou curva *corrente-tensão*. A característica do arco determinará qual o tipo de fonte a ser utilizada, ou seja, característica estática do tipo *tensão constante* (ou *plana*) ou do tipo *corrente constante* (ou *tombante*), conforme esquematizado na figura 2.2.

A *tensão em vazio* (V_0 ou U_0), também chamada de *tensão de circuito aberto*, está situada na ordem de 70 V (com valor máximo normalizado de 100 V). Em regime, este valor decresce para o patamar da tensão de soldagem (U_s), também chamado tensão do arco – 15 a 40 V.

A escolha pela aplicação de fontes do tipo *tensão constante*, figura 2.2(a), recai no chamado *controle interno*, onde qualquer variação na distância entre o bico de contato e a peça (**DCP**) provocará uma mudança no comprimento do arco em relação a condição de equilíbrio (ℓ_0), além de uma alteração na taxa de fusão (alteração brusca na corrente de soldagem (I_s) tendendo a manter o comprimento do arco constante e em ℓ_0 e, conseqüentemente, alterando a projeção do arame), sem alteração na velocidade de alimentação do arame.

As vantagens de se utilizar fontes convencionais deste tipo são:

- ❑ Prevenção de fusão do bico de contato;
- ❑ Manutenção de ℓ_0 ;

- Facilidade na abertura do arco (para as fontes eletrônicas operando em **CC**, o processo de abertura do arco – monitoração e variação nos valores de I_s e v_a , por exemplo – é realizado eletronicamente. Portanto, a abertura do arco não se constitui um problema para estas fontes).

Como desvantagens deste tipo de característica estática pode-se destacar a variação no aporte térmico, gerando perfis diferenciados na penetração e na zona termicamente afetada (**ZTA**).

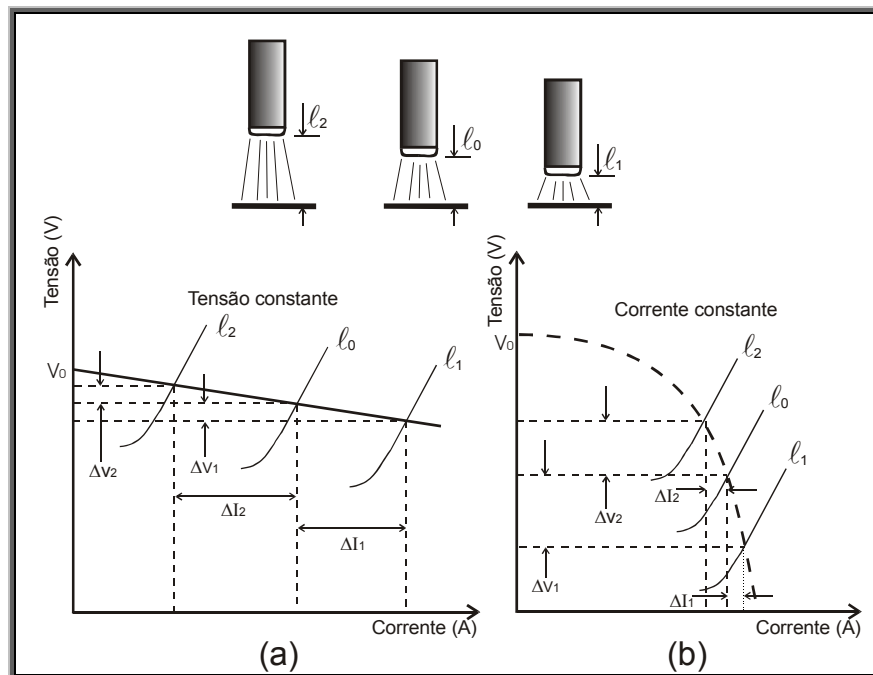


Figura 2.2 – Característica estática da fonte x curva do arco. Adaptado de Barra (1998). Onde: (a) *tensão constante* e (b) *corrente constante*.

Quando se opta pela utilização de fontes convencionais com característica estática do tipo *corrente constante* ou *tombante*, figura 2.2(b), o controle atuante na manutenção de l_0 será o chamado *controle externo*. Neste modo de controle, qualquer variação no valor de l_0 será detectado através da mudança de U_s , que servirá como referência à execução de um ajuste automático da velocidade de alimentação do arame, melhor dizendo, a corrente de soldagem permanece aproximadamente constante e o ajuste no valor de l_0 se dará pela flutuação da velocidade de alimentação do arame (v_a).

As vantagens de se utilizar fontes deste tipo são:

- Uniformidade no aporte térmico, possibilitando homogeneidade no perfil de penetração e na **ZTA**.

Como desvantagens deste tipo de característica estática pode-se destacar a variação no valor de ℓ_0 , a dificuldade no processo de abertura do arco, a necessidade da utilização de sensores de tensão (rastreamento de ℓ_0) e a utilização de um alimentador de arame com melhor velocidade de resposta (dinâmica).

A dificuldade na abertura do arco deriva da não elevação da corrente de soldagem (I_s), para valores na ordem da corrente de curto-circuito (I_{cc}), no momento em que o arame toca o metal de base. Como forma de facilitar a abertura do arco emprega-se um alimentador que possibilite patamares variados de velocidade de alimentação (**slow-run-in**), em outras palavras, um avanço lento do arame durante a formação do arco elétrico e, quando em regime, manutenção da velocidade de alimentação do arame no valor de operação (Alcan, 1993). É importante ressaltar que para as fontes eletrônicas o processo de abertura do arco também pode ser realizado pelo controle da corrente de curto-circuito.

b) Sistema de alimentação de arame / tocha

Basicamente, existem duas configurações quanto a localização do alimentador de arame, ou seja, alimentadores acoplados na fonte ou alimentadores separados da fonte (unidade independente).

Como funções básicas do par alimentador/tocha podem-se enumerar:

- Controle da velocidade de avanço do arame, objetivando uniformidade no valor de ℓ_0 (igualdade entre a taxa de fusão " T_{xf} " e a taxa de alimentação do arame " T_{xa} ");
- Transferência da corrente de soldagem para o arame o mais próximo possível do arco (bico de contato);
- Distribuir o gás de proteção de forma uniforme na região do arco elétrico;
- Permitir controle local das variáveis envolvidas (velocidade de alimentação, vazão de gás e a abertura e o fechamento do circuito elétrico de soldagem).

Quanto ao modo de alimentação do arame, tem-se a seguinte classificação (Ryan, 1988; Altshuller, 1998):

- Combinação alimentador/tocha do tipo *empurra* (**push**), onde o arame é empurrado do alimentador em direção à tocha de soldagem. Este sistema apresenta problema quando da utilização de tocha longa e arame muito dúteis, que pode enrolar (embolar) após a passagem pelos rolos de tração;
- Combinação alimentador/tocha do tipo *puxa* (**pull**) onde o arame é puxado pelo alimentador situado na tocha, praticamente empurrando o arame somente no bico de contato. Este sistema apresenta o inconveniente de ser afetado pelo atrito entre o arame e o conduíte;
- Combinação alimentador/tocha do tipo *empurra-puxa* ou (**push-pull**), onde se uni-las características dos dois sistemas anteriores. Este sistema permite a soldagem de materiais dúcteis em conjunto com uma tocha de soldagem de grande comprimento (maior flexibilidade de operação para o soldador).

c) Gás de proteção

O gás ou mistura gasosa de proteção se caracteriza como uma variável crítica na operação de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa, afetando as características de ionização e formação do arco elétrico, além de proteger o metal fundido de reações de oxidação, da absorção de H_2 e da formação de nitretos. O tipo de mistura empregada irá, ainda, influenciar diretamente no modo de transferência metálica (flutuação da corrente de transição I_t), na penetração da solda (calor e forças gerados no arco), na geometria e no aspecto superficial do cordão, nas características metalúrgicas do metal aportado, na velocidade de soldagem (v_s), na tendência à formação de mordeduras e na ação de limpeza.

No processo *MIG/MAG* a utilização de diferentes gases ou misturas irá caracterizar o nível de atividade, reações metalúrgicas com a gota e com a poça de fusão, a ser imposto na região do arco.

O valor de I_t , mantendo-se constantes as demais variáveis envolvidas, é diretamente afetado pelo volume de CO_2 empregado na mistura gasosa (com Ar, por exemplo). De maneira geral, um aumento na participação de CO_2 na mistura, irá elevar o valor de I_t , podendo atingir um patamar deste parâmetro fora da faixa de utilização prática.

Na prática é verificado que misturas de Ar com 5 a 10% de CO_2 são aplicáveis na soldagem em corrente pulsada, tanto do aço carbono como do aço

inoxidável. Contudo, teores de CO_2 acima deste patamar poderão provocar instabilidade no processo de pulsação, queima de elementos de liga ou carbonetação da poça de fusão e a possibilidade de decréscimo na resistência à corrosão de ligas inoxidáveis, sendo este decréscimo na resistência à corrosão conhecida como sensitização (Machado, 1996; Modenesi, 1995; Barra, 1998; Folkhard, 1988).

Com base no que foi colocado nos dois últimos parágrafos, é notada uma certa incoerência no que se refere à exata definição (ou fronteira) entre o que seria o processo *MIG* ou o *MAG*, levando em consideração o grau de atividade do gás de proteção. Por um lado, existe uma linha de pensamento que foca sua atenção no efeito da mistura sobre a estabilidade do arco, o aspecto superficial final do depósito e o custo de operação e, por outro lado, existe uma vertente de pensamento onde a preocupação recai no efeito metalúrgico da mistura sobre o metal aportado. Assim, o mais coerente seria utilizar o nível de atividade, a partir do qual a mistura gasosa começa a interferir na estrutura da liga selecionada, para definir se o processo será *MIG* ou *MAG*.

O principal motivo da adição de gás ativo (O_2 , CO_2 ou ambos) em ligas ferrosas está atrelado ao fato deste promover um grande número de pontos catódicos sobre a poça de fusão, um aumento na fluidez da poça, uma variação na tensão superficial e intensificar o processo de ionização (Lyttle et al, 1990; AWS, 1991 e Machado, 1996).

Segundo Lyttle et al (1990), a adição de O_2 até valores de 5% ao Ar melhora a estabilidade do arco, reduz a altura do reforço e aumenta a faixa de operação no modo goticular (*spray*), mas valores excessivos de O_2 poderão aumentar a perda de elemento de liga e gerar alguma deterioração nas propriedades mecânicas do depósito. A AWS (1991) recomenda para o aço inoxidável a adição de 1 a 2% de O_2 ao Ar ou a utilização de uma mistura tripla contendo Ar, He e CO_2 (AWS, 1991). A escolha da mistura a ser utilizada, bem como o percentual de participação em volume de cada componente, dependerá de uma avaliação prévia da relação *custo x benefício* propiciada por cada condição.

A vazão de gás a ser empregada em uma determinada operação de soldagem dependerá, inicialmente, da faixa de corrente a ser implementada. Valores elevados de vazão podem significar aumento no custo final da obra em face da perda do gás em excesso, da perda de calor do arco e da possibilidade de

contaminação da atmosfera do arco em face da elevação no efeito convectivo. Em contrapartida, para reduzidas vazões poderá ocorrer o surgimento de porosidades, a redução nas propriedades mecânica e arco elétrico criptante.

d) Arame

Na soldagem MIG/MAG, a seleção correta do metal de adição a ser empregado na confecção do depósito também se caracteriza como um dos fatores cruciais na qualidade final do metal aportado. A integridade do depósito e o custo final dependem do metal de adição selecionado. Para tal, deve-se levar em consideração fatores como:

- ❑ Metal de base a ser soldado (requisitos de composição química);
- ❑ Proteção gasosa a ser aplicada;
- ❑ Taxa de deposição pretendida (função direta com a densidade de corrente – A/mm^2);
- ❑ Dinâmica do equipamento e faixa de corrente;
- ❑ Geometria e nível de penetração;
- ❑ Espessura do metal de base;
- ❑ Facilidade de transferência elétrica e resistência ao efeito da atmosfera ambiente.

2.2.3 Parâmetros de soldagem e tópicos afins

A correta utilização do processo *MIG/MAG* dependerá do perfeito entendimento de como as diversas variáveis envolvidas na operação de soldagem podem influenciar na estabilidade do arco e na qualidade final do depósito. Neste ponto do capítulo é feita uma breve explanação dos principais parâmetros de soldagem e tópicos afins presentes na soldagem *MIG/MAG*, deixando-se uma análise mais profunda para um tópico mais à frente, quando da abordagem do processo de soldagem em corrente pulsada.

As principais influências dos parâmetros envolvidos na soldagem *MIG/MAG* serão colocadas de maneira simples, conforme abaixo relacionadas (Quites, 1979; Okumura, 1982; Ryan, 1988; AWS, 1992; Wainer, 1992; Costa, 1995; Machado, 1996; Dennis, 1997; Altshuller, 1998; Aichele, 2002).

a) Tensão de soldagem (U_s)

- A tensão de soldagem influencia no insumo de calor e apresenta uma relação direta com o comprimento do arco e a largura do arco;
- Qualitativamente, para uma mesma corrente, uma tensão baixa provocará cordões mais estreitos e maior penetração, o oposto acontecendo para tensões mais altas, além da ocorrência de salpicos grosseiros;
- De uma maneira geral, tensões baixas favorecem a transferência por *curto-circuito* e em tensões mais altas haverá tendência à transferência no modo goticular (*spray*);
- Valores elevados de tensão podem propiciar o aparecimento de porosidades, salpicos e mordedura. Para valores baixos poderá surgir porosidades e sobreposição de metal na margem do cordão.

b) Corrente de soldagem (I_s)

- Quando alta irá influenciar diretamente na geometria do cordão, no volume da poça fundida, no incremento da taxa de fusão, na largura da **ZTA** e na microestrutura do depósito (efeito sobre o aporte térmico);
- Pode alterar o modo de transferência metálica;
- Uma elevação na corrente de soldagem irá ocasionar um aumento na rigidez do arco e reduzir o nível de salpicos minúsculos (mudança no modo de transferência).

c) Velocidade de soldagem (v_s)

- Um aumento na velocidade de soldagem irá propiciar estreitamento do cordão e uma elevação na penetração, num primeiro instante, e diminuição desta em valores maiores;
- Em velocidades muito altas poderá ocorrer o surgimento de mordeduras (geometria irregular do cordão) e de trincas de solidificação;
- O incremento na velocidade de soldagem, mantido os outros parâmetros fixos, acarretará ainda uma redução no nível de distorção, tamanho da **ZTA** e modificação na microestrutura do metal depositado.

- Velocidades altas de soldagem, pelo efeito na taxa de resfriamento, também acarretarão aumentos nos limites de ruptura e escoamento e uma redução da elongação.

d) Ângulo de inclinação da tocha de soldagem (figura 2.3)

- A utilização de um ângulo de *deslocamento* (ou *ataque*) negativo, compreendido entre 0 a 20° - já que seu valor depende da posição de soldagem empregada, facilitará o processo de limpeza catódica (remoção de óxido, crítico em metais como o alumínio e titânio, por exemplo). A aplicação de ângulo negativo, apesar do fácil controle e facilidade na operação, também provocará baixa penetração, acompanhada de um cordão largo e chato e com reduzida incidência de salpicos;

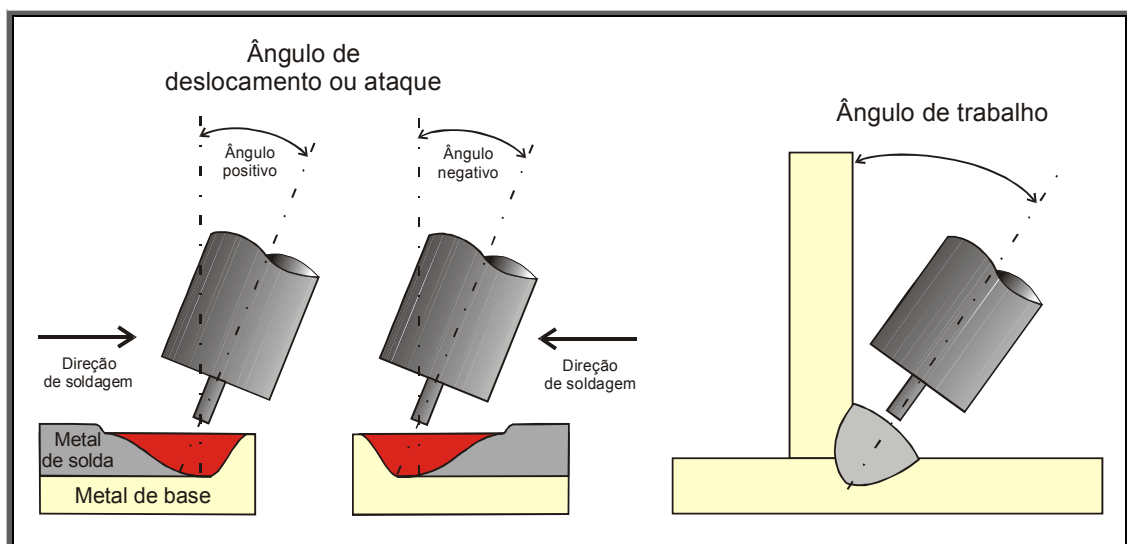


Figura 2.3 – Ângulos de posicionamento da tocha.

- O emprego do ângulo de *deslocamento* positivo (eletrodo à ré), compreendido entre 0 a 20°, produz cordões com maior penetração e reforço convexo, embora o controle da operação de soldagem se torne mais difícil e o efeito da proteção do gás tende a diminuir, podendo gerar porosidade;
- Transversalmente à solda localiza-se o ângulo de *trabalho*, compreendido normalmente entre 35 a 115° em relação a vertical, que apresenta influência sobre a simetria do cordão. A seleção do valor do ângulo de *trabalho* dependerá do tipo de junta e da posição de soldagem.

e) Distância entre o bico de contato e o metal de base (DCP)

- A posição do bico de contato, figura 2.4, dependerá do modo de transferência com o qual se deseja soldar. De uma maneira simples para a soldagem no modo goticular o bico de contato deverá permanecer recuado em relação ao bocal e, para a soldagem em curto-circuito, o bico de contato deverá permanecer faceado ou projetado do bocal;
- Valores excessivos de **DCP** poderão prejudicar a blindagem gasosa, facilitar a oscilação do arame projetado, aumentar a incidência de salpicos e porosidades e tornar o cordão irregular;

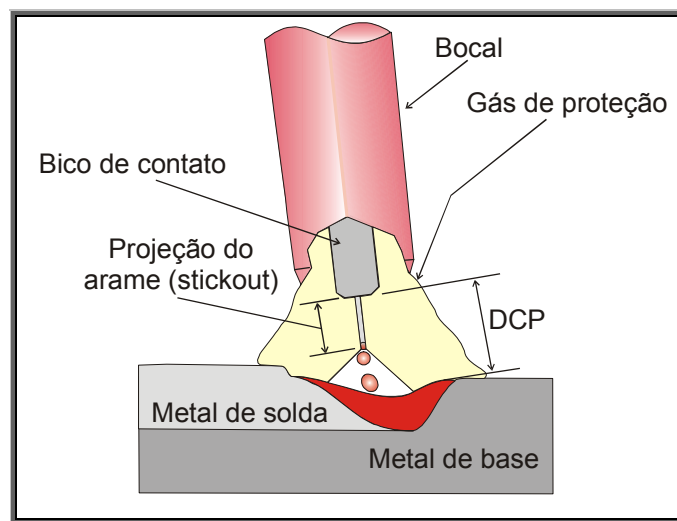


Figura 2.4 – Representação da distância contato peça e da projeção do arame (**stickout**). Adaptado de Barra (1998).

- Valores baixos de **DCP** poderão ocasionar penetração profunda, reforços altos e cordões estreitos (pela redução no valor da tensão) e aderência de salpicos no bocal;
- Dois parâmetros estão implicitamente relacionados com o valor de **DCP**, ou seja, o comprimento do arco (ℓ_0) e a projeção do arame em relação ao bico de contato (ℓ). Para materiais resistivos (como a aço, por exemplo), um aumento em ℓ provoca um acréscimo sobre a taxa de fusão, em decorrência da parcela de calor originada por efeito Joule ($I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho_e \cdot \ell}{A}$). O valor real da projeção do arame dependerá do ponto de tomada de energia no bico-arame e das condições de operação destes.

2.3 Modos de transferência metálica

Os modos de transferência metálica se caracterizam como sendo a forma com que o metal líquido superaquecido (gota metálica) se transfere desde a ponta do arame (eletrodo) até a poça de fusão. O modo pelo qual a gota irá se transferir, em uma determinada condição de soldagem dependerá, entre outros, da combinação dos seguintes fatores (AWS, 1991; Machado, 1996; Jones et al, 1998):

- ❑ Tipo de gás de proteção e nível de vazão;
- ❑ Tipo (CC, CA ou pulsada) e magnitude da corrente de soldagem empregada;
- ❑ Diâmetro e composição química do eletrodo;
- ❑ Projeção do arame em relação ao bico de contato;
- ❑ Tensão de soldagem;
- ❑ Polaridade;
- ❑ Pressão ambiente.

A estabilidade no modo de transferência é determinada pelo balanço entre a taxa de alimentação (T_{xa}) e a taxa de fusão do eletrodo (T_{xf}), como expressa pela equação 2.1 (Amim, 1983; Allum et al, 1985; Norrish et al, 1988). Um desequilíbrio no balanço poderá ocasionar curto-circuito ou o aumento excessivo do arco, podendo desta forma vir a fundir o bico de contato (no caso da soldagem MIG/MAG ou Arame tubular).

$$T_{xf} = \alpha \cdot I + \beta \cdot \ell \cdot I^2 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde: $\ell \rightarrow$ projeção do eletrodo em relação ao bico de contato (**stickout**), comprimento do arame realmente energizado;

$I \rightarrow$ corrente de soldagem;

$\alpha \rightarrow$ constante que caracteriza as reações no ânodo e que apresenta relação com o tipo de gás, tipo de eletrodo e polaridade empregada;

$\beta \rightarrow$ constante associada com o aquecimento resistivo do eletrodo.

Como forma de classificar os diversos modos de transferência metálica, observados no processo de soldagem, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW)

realizou a catalogação e classificação destes, baseado em estudos utilizando fotografias de alta velocidade (Stenbacka e Persson, 1989). A tabela 2.1 apresenta a classificação adotada pelo IIW e algumas inserções pertinentes (Stenbacka e Persson, 1989; Machado, 1996; Vilarinho, 2000; Baixo, 1990) e a figura 2.5 esquematiza os principais modos de transferência.

Tabela 2.1 - Classificação dos modos de transferência metálica. Adaptado de Okumura et al (1982).

				Processo observado	Força ou mecanismo atuante
Modo de transferência	Ponte	Curto-circuito		MIG/MAG	Tensão superficial e força eletromagnética
		Ponte sem interrupção		TIG e Plasma com vareta	Tensão superficial e força eletromagnética (arame quente)
	Vôo livre	Goticular (Spray)	Projetado	MIG/MAG (corrente intermediária)	Instabilidade devido à contração eletromagnética
			Em gotas	MIG/MAG (corrente baixa)	
			Contínua	MIG/MAG (corrente média)	Força eletromagnética
			Rotativa	MIG/MAG (corrente alta)	Instabilidade devido à deformação eletromagnética
		Explosivo		MIG/MAG e ER	Vaporização do metal de adição ao passar pelo arco
	Controlada	Curto-circuito Controlado		MIG/MAG	Controle na dinâmica de subida e descida da corrente
		Pulsada		MIG	Imposição de diferentes níveis de corrente e força eletromagnética
	Protegida por escória	Guiado pelas paredes (fluxo)		Arco submerso	Química e eletromagnética
		Outros modos		Arco submerso, Arame tubular e Eletroescória	Química e eletromagnética

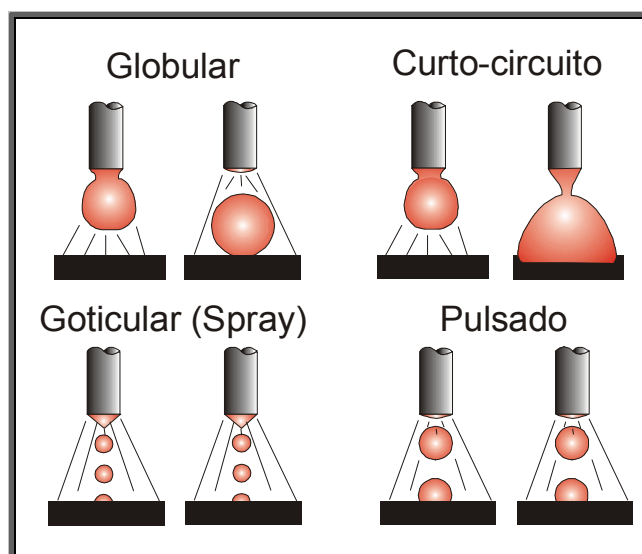


Figura 2.5 - Representação esquemática dos principais modos de transferência.

2.3.1 Forças atuantes na transferência metálica

A teoria mais empregada na explicação dos mecanismos de transição entre os diversos modos de transferência é a *teoria do balanço estático de forças*. Outras teorias propõem explicações para o fenômeno, como a *teoria da instabilidade devido à constrição (efeito Pinch)*, a *teoria da velocidade crítica* e a *teoria da força do plasma* (Pereira, 2000; Choi et al, 1998; Machado, 1996).

a) Teoria do equilíbrio das forças estáticas

Esta teoria leva em consideração a resultante das forças estáticas atuantes sobre o destacamento da gota metálica, isto é, o quanto as forças estáticas de destacamento excedem as forças estáticas de retenção (vide figura 2.6 e equação 2.2). Além disso, o fenômeno de destacamento da gota deverá ser considerado como dependente do tempo. Kim and Eagar (1993), encontraram variações menores que 10% entre os resultados teóricos e os experimentais, o que reforça o uso desta teoria.

A condição necessária para o destacamento da gota metálica da ponta do eletrodo até a poça de fusão, considerando a posição plana, é dada pela equação 2.2.

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde: $F_{em} \rightarrow$ Força eletromagnética;

$F_g \rightarrow$ Força devido à aceleração da gravidade;

$F_a \rightarrow$ Força de arraste do plasma;

$F_\gamma \rightarrow$ Força devido à tensão superficial;

$F_v \rightarrow$ Força devido ao jato de vapor.

a.1) Força devido à aceleração da gravidade (F_g)

A influência desta força sobre o destacamento da gota, a favor ou contra, dependerá da posição de soldagem empregada na operação de deposição.

$$F_g = m_g \cdot g \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde: $m_g \rightarrow$ massa da gota;

$g \rightarrow$ aceleração da gravidade.

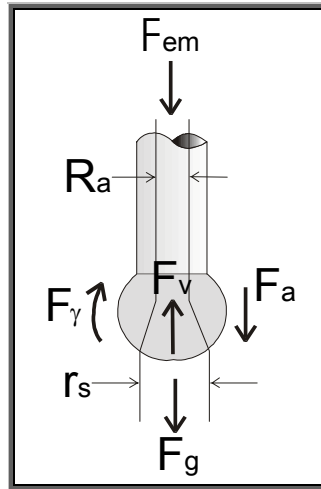


Figura 2.6 – Balanço estático das forças atuantes na gota (Pereira, 2000).

a.2) Força eletromagnética ou de Lorentz (F_{em})

É a força resultante do campo magnético gerado pela passagem de corrente através do arame, quando as linhas de corrente divergem na gota. Como a força de Lorentz atua em ângulos retos com estas linhas de corrente, irá surgir uma resultante tendendo a destacar a gota. A força eletromagnética é considerada como a principal força atuante na formação e destacamento da gota na soldagem MIG/MAG e que esta, também, poderá assumir valores negativos ou positivos, dependendo do caminho do fluxo de corrente e dos valores de R_a e r_s . Como expresso pela equação 2.4, o valor da força eletromagnética pode ser determinada através da integral do volume da gota (Pandey et al, 1995; Norrish and Richardson, 1998).

$$F_{em} = \int J \wedge B \cdot G(r, \theta, \Phi) dV \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Aplicando-se as devidas simplificações e assumindo que a corrente diverge linearmente do arame sólido para a gota, chega-se a seguinte equação:

$$F_{em} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_s}{R_a}\right) \quad (5)$$

Onde: $J \rightarrow$ densidade de corrente;

$B \rightarrow$ campo magnético;

$G(r, \theta, \Phi) \rightarrow$ função geométrica dependente da forma da gota;

$r, \theta, \Phi \rightarrow$ coordenadas definidas arbitrariamente;

$\mu_0 \rightarrow$ permeabilidade magnética do material;

$I \rightarrow$ corrente elétrica;

$R_a \rightarrow$ raio de entrada da corrente elétrica (eletrodo);

$r_s \rightarrow$ raio de saída da corrente (gota).

a.3) Força de arraste do plasma (F_a)

Esta força está ligada diretamente com a intensidade do fluxo de plasma no interior do arco. Como expressa pela equação 2.6, o valor de F_a apresenta dependência com a composição do gás, com o tamanho da gota (considerada esférica) e com a velocidade do fluxo no interior do arco (Norrish et al, 1988; Kim et al, 1993; Machado, 1996).

$$F_a = \frac{\pi \rho v_p^2 r_g^2 c_a}{2} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde: $\rho \rightarrow$ densidade do gás;

$v_p \rightarrow$ velocidade do jato de plasma;

$r_g \rightarrow$ raio da gota imersa no plasma;

$c_a \rightarrow$ coeficiente de arraste (dependente do número de Reynolds e, em menor escala, da corrente).

a.4) Força devido à tensão superficial (F_γ)

Excetuando no modo de transferência por curto-circuito, esta força tende a manter a gota presa na ponta do arame, sobrepondo-se à transferência da gota. Fatores como a temperatura, a composição química e o formato da gota metálica e o gás de proteção empregado, tornam difícil o cálculo da magnitude desta força (Machado, 1996; Pereira, 2000).

$$F_{\gamma} = 2\pi\gamma_s r_a \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Onde: $\gamma_s \rightarrow$ tensão superficial;

$r_a \rightarrow$ raio do arame (pescoço), dependente do tempo.

a.5) Força devido ao jato de vapor (F_v)

Esta força é produzida pela presença de vaporização da gota metálica, no contato desta com a raiz do arco, em altas correntes de soldagem. A aceleração térmica das partículas de vapor no interior do arco plasma provoca uma força que se opõe ao destacamento da gota (Pereira, 2000).

$$F_v = \frac{\dot{m} I J}{\rho_v} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Onde: $\dot{m} \rightarrow$ massa total vaporizada por segundo e por ampère

$\rho_v \rightarrow$ densidade do vapor

$I \rightarrow$ corrente de soldagem

$J \rightarrow$ densidade de corrente

b) Modos de transferência metálica

Como já citado anteriormente, existem diversas classificações quanto ao modo de como a gota metálica se destaca da ponta do arame até a poça de fusão. Como o objetivo deste trabalho é fazer uma abordagem mais centrada sobre o modo de transferência controlada (*corrente pulsada* e mais especificamente sobre a *pulsação térmica* – considerada aqui como uma variante do modo pulsado), será feita uma explanação partindo diretamente do modo goticular (*spray*) e direcionando as atenções sobre as peculiaridades da soldagem em corrente pulsada.

O acompanhamento e/ou documentação dos diversos modos de transferência metálica podem ser normalmente realizados com o uso de oscilogramas (evolução dos sinais de I , U e v_a em função do tempo), do processo de filmagem em alta velocidade da região do arco (*shadowgrafia*) ou através da combinação destas duas técnicas.

Vilarinho (2000) comenta que o estudo da transferência metálica por meio da visualização das gotas transferidas do eletrodo para a poça de fusão necessita de um aparato que permita a visualização de quantidades mínimas de metal líquido viajando a uma alta velocidade no interior do arco (alta velocidade de aquisição de quadros por segundo).

A visualização torna-se possível com o emprego da técnica que consiste em registrar a imagem dos mecanismos de transferência metálica no arco elétrico, por meio de filmagem numa velocidade que varia entre 1000 a 14000 quadros por segundo, denominada de *filmagem com câmaras de alta velocidade* (Shadowgrafia) (Jones et al, 1998; Pereira, 2000; Balsame et al, 2000). A figura 2.7 esquematiza a técnica de filmagem da região do arco.

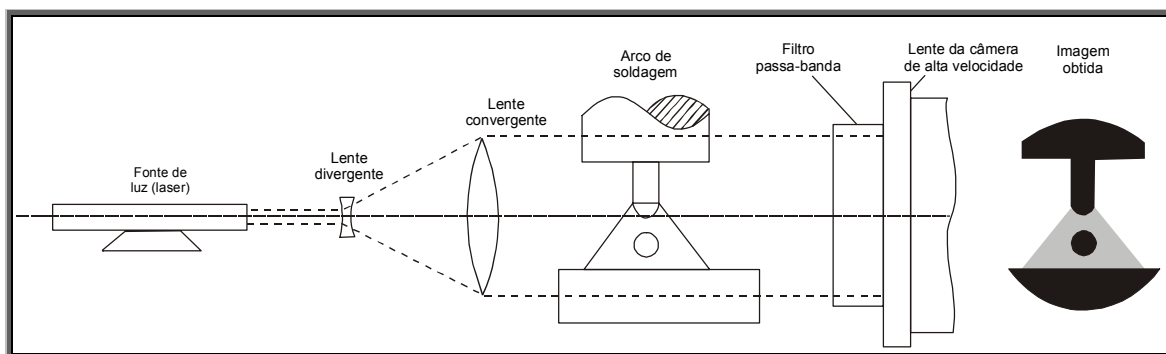


Figura 2.7 – Descrição da técnica de *shadowgrafia*. Extraído de Bálsamo et al (2000).

Basicamente, a imagem obtida após o filtro passa-banda é projetada na lente da câmera. A luz do laser, através de uma filtragem seletiva, possibilita a formação da sombra da tocha, do arame, da gota metálica, do cordão de solda e da chapa, sobre um fundo vermelho (Baixo e Dutra, 1989; Vilarinho, 2000).

As imagens obtidas permitem identificar o modo de transferência metálica presente e se o arco elétrico encontra-se estável. Porém, diferentemente dos oscilogramas de **I** e **U**, o processo de filmagem não permite dizer em que momento exato um determinado fenômeno ocorreu. Assim, para unir as vantagens presentes nos oscilogramas e na filmagem em alta velocidade, foi implementada mais recentemente a sincronização entre os sinais de tensão e corrente com as imagens documentadas (Scotti et al, 1998; Vilarinho 2000).

b.1) Modo de transferência goticular (*pulverização axial ou spray*)

Este modo de transferência metálica é caracterizado pela aplicação de uma corrente de soldagem acima do patamar denominado de corrente de transição (I_t), isto é, valores acima da corrente que delimita a fronteira entre o modo curto-circuito e o modo goticular. Para uma v_a fixa, ao se aproximar da corrente de transição, em proteção gasosa rica em argônio, por meio da elevação contínua da corrente de soldagem, observa-se que as dimensões das gotas transferidas são reduzidas e a quantidade de gotas destacadas é acrescida.

É importante salientar que o valor da corrente de transição tende a se elevar com o aumento do teor de gás ativo (percentual de CO_2 , por exemplo) e da tensão superficial. Entretanto, o valor de I_t será reduzido com a diminuição do diâmetro do arame e/ou com o aumento da projeção deste em relação ao bico de contato (AWS, 1991).

O modo goticular (*spray*) ocorre em elevadas densidades de corrente e nível de tensão (na faixa de 24 a 40 V) e o diâmetro da gota transferida é relativamente menor que o diâmetro do eletrodo. As gotas geradas são axialmente impulsionadas em direção a poça de fusão (Wainer, 1992).

Scotti (1998) cita que na realidade existe uma zona onde é verificado um misto entre os modos globular e goticular. Nesta região, ocorrem períodos de destacamento de gotas grandes, seguidos de períodos apresentando um elevado número de gotinhas.

Um aumento ainda maior na corrente de soldagem poderá ocasionar a mudança de goticular axial para o goticular rotacional, tornando a transferência bastante instável, mas, ao mesmo tempo, possibilitando um sensível incremento na taxa de fusão do eletrodo.

b.2) Transferência controlada (*corrente pulsada*)

A primeira citação da utilização do modo pulsado no processo GMAW foi descrita por Needham em 1962 e, em 1963, o processo foi utilizado na soldagem do alumínio. Contudo, naquele período havia o inconveniente da disponibilidade, apenas, de equipamentos que permitiam modulações da corrente com onda na forma senoidal e frequência atrelada ao sinal da rede, viabilizando somente a geração de pulsos com múltiplos ou submúltiplos deste sinal – 50/60 Hz ou 100/120 Hz (Street, 1990; Alcan 1993). O resultado desta limitação era a

instabilidade no processo de transferência metálica, para determinados valores de velocidade de alimentação do arame (v_a), ou seja, a impossibilidade na manutenção da condição **UGPP** (uma gota por pulso).

O termo “controlado”, para o modo pulsado, refere-se ao fato da imposição de condições na maneira como a gota irá ser transferida da ponta do arame até a poça de fusão ou, em outras palavras, o tamanho (dimensão em relação diâmetro do eletrodo) e o tempo entre as emissões de gotas sucessivas (ou a frequência de destacamento **F**) podem ser previamente impostos pelo operador, vide figura 2.8.

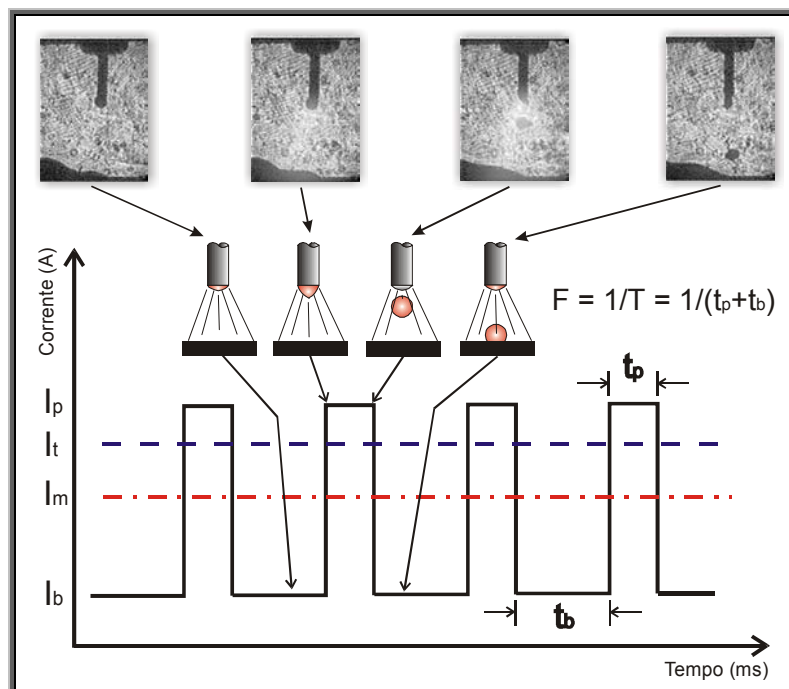


Figura 2.8 – Representação do processo de transferência no modo pulsado.

Resumidamente, o modo pulsado pode ser descrito como sendo um modo goticular (*spray*) controlado, onde as gotas metálicas são formadas e destacadas através de pulsos de corrente aproximadamente simétricos (ondas quase retangulares), ou seja, uma variação (modulação) controlada da corrente no tempo, com frequência e amplitudes pré-estabelecidas.

Como vantagens em se transferir a gota por este modo pode ser feita a seguinte relação (Quites, 1979; Amim, 1983; Street, 1990; Scotti, 1991; Norrish, 1992; Sadler, 1999):

- Transferência goticular (*spray*) em corrente média inferior a corrente de transição;

- Redução ou eliminação na incidência de salpicos e redução na geração de fumos;
- Redução no limite mínimo de espessura possível a ser soldado (redução no valor da corrente média “ I_m ” imposta, em relação a condição similar em **CC**);
- Velocidade de soldagem maior que no modo curto-circuito;
- Possibilidade de soldagem em todas as posições;
- Comparado com *MIG/MAG* convencional, o modo *pulsado* proporciona um cordão estreito e uma penetração profunda e uniforme (Street, 1990). Contudo, esta consideração é rebatida por Kin et al (1993). Neste trabalho, os autores relatam a observação de cordões com uma penetração pouco profunda, durante a soldagem com corrente pulsada. Estas considerações demonstram que a geometria final do cordão dependerá do procedimento de soldagem adotado para cada condição (v_s , ângulo da tocha, projeção do arame, mistura gasosa, etc..)

Como desvantagens do processo, pode-se enumerar (Street, 1990; Norrish, 1992; Paula et al, 1996):

- Necessidade de mão-de-obra mais qualificada, em face à complexidade na seleção dos parâmetros de soldagem;
- Fontes de soldagens com maior nível tecnológico (melhor dinâmica de resposta), que recai em maior custo do equipamento;
- Para iguais valores de potência, não levando em conta o efeito da mistura gasosa e a perda por salpicos, a efetividade na produtividade do método não é superior ao obtido no modo *curto-circuito*. Portanto sendo a seleção do modo de transferência uma função da conveniência da operação desejada;
- Maior geração de ozônio quando comparado com o modo convencional. Esta diferença é proporcionada pelo reduzido período na fase de pulso, seguida por um “resfriamento” na fase de base, propiciar uma reduzida geração de fumos e, conseqüentemente, possibilitando uma maior emissão de raios ultravioleta e a produção de ozônio na vizinhança ao arco.

No modo *pulsado* emprega-se a imposição de dois patamares de corrente em tempos distintos e previamente definidos (vide a figura 2.8). O primeiro patamar de corrente, abaixo da transição, denominado de corrente de base (I_b) é associado a um tempo de permanência denominado de tempo de base (t_b), cuja função desse primeiro par é a manutenção do arco elétrico, limpeza catódica e aquecimento do eletrodo por efeito Joule. O segundo patamar de corrente, situado acima da corrente de transição, denominado de corrente de pulso (I_p) é associado a um tempo de permanência identificado de tempo de pulso (t_p), neste caso a função desse último par é destacar e projetar uma única gota em direção à poça de fusão, isto é, aplicação de altíssimas forças eletromagnéticas em curtíssimos espaços de tempo (Amim, 1983; Street, 1990; Norrish, 1992; Subramaniam, 1998).

Neste caso, a tensão de soldagem, pelo fato da imposição de corrente no pulso convencional, ficará na pendência do formato da onda de pulso aplicado, excetuando a soldagem no modo misto (onde há imposição do controle da corrente e da tensão em pontos diferentes da onda).

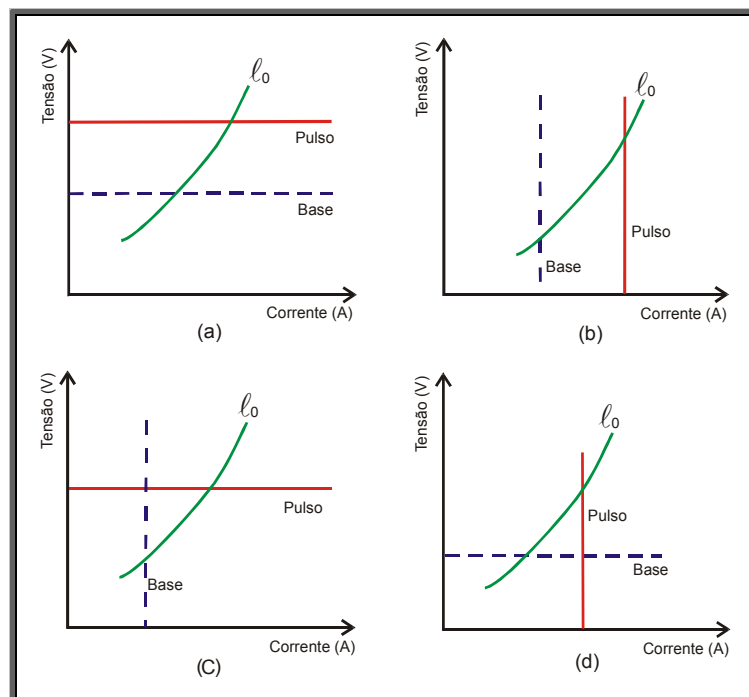


Figura 2.9 – Características estáticas possíveis de serem empregadas no modo pulsado. Adaptado de Dutra et al (1992).

As características estáticas possíveis de serem empregadas no modo pulsado são apresentadas na figura 2.9 (Dutra et al, 1992). No item (a) há imposição de tensão tanto no pulso quanto na base. No item (b), correspondente

ao modo convencional de pulsação, há imposição de corrente tanto no pulso quanto na base. Para o item (c) há uma combinação com a imposição de tensão no pulso e corrente na base, combinação conhecida como *modo misto*. No último caso, item (d), há também uma combinação, impondo-se corrente no pulso e tensão na base.

b.2.1) Critérios para a estabilidade no modo pulsado

A correta seleção do pacote operacional ótimo (I_b , t_b , I_p e t_p) tem se tornado o principal entrave da aplicação do modo pulsado quando comparado a relativa facilidade de regulação na soldagem convencional (comando de tensão). A dificuldade pode ser explicada pela característica do modo pulsado ser estável somente se o pacote selecionado estiver localizado dentro de uma determinada região denominada de “região ótima” (vide figura 2.10). Fatores como o tipo de onda de pulso (retangular, trapezoidal ou exponencial) e a dinâmica da fonte e do sistema de alimentação do arame se caracterizam como pontos críticos no êxito deste modo de transferência controlada.

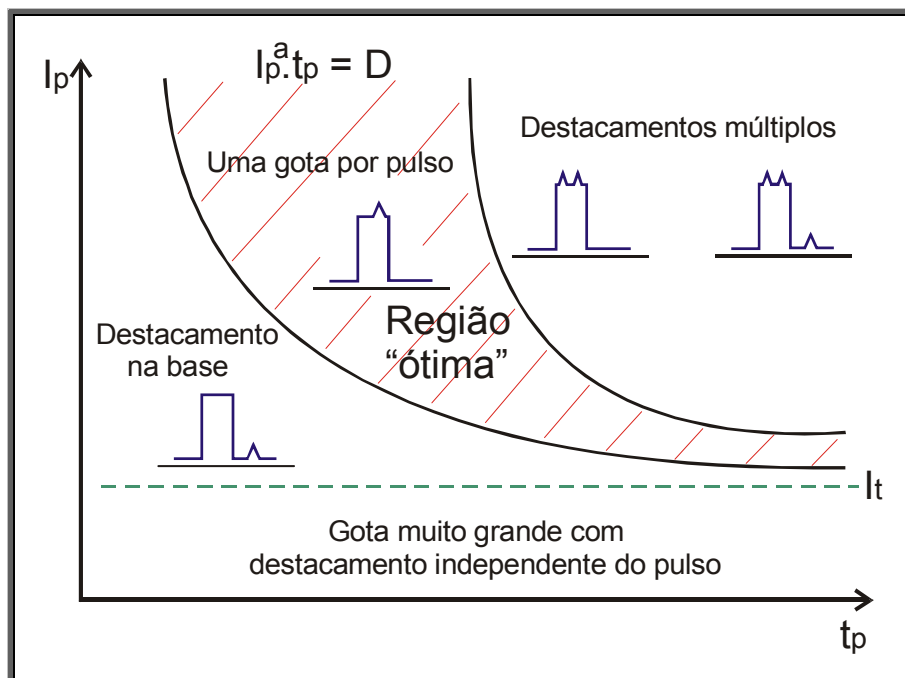


Figura 2.10 – Condições de transferência em função dos valores de I_p e t_p selecionados. Adaptado de Ueguri et al (1985).

Para que o pacote a ser empregado garanta um processo de transferência metálica estável são necessárias que sejam satisfeitas três premissas (condições):

- 1ª Igualdade entre a taxa de alimentação (T_{xa}) – **wire feed rate** – a taxa de fusão (T_{xf}) do arame – **burn off rate**;
- 2ª Destacamento de apenas uma gota por pulso e com diâmetro aproximadamente igual ao do eletrodo;
- 3ª A corrente de base deverá ter um valor necessário à manutenção do arco.

1ª Balanço entre a taxa de fusão (T_{xf}) e a taxa de alimentação (T_{xa})

O primeiro critério a ser atendido quando da soldagem em *corrente pulsada* é o balanço entre taxa de fusão do arame (T_{xf}) e a taxa como este está sendo alimentado (T_{xa}). Um desbalanceamento desta condição poderá acarretar uma redução no comprimento do arco (ℓ_0) e o surgimento de curto-circuito, quando $T_{xf} < T_{xa}$. Para $T_{xf} > T_{xa}$, ocorrerá um aumento no comprimento do arco (ℓ_0) e a possibilidade de queima do bico de contato.

Uma maneira de representar a potência elétrica no arco é aquela empregando a discretização através de um conjunto de resistores (analogia com um circuito elétrico). As parcelas que efetivamente produzem geração de calor no consumo do arame, P_c , são representadas pelas quedas de tensão no eletrodo V_{el} (efeito Joule) e na região anódica $V_{ân}$ (reações existentes nessa região), como apresentado na figura 2.11 e na equação 2.9 (Wainer, 1992; Adolfsson et al, 1996; Vilarinho, 2000).

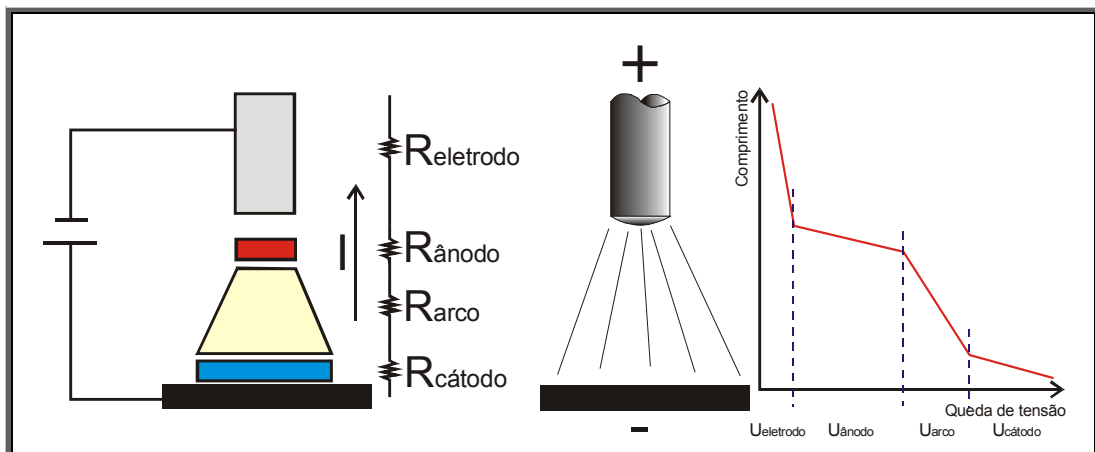


Figura 2.11 – Representação do arco como um conjunto de resistores. Adaptado de Wainer (1992) e Vilarinho (2000).

$$P_c = \Delta V_{el} \cdot I + \Delta V_{ân} \cdot I \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Como $V_{el} = R.I$, tem-se:

$$P_c = R_{el}.I^2 + \Delta V_{ân}.I \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Fazendo-se uma renomeação dos termos ($\Delta V_{ân} \rightarrow \alpha$ e $R_{el} \rightarrow \beta.\ell$ - já descritas anteriormente) e levando em consideração que a transferência se dá no modo pulsado (equação 2.11), chega-se a modelagem representada pela equação 2.12 (Allum, 1983; Richardson et al, 1994):

$$T_{xf-p} = \int_0^T T_{xf}(t)dt \quad (\text{Eq. 2.11})$$

$$T_{xf-p} = T_{xf-cc} + \beta.\ell.x.(1-x).I_e^2 \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Onde: $T_{xf-p} \rightarrow$ taxa de fusão no modo pulsado;

$T_{xf-cc} \rightarrow$ taxa de fusão equivalente em corrente contínua;

$x \rightarrow$ fração de duração do pico ($x = t_p.F$, onde F é a freqüência de pulsação);

$I_e \rightarrow$ excesso de corrente ($I_e = I_p - I_b$).

Como T_{xf-cc} é função da corrente média (equação 2.13) e para o modo pulsado o valor da corrente média (I_m) é representado pela equação 2.14 (supondo uma onda retangular), chega-se na equação 2.15.

$$T_{xf-cc} = \alpha.I_m + \beta.\ell.I_m^2 \quad (\text{Eq. 2.13})$$

$$I_m = \frac{I_p.t_p + I_b.t_b}{t_p + t_b} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$T_{xf-p} = \alpha.I_m + \beta.\ell.\left[I_m^2 + \frac{(I_p - I_b)^2.t_p.t_b}{(t_p + t_b)}\right] \quad (\text{Eq. 2.15})$$

A equação 2.15 é um modelo não linear baseado na forma de onda retangular. Nesta, o termo $(I_p - I_b)$ representa uma parcela significativa no valor final de T_{xf-p} e, quando em baixas correntes médias, este termo pode gerar um aumento de até 50% em T_{xf-p} (Richardson et al, 1994; Vilarinho, 2000). Uma maneira simplista de representar esta equação é através da consideração de que o segundo termo da função seja considerado como uma constante, isto é, $T_{xf-p} = \alpha \cdot I_m + \text{constante}$. Onde α é o coeficiente angular da reta e a “constante” é a interseção da reta com o eixo da velocidade de alimentação do arame (vide figura 2.12).

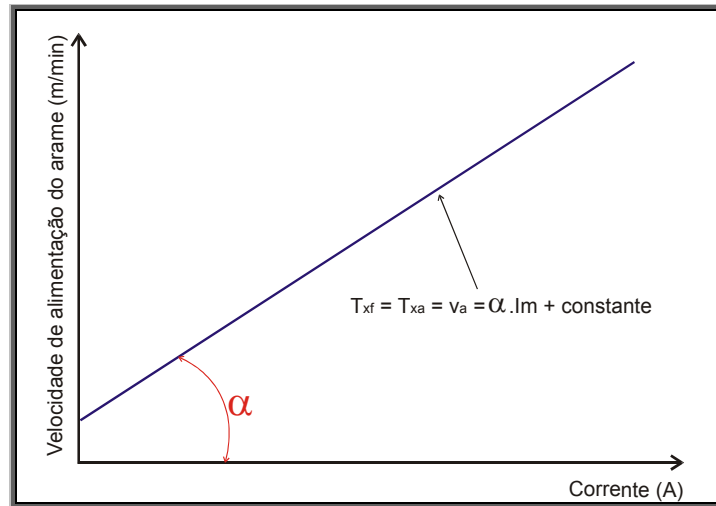


Figura 2.12 – Relação simplificada entre a taxa de fusão (T_{xf}) e a taxa de alimentação (T_{xa}).

Santos (2000), aplicando regressão linear nos pontos (pares) $I \times v_a$, equação 2.15 simplificada, observou que assumindo a consideração de que a reta intercepta a origem (constante igual a zero) recairá numa co-relação (R^2) de 0,98, enquanto que para a não fixação do valor desta constante a co-relação se elevará para 0,99.

Assumindo a consideração de que $I_p^2 \cdot t_p \gg I_b^2 \cdot t_b$ chega-se finalmente a equação da taxa de fusão no modo pulsado (equação 2.16).

$$T_{xf-p} = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot \ell \cdot \frac{I_p^2 \cdot t_p}{t_p + t_b} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

Nesta equação o termo $I_p^2 \cdot t_p$ é definido como *constante de destacamento* (**D**). O valor da constante **D**, obtido através de ensaio, é função do material e do diâmetro do arame e do tipo de gás de proteção. Experimentalmente, é verificado que o valor do expoente em " I_p^2 ", na realidade, oscila entre 1 a 2,3 (Amim, 1983; Santos, 1986; Kim et al, 1993; Paula, 1996).

Como a condição exigida é a de que exista um equilíbrio entre a taxa de fusão (T_{xf-p}) e a taxa de alimentação (T_{xa-p}), em outras palavras, o fluxo de massa do arame sendo alimentado (\dot{m}_a) deverá ser igual ao fluxo de massa da gota sendo transferido (\dot{m}_g), durante um período de pulsação (vide figura 2.13 e equação 2.17).

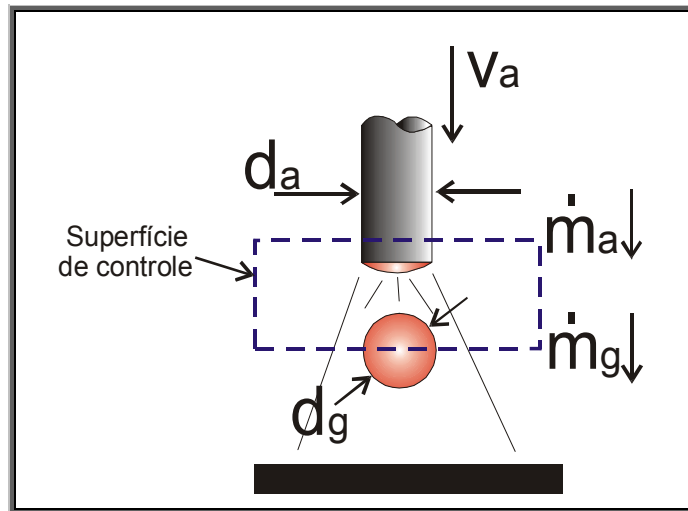


Figura 2.13 – Condição de equilíbrio entre a taxa de alimentação e a taxa de fusão.

$$T_{xf-p} = T_{xa-p} = \dot{m}_g = \dot{m}_a \quad (\text{Eq. 2.17})$$

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot r_g^3 \cdot \rho_g}{3} = \pi \cdot r_a^2 \cdot v_{aa} \cdot \rho_a \cdot (t_p + t_b)$$

$$T = t_b + t_p = \frac{240 \cdot V_g}{\pi \cdot d_a^2 \cdot v_a} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

Onde: ρ_g e $\rho_a \rightarrow$ densidades da gota e do arame, que para simplificação são consideradas iguais;

\dot{m}_g e $\dot{m}_a \rightarrow$ fluxos de massa para o eletrodo e para a gota, respectivamente;

d_g e $d_a \rightarrow$ diâmetros da gota e do arame, respectivamente;

$v_a \rightarrow$ velocidade de alimentação do arame.

2ª Destacamento de apenas uma gota por pulso (UGPP)

O processo de pulsação deverá garantir que a transferência de apenas uma gota seja executada no final da fase de pulso e, preferencialmente, com diâmetro igual ao do eletrodo (vide novamente a figura 2.10).

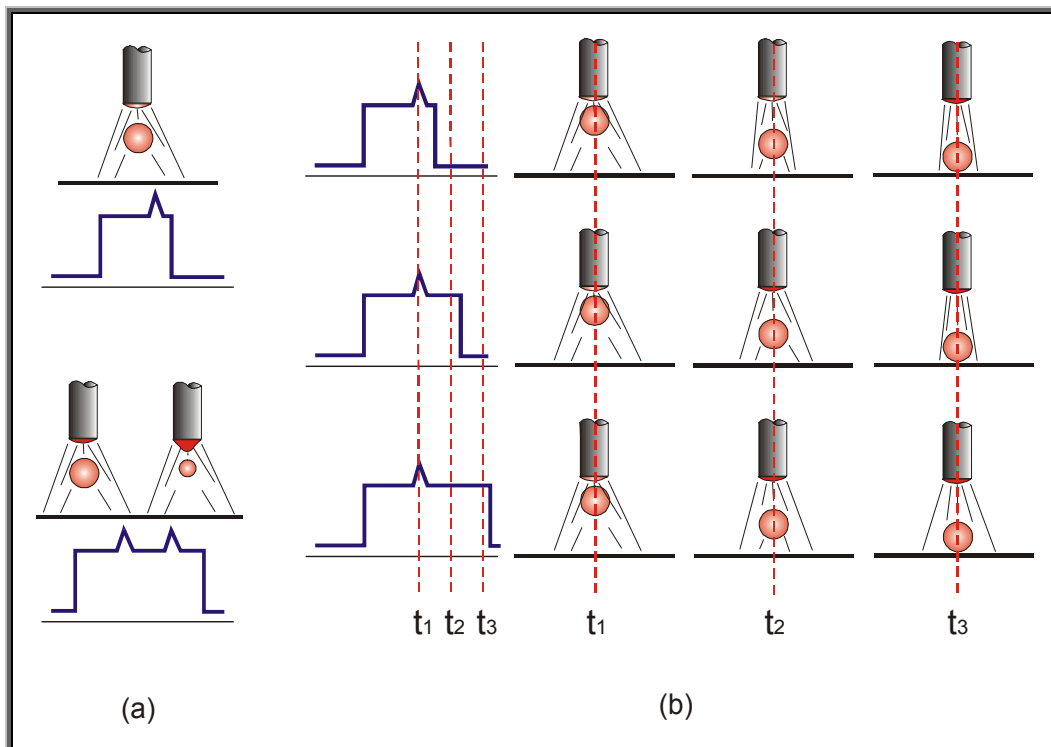


Figura 2.14 – Condições de transferência: (a) grande tempo de destacamento provocando mais de uma projeção e (b) influência do tempo de pulso na forma de projeção da gota. Adaptado de Alcan (1993).

Alcan (1993) cita que caso a gota seja transferida no início do pulso haverá tendência de um novo destacamento, ainda neste pulso, com menor diâmetro e maior aceleração, gerando dificuldade de controle do processo de transferência e o surgimento de salpicos (vide figura 2.14(a)). Contudo, há uma certa controvérsia a respeito do melhor momento para que a gota seja transferida, ou seja, Nixon and Norrish (1988), Alcan (1993) e Subramaniam (1996) sugerem como sendo a fase

de base o melhor momento para a projeção da gota (menor energia e estabilidade no toque gota-poça) e justificam esta consideração no fato de que uma vez iniciada a transferência, no pulso, esta se tornará irreversível mesmo na fase de base (vide figura 2.14(b)).

Como a fase de base tem pouca influência sobre o destacamento da gota pode-se garantir o critério de **UGPP** através da equação hiperbólica $I_p^a \cdot t_p \geq D$ (Amim, 1983; Ueguri, 1985; Norrish, 1988; Machado, 1996). Esta equação delimitará a região ótima para o processo de destacamento e qualquer outro par de I_p e t_p que não se localizar dentro desta região irá provocar a instabilidade na transferência metálica (vide novamente a figura 2.10).

A determinação do valor de **D** acarreta uma simplificação na solução da equação 2.16. Neste caso, a mesma passa de um comportamento não linear para um comportamento linear.

O valor de **D**, como já discutido previamente poderá ser estabelecido experimentalmente através de diferentes técnicas, como:

☞ **Utilização de osciloscópio**

Esta técnica se caracteriza pela relativa facilidade de manipulação no processo de visualização em tempo real do comportamento das ondas de corrente e tensão.

A metodologia basicamente pode ser descrita pelos seguintes passos (Amim, 1983; Norrish et al, 1988; Dutra, 1989; Alcan, 1993; Santos, 2000):

- a) Utilizando imposição de tensão (*MIG convencional*) determinar a corrente de transição através do momento onde o sinal de corrente tende a estabilizar numa reta e do acompanhamento visual da região do arco. Refinamento, posterior, deste valor pela imposição de corrente, verificando-se quando o sinal de tensão tende a apresentar picos de destacamentos simétricos (**ripples**) e igualmente espaçados (vide figura 2.15);
- b) Selecionar um par $I_b \times t_b$ que mantenha a estabilidade do arco na fase de base;
- c) Partindo-se do valor de transição determinado, fazer seguidos incrementos nos valores de I_p e t_p (25 em 25 A e 0,5 em 0,5 ms, por exemplo);

- d) Variar a velocidade de alimentação do arame como forma de controlar o comprimento do arco ($I_m = \alpha \cdot v_{aa} + \text{constante}$). Onde α (denominado de *fator de fusão*) é o coeficiente de inclinação da reta ($I_m \times v_a$);
- e) Verificar o momento do destacamento de **UGPP**. O momento exato onde a gota se destaca pode ser identificada pela presença de um “pico”, perturbação no sinal de tensão ($\approx 0,5$ V) devido ao empescoçamento da gota, vide figura 2.15. Entretanto, todo o cuidado deve ser tomado quanto ao conhecimento do nível de ruído gerado pela fonte de soldagem, objetivando não recair no mascaramento do sinal do osciloscópio;

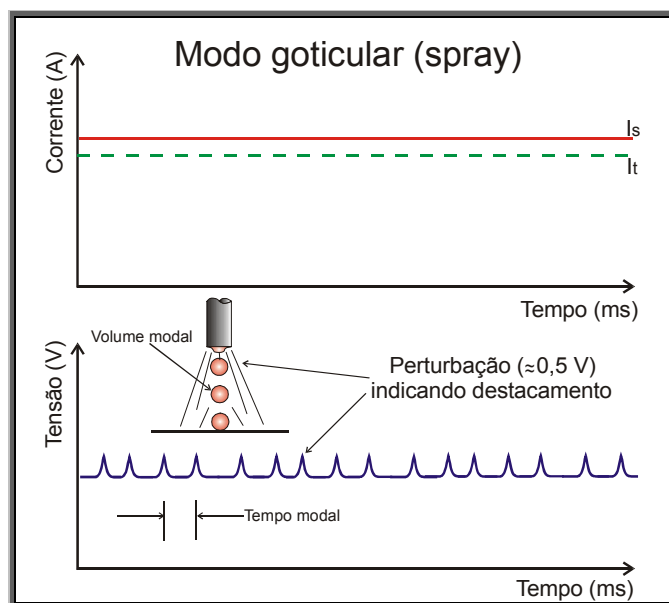


Figura 2.15 – Representação dos oscilogramas mostrando as características do processo de destacamento.

- f) O valor de **a** é obtido pela inversão dos eixos I_p e t_p e pela logaritmização da curva obtida dos vários pares de I_p e t_p , na condição de uma gota por pulso, vide figura 2.16(a).

Tempo e volume modal

Outra maneira experimental de se encontrar o valor de **D** é através dos valores dos tempos modais (T_m) e volumes modais (V_m), vide figura 2.16. Para um valor de v_a , através do oscilograma de tensão, verifica-se qual o tempo que mais se repete entre os picos (**ripples**), isto é, plota-se um histograma do tempo de destacamento e suas freqüências de aparecimento. O valor que mais se repetir será considerado com o valor de T_m , figura 2.16(b). Supondo-se o valor do período

de pulsação (T) seja igual ao T_m na equação 2.18, obtem-se o valor de V_m . Deve-se observar qual o valor de T_m e a corrente de soldagem com os quais se determina um valor V_m correspondente aquele de uma gota esférica com um diâmetro equivalente ao do eletrodo (condição exigida para o modo pulsado).

Com o valor da corrente e do tempo modal que satisfaçam a condição, acima citada, chega-se ao valor de D (o valor de a segue a metodologia anteriormente descrita).

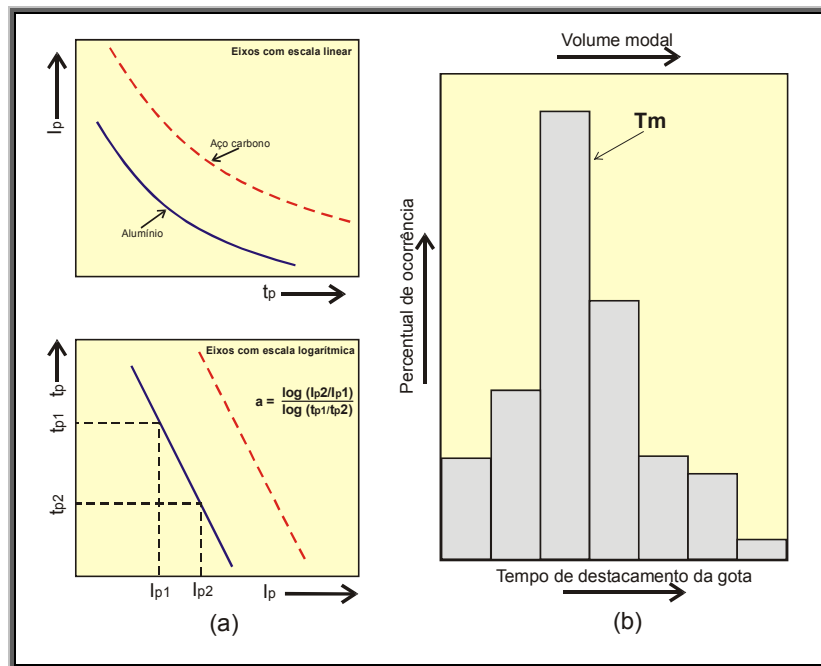


Figura 2.16 – (a) procedimento para a determinação de a e (b) Histograma mostrando a distribuição dos tempos de destacamento.

3ª Manutenção do arco na fase de base

Como a corrente de base e o tempo de base apresentam pouca influência sobre o destacamento da gota há, nesta fase, a preocupação de que estes apresentem valores que garantam a manutenção do arco elétrico entre pulsos sucessivos e, ao mesmo tempo, o aquecimento resistivo do eletrodo e a limpeza catódica.

Alguns autores (Amim, 1983; Nixon et al, 1988; Wainer, 1992) sugerem os seguintes limites:

$$I_b \geq 20^{(*)} \text{ a } 25 \text{ A}$$

(*) Experimentos realizados no LABSOLDA/UFSC demonstram a possibilidade de utilizar corrente de base na ordem de 15 A.

$$t_b < 30 \text{ ms}$$

É necessário todo o cuidado na utilização de frequências de pulsação menores que 20 – 30 Hz, que correspondem a valores altos de t_b , já que nesta faixa ocorrerá intermitência do arco fatigante para o soldador e podendo, com isso, provocar uma reação epilética no operário.

b.2.2) Efeito dos parâmetros de pulsação sobre a estabilidade do arco elétrico

Para um melhor entendimento do comportamento do arco elétrico sob o efeito da variação de um ou mais dos parâmetros envolvidos na soldagem em corrente pulsada, é necessário que se faça a seguinte consideração:

Influências de I_p , t_p , I_b e t_b

Há uma certa contradição quanto ao papel de I_b e t_b sobre o destacamento da gota. Por exemplo, Subramaniam (1996) coloca em xeque o papel de I_p e t_p como os únicos responsáveis no processo de destacamento da gota, ou seja, não é possível atingir a **UGPP** ajustando-se apenas os parâmetros de pulso. Esta consideração do autor é verificada experimentalmente, em parte, quando há uma variação considerável na projeção do arame (ℓ), para materiais com alta resistividade (efeito Joule), e a manutenção nos valores de I_p e t_p ; nesta condição poderá ocorrer o destacamento de mais de uma gota por pulso (como será discutido com mais detalhe no *capítulo V*).

Scotti (1991) cita que, para uma determinada corrente média, o máximo consumo do eletrodo é atingido para a condição $t_p = t_b$, isto é, para a fração de duração do pico “x” igual a 0,5. Rajasekaren et al (1998) descrevem que a melhor condição de uniformidade no comprimento do arco (ℓ_0) e de destacamento é obtida para I_p alto e t_p baixo, com gota destacada na base.

Street (1990) descreve que o efeito de t_p sobre a penetração é significativo. Valores pequenos de t_p produzem cordões com baixa penetração e para valores

elevados de t_p o cordão apresenta penetração elevada. Além disso, há uma proporcionalidade entre o valor de t_p e o nível de ozônio gerado.

Kim and Eagar (1993), relatam que o incremento no valor de I_p acarreta um aumento na região “ótima” de **UGPP** (vide novamente a figura 2.11). No mesmo trabalho, os autores mostram que se o fator de trabalho ($F_T = x.100\%$) aumenta, haverá também uma expansão em **UGPP** (diminuição do V_g) devido à formação de um cone na ponta do eletrodo (elongação da interface gota/arame). Subramaniam (1996), descreve que um aumento no fator de trabalho tende a aumentar a largura do cordão, que I_p e t_p têm maior influência no destacamento em altas frequências de pulsação (400 Hz) e que I_b e t_b influem no destacamento quando soldando em baixas frequências (150 a 225 Hz).



Outros fatores influentes na pulsação

Matsuda et al (1983) propõem a utilização do modo pulsado, empregando CO₂ puro, como forma de controlar o nível de energia imposta no momento do curto-circuito e, por consequência, a redução no nível de salpicos. Contudo, o fato da utilização de CO₂ puro como gás de proteção irá comprometer as condições ou premissas necessárias à estabilidade no modo pulsado, ou seja:

- ❑ Será preciso o emprego de fonte de soldagem com elevada corrente de saída, para que se possa sobrepor a nova corrente de transição gerada;
- ❑ Em função do curto-circuito, haverá extinção do arco na fase de pulso;
- ❑ Não haverá projeção de uma gota por pulso e com diâmetro aproximado ao de eletrodo.

Por este enfoque, a forma de imposição de corrente empregada não necessariamente caracteriza o modo transferência pulsado como se convencionou para o processo MIG/MAG (um goticular controlado na condição **UGPP**) e, portanto, o mais coerente é dizer que se trata do *modo pulsado* para controle do nível de energia durante o curto-circuito. Atualmente, pesquisa neste campo está sendo realizada no LABSOLDA/UFSC com o intuito de determinar a melhor forma de onda de corrente a ser utilizada, levando em consideração os aspectos de estabilidade do processo, assim como a possibilidade de se controlar também a tensão.

Outro ponto importante é que a forma como a fonte de soldagem responde (dinâmica ou taxa de resposta – di/dt) a uma mudança no sinal de saída (variações na corrente imposta durante o processo de pulsação, por exemplo) será um importante diferencial entre um processo de soldagem estável ou não. Com o avanço da eletrônica e da informática foi possível agregar componentes eletrônicos do estado sólido e **softwares** que viabilizam um controle mais apurado sobre a resposta da fonte, quando submetida a uma mudança repentina do sinal. Este avanço pode ser observado no salto tecnológico obtido nestes últimos anos com respeito à forma de controle da onda de corrente (Yamamoto, 1998).

Ainda com relação à taxa de resposta da fonte (di/dt), pode se dizer que a mesma apresenta influência sobre a forma de onda (real) e, conseqüentemente, sobre a taxa de fusão do eletrodo e a estabilidade do arco. Não adiantaria de nada a implementação de um sistema de controle eletrônico com resposta, na comutação di/dt , na ordem de microssegundo (μs), se a resposta do sistema de potência estiver muito aquém do solicitado para o processo (na ordem de milissegundo - algo em torno de 600 A/ms, por exemplo). Este efeito pode ser pronunciado se o valor da corrente de pulso (I_p) for muito alto e o seu tempo de duração (t_p) relativamente curto.

Vilarinho (2000) comenta que a forma final da onda, apresentada por uma determinada fonte de soldagem, poderá variar em função da dinâmica de resposta disponibilizada pelo equipamento (veja figura 2.17).

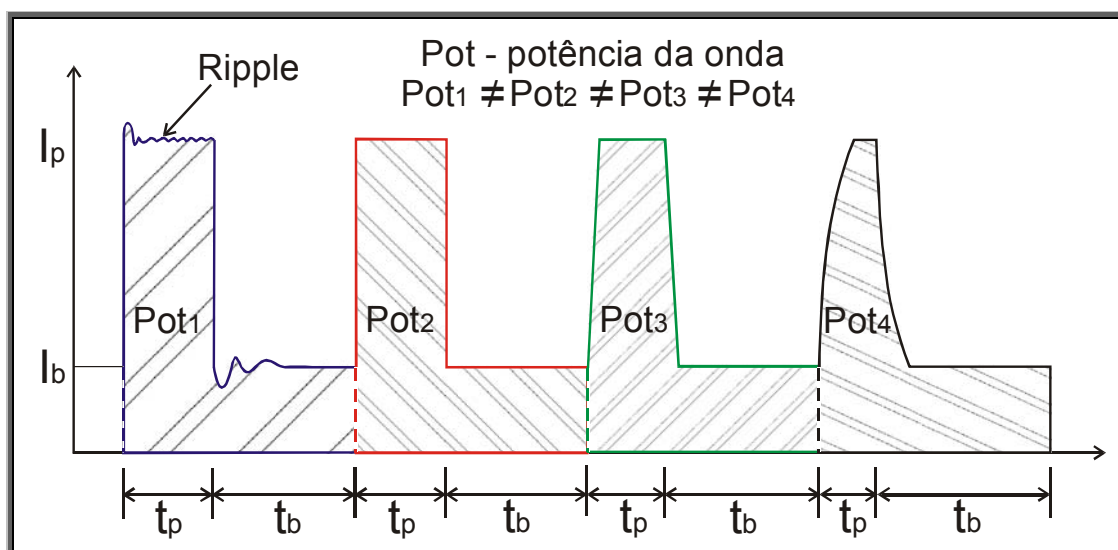


Figura 2.17 – Representação esquemática das possíveis formas de ondas (taxa de resposta di/dt) impostas por diferentes equipamentos (Vilarinho, 2000).

O formato da onda de corrente, disponibilizado pelo equipamento, deverá ser levado em consideração quando for executado o cálculo dos parâmetros de pulsação. Basicamente, as formas de onda podem ser representadas por três diferentes categorias, isto é, ondas retangulares, trapezoidais e exponenciais. Em face da dinâmica da fonte as ondas trapezoidais são as que melhor representam o processo de pulsação (Richardson, 1994).

Farson et al (1998) e Santos (2000) relatam que o processo de abertura do arco elétrico, principalmente na soldagem do alumínio em corrente pulsada, é um fator crítico. A geometria da ponta do arame é colocada como um fator determinante nas condições de abertura do arco, onde se verificou que uma ponta arredondada propiciou a pior condição (maior área de contato com o metal de base). Além disso, também a altura do arco, após o processo de abertura, é influenciada pela geometria da ponta. Ponta com um ângulo definido (apontada) facilita a abertura e ainda permite que o arco cresça a partir deste ponto.

Farson et al (1998), Alcan (1993) e Santos (2000), apresentam o nível de corrente e a velocidade de aproximação do eletrodo como sendo outros fatores que influenciam na abertura do arco, podendo ocasionar a fragmentação do arame (fusão do arame no ponto médio da projeção), figura 2.18. Uma solução para este problema seria a implementação do controle destas variáveis, em níveis aceitáveis, até o perfeito estabelecimento do arco.

Richardson et al (1994), estudando o efeito da dinâmica da fonte (velocidade de subida da corrente) sobre a taxa de fusão na soldagem pulsada, concluem que para fontes com velocidades de resposta mais rápidas o tamanho da gota transferida é menor em face do choque físico gerado por di/dt na coluna do arco.

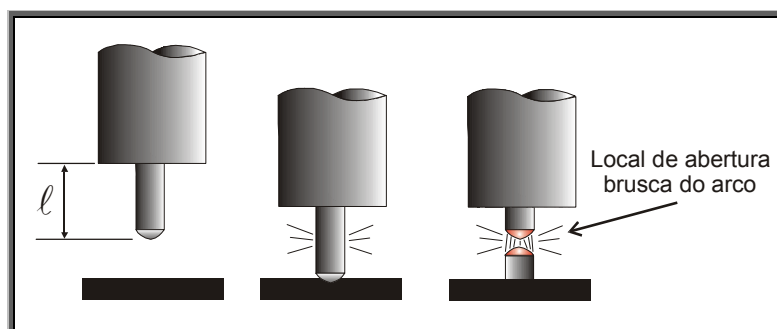


Figura 2.18 – Fragmentação do eletrodo durante a abertura do arco, decorrente da imposição de um nível alto de I e da v_a (abertura na região intermediária de l). Adaptado de Santos (2000).

Heald et al (1994), avaliaram o efeito que o valor da distância entre o bico de contato e a poça de fusão (**DCP**) pode acarretar sobre a taxa de fusão, em face da variação no valor de ℓ (efeito Joule). O trabalho conclui que o aumento na projeção do arame, por um lado, provoca um aquecimento no eletrodo e, por outro lado, uma redução na corrente do circuito, com influência significativa na redução da potência.

Yamamoto et al (1998) relatam que na soldagem do alumínio não é possível estabelecer uma relação entre o comprimento do arco (ℓ_0) e a tensão de soldagem (U_s); este fato é devido a condição superficial da chapa, aporte de calor e gás de proteção. Os autores sugerem que o ajuste de U_s seja feito sempre que for evidente uma alteração no valor de ℓ_0 , através de controle **fuzzy**.

b.2.3) MIG/MAG Térmico (MIG/MAG com pulsação térmica, Interpulse, MIG/MAG duplamente pulsado ou Thermal pulsing)

A origem do processo *MIG/MAG Térmico* apresenta duas referências básicas, ou seja, a primeira citação do desenvolvimento se deve a Street (1978/1990), com origem na Inglaterra e, a segunda citação, bem como o desenvolvimento em termos de Brasil, deve-se a Dutra et al (1995).

Neste ponto é importante salientar que esta nova variante do processo de soldagem *MIG/MAG* ainda não apresenta um consenso na literatura quanto a um nome (denominação) padrão que a represente. Especificações como *MIG/MAG Térmico*, *MIG/MAG duplamente pulsado*, *MIG/MAG com pulsação térmica*, *MIG/MAG pulsado com pulsação térmica* e *Interpulse* são encontradas como denominação para a variante (Street, 1990; Dutra et al, 1995; Barra et al, 1998/2002; Yamamoto et al, 1998; Silva et al, 2001).

No decorrer desta Tese, a denominação *MIG/MAG Térmico* será adotada como o nome de referência para esta nova variante.

O desenvolvimento do processo de soldagem *MIG/MAG Térmico* objetivou aliar as vantagens da soldagem *MIG/MAG*, em corrente pulsada, com as vantagens do processo *TIG* pulsado (*TIG térmico*). Esta combinação, como apresentada pela figura 2.19, é obtida com a imposição conjunta da modulação nos sinais de corrente média e da velocidade de alimentação do arame em duas fases distintas. A primeira fase, denominada de *pulso térmico (pt)*, é caracterizada

pela presença de valores altos de corrente média (*corrente média no pulso térmico* – $I_{m_{pt}}$) e da velocidade de alimentação do arame (*velocidade de alimentação do arame no pulso térmico* – v_{a-pt}). Complementando o *período térmico* (T_t) vem a fase de *base térmica* (**bt**), que se distingue pela injunção de valores baixos de corrente média (*corrente média na base térmica* – $I_{m_{bt}}$) e da velocidade de alimentação do arame (*velocidade de alimentação do arame na base térmica* – v_{a-bt}).

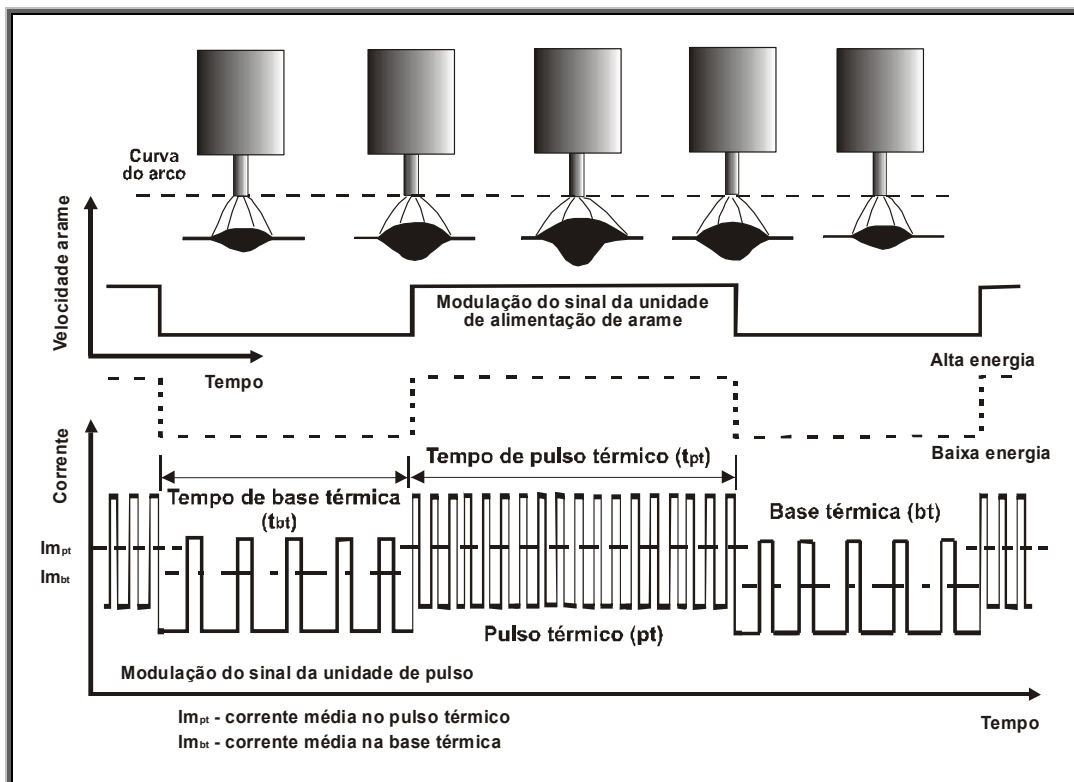


Figura 2.19 – Representação da variante *MIG/MAG Térmico* (Barra, 2002). Observe a modulação conjunta nos sinais de $I_{m_{pt}}$ e v_{a-pt} e de $I_{m_{bt}}$ e v_{a-bt} .

Na figura 2.19 observa-se que o processo de pulsação se dá em duas fases distintas (**pt** e **bt**) e que esta variação dará como resposta diferentes níveis de calor aportado (valores diferentes para I_m) e frequência de destacamento das gotas metálicas.

Como o processo *MIG/MAG Térmico* ainda encontra-se numa fase embrionária, os reais efeitos (vantagens e/ou desvantagens) da sua aplicação sobre as características geométricas e a microestrutura do metal aportado ainda são incipientes.

Em termos de literatura, algumas vantagens, pressupostas ou pretendidas, e limitações citadas na implementação da variante são enumeradas (Street, 1990; Dutra et al, 1995; Barra, 1998).

- Controle sobre o tamanho da poça de fusão, melhoria nas condições de viscosidade e de tensão superficial e no aspecto do perfil do cordão de solda;
- Em função do controle sobre o tempo e o tamanho que a poça venha a apresentar entre as fases de *pulso* e *base térmica*, a variante possibilita atingir condições de soldagem característicos da soldagem em curto-circuito, com boa penetração e redução na espessura da chapa a ser soldada;
- Nível de frequência adequado para ter efeito sobre a poça de fusão (frequência térmica " F_t " na faixa de 0,5 a 10 Hz);
- Nível de frequência, em cada período, adequado para controlar a transferência metálica (frequência de destacamento das gotas no modo *pulsado convencional*);
- Curto espaço de tempo em temperaturas elevadas, em face da modulação de corrente;
- Redução no nível de defeitos como porosidades e mordeduras;
- Formação de pontos de concentração de tensão, para valores baixos de F_t , em decorrência da formação de escamas na superfície do cordão;
- Diferentes níveis de diluição entre as fases de pulso e base térmica.

Barra (1998) cita que as variações conjuntas no aporte de calor e na transferência de massa, decorrente do processo *MIG/MAG Térmico*, são os fatores responsáveis pela mudança cíclica na geometria do depósito, ou seja, a produção de ondulação no perfil de penetração da zona fundida (*efeito serrilhado*) e escamas na superfície do cordão (vide figura 2.20). Silva (2001), estudando os efeitos dos períodos de pulsação térmica sobre a geometria do cordão, também observou a formação externa de escama e a variação no perfil de penetração do cordão, entre as fases de *pulso* e *base térmica*.

Barra (1998) e Bocannera et al (1999), estudando o efeito da *pulsação térmica* sobre a resistência à erosão por cavitação, sob condições específicas da modulação térmica, verificaram que o perfil variado de diluição "efeito serrilhado"

apresenta uma influência significativa sobre a resistência do depósito frente ao processo erosivo, ou seja, a imposição de diferentes níveis de aporte de calor provoca diferença de diluição (composição química) entre as fases de *pulso* e *base térmica*, o que resulta em perda localizada de resistência ao fenômeno (regiões com diferentes graus de resistência ao processo erosivo). É importante salientar que nestes experimentos não houve um estudo sistemático sobre o real efeito na microestrutura do depósito, quando da aplicação conjunta de diferentes aportes de calor e transferência de massa. Os experimentos foram realizados empregando tempos iguais para as fases de *pulso* e *base térmica*.

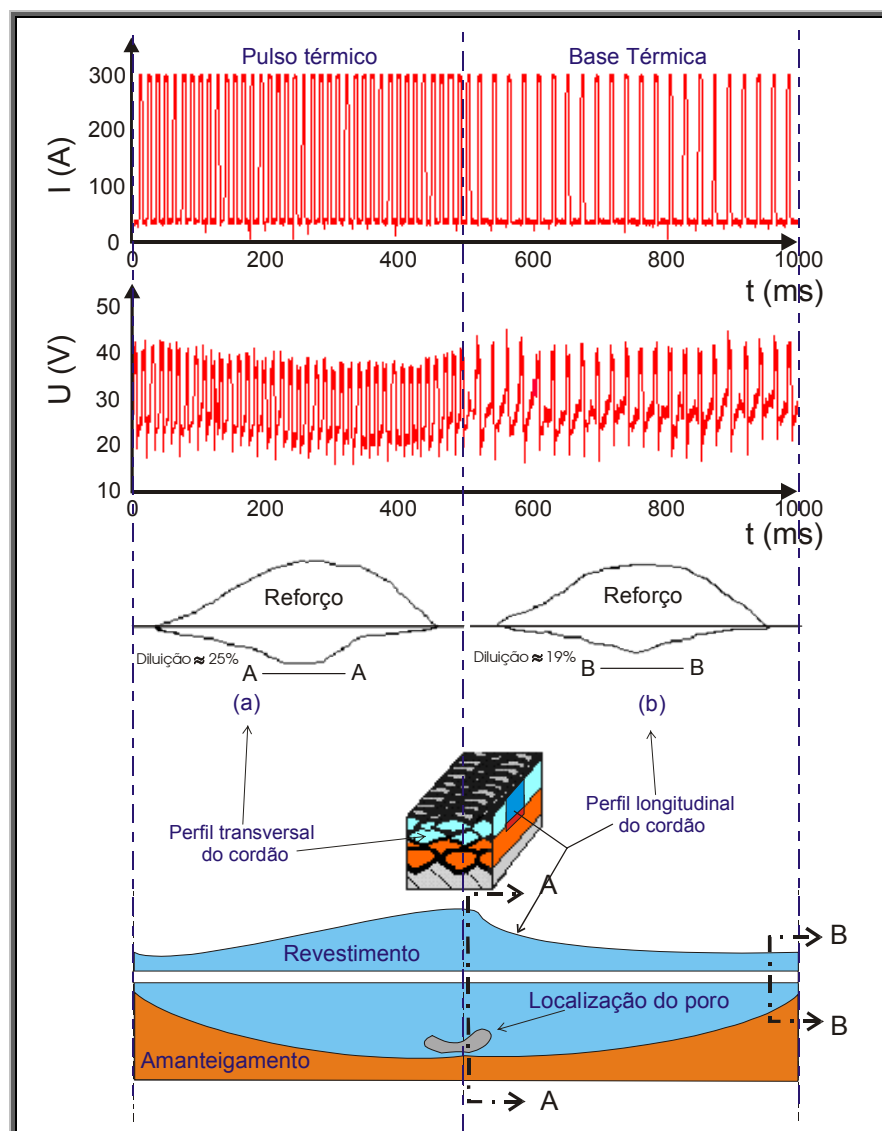


Figura 2.20 – Representação da variação no perfil de penetração e da formação de escamas durante a soldagem com a variante *MIG/MAG Térmico* (Barra, 1998).

Barra (1998), empregando célula de soldagem, avaliou a influência apresentada pela mistura gasosa e pela aplicação de tecimento planar (oscilação da tocha), conjuntamente com a *pulsação térmica*. Nas condições experimentais empregadas, foi observado que o resultado metalúrgico no emprego do processo de *pulsação térmica* é influenciado, tanto pelo tipo de mistura gasosa, quanto pela frequência de oscilação mecânica da tocha.

Outro ponto crítico na utilização da variante *MIG/MAG Térmico* é a dinâmica do sistema de alimentação do arame (motor). Uma vez que, nas fontes eletrônicas a resposta na mudança do sinal de corrente está na ordem de 600 A/ms, é de fundamental importância que a dinâmica de resposta do motor (dv_a/dt) acompanhe esta variação na mesma ordem de grandeza, como forma de garantir a estabilidade do arco elétrico. Uma possível instabilidade se daria na forma de variação no comprimento do arco (ℓ_0), com possíveis instabilidades no processo de transferência metálica (como será discutido detalhadamente no capítulo V).

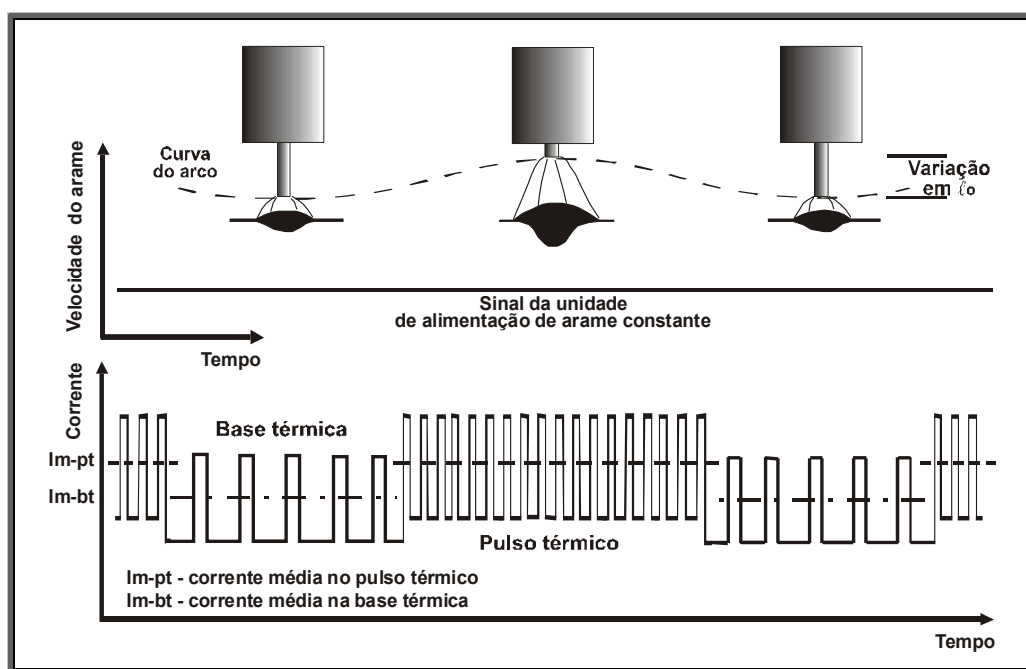


Figura 2.21 – *Pulsação térmica* sem a variação no valor de v_a . Adaptado de Yamamoto et al (1998).

Uma outra variante com princípios similares aos do *MIG/MAG Térmico* é aquela proposta por Yamamoto et al (1998). Neste caso a *pulsação térmica* é realizada sem a mudança na velocidade de alimentação do arame (velocidade fixa) e a forma do cordão é controlada pela mudança cíclica na *freqüência térmica* (0,5 a

25 Hz). Como não há uma mudança na velocidade de alimentação do arame o comprimento do arco fica oscilando ciclicamente entre os períodos de pulsação (vide figura 2.21). Os autores sugerem as seguintes vantagens para esta variante:

- ❑ Consideram que o efeito das “escamas” melhora o aspecto superficial do cordão;
- ❑ Controle na formação do cordão, como no processo *TIG térmico*;
- ❑ Controle sobre a penetração excessiva e a possibilidade de perfuração quando da soldagem em chapas finas (na ordem de 2 mm) e passe de raiz (calor aportado);
- ❑ Controle na geração de porosidades e melhoramentos metalúrgicos quanto à susceptibilidade ao aparecimento de trincas de solidificação.

O que não fica claro no trabalho de Yamamoto et al (1998) é como a estabilidade do arco (manutenção em **UGPP** e a ausência de curto-circuito e/ou queima do bico de contato) é garantida durante o *período térmico*, já que há uma mudança na frequência de pulsação (variação no valor da corrente média I_m), mas a velocidade do arame é mantida constante e qual o valor mínimo da distância entre o bico de contato e a poça de fusão e da relação entre t_{pt} e t_{bt} (como forma de garantir esta oscilação do comprimento do arco ℓ_0).

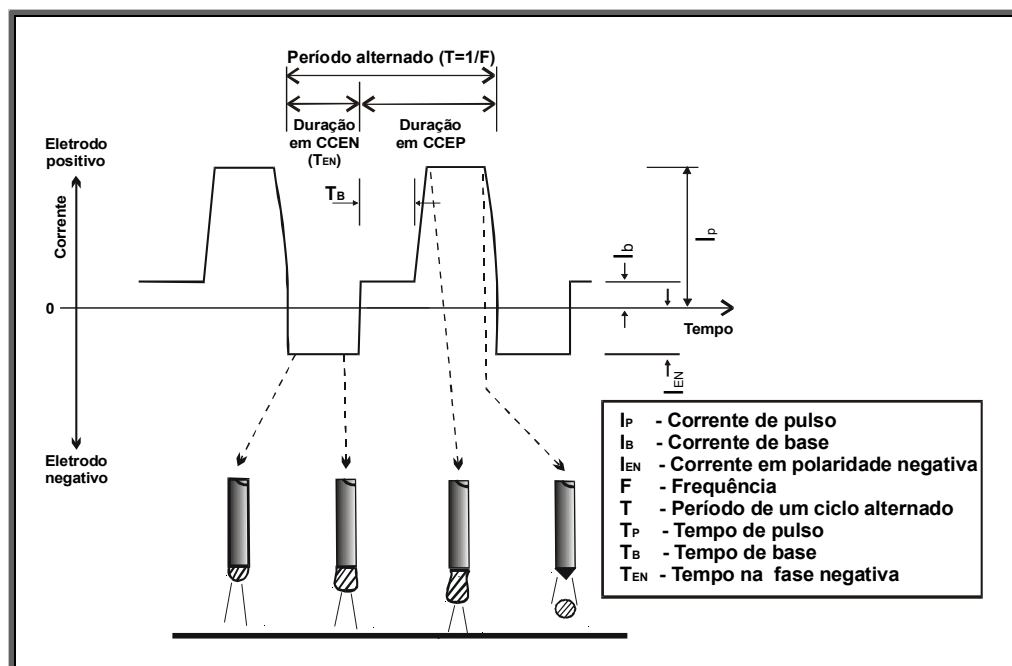


Figura 2.22 – Forma de onda agregando as vantagens da soldagem nas polaridades **CCEP** e **CCEN**. Extraído de Yamamoto (1998).

Outra proposição de Yamamoto et al (1998) é aplicação de corrente pulsada alternada na soldagem *MIG/MAG*. A idéia é agregar as vantagens da soldagem em corrente contínua com eletrodo positivo (**CCEP**), que é a elevada taxa de fusão (modo gótico e alta penetração), com a baixa penetração gerada na soldagem em corrente contínua com eletrodo negativo (**CCEN**), no modo *globular* (vide figura 2.22). Os autores citam que esta variante, denominada de **AC-pulsed welding**, com relação **CCEP** para **CCEN** na ordem de 1:1, quando comparada com o pulso convencional, possibilita um menor aporte de calor e facilita o controle sobre a penetração. O problema desta variante é o fato da mudança de polaridade ocasionar a extinção do arco e, para que isso não venha a acontecer, é necessária a imposição de uma alta tensão, nesta passagem, como forma de garantir a reabertura imediata do arco (na ordem de μs).

2.4 O controle sinérgico

O controle *sinérgico* surgiu na década de 70 (Norrish, 1992) como uma das formas de viabilizar a aplicação comercial do modo pulsado, através da inserção, nos equipamentos de soldagem, de programas (rotinas que traduzam na forma de equações as condições necessárias à estabilidade na transferência metálica - **UGPP**), ou seja, que gerem, em função do material, gás ou taxa de alimentação, por exemplo, os pacotes “ótimos”.

Inicialmente, empregou-se o chamado **single-knob control**, onde por meio de um único controle (botão) tornava-se possível estabelecer os valores dos parâmetros de pulsação (Street, 1990). Contudo, em face às limitações tecnológicas da época e ao número limitado de parâmetros, este tipo de controle não obteve êxito (Norrish, 1992).

O controle sinérgico apresentou-se então como uma forma de possibilitar a adaptação (corrigir o comprimento do arco), em tempo real, podendo ou não ajustar novos pacotes operacionais, e assim compensar possíveis instabilidades na transferência metálica (mudança no valor da distância contato peça, por exemplo). Neste caso encontra-se também a denominação de *sistema adaptativo*.

Os cálculos para a seleção da condição “ótima” obedecem as três premissas básicas já abordadas, ou seja, igualdade entre as taxas de fusão (T_{xf}) e de

alimentação (T_{xa}), apenas uma gota destacada por pulso e com diâmetro aproximado ao do eletrodo e, finalmente, a manutenção do arco na fase de base (veja algoritmo na figura 2.23).

Vilarinho (2000/2001) discute a correta denominação para o modo *sinérgico*, ou seja, o termo correto seria “comando sinérgico” ao invés de “controle sinérgico”. Esta consideração sustenta-se no fato de que o algoritmo computacional, ao mesmo tempo, só calcula os valores, os envia para a fonte (comanda a fonte) e monitora a estabilidade do arco (acompanhamento das variações nos sinais de I_s e U_s , por exemplo), visando uma possível correção.

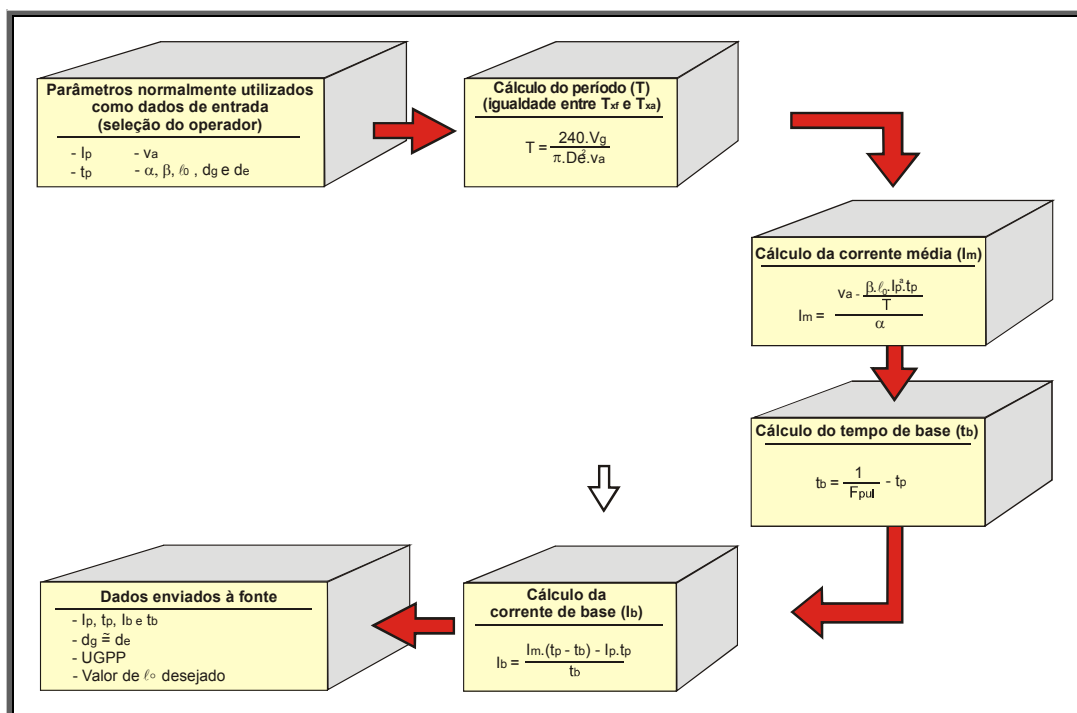


Figura 2.23 - Fluxograma esquemático de um algoritmo sinérgico comercial.
Adaptado de Vilarinho (2000).