

5ª aula – MIG/MAG

Na aula anterior foram demonstrados como funcionam os processos de soldagem a arco elétrico conhecidos MIG/MAG e Eletrodo Revestido. Vamos ver mais detalhadamente o processo conhecido como MIG/MAG.

A denominação **MIG** significa – **Metal Inert Gas**, enquanto **MAG** significa **Metal Active Gas**. É também conhecido como processo **GMAW** – **Gás Metal Arc Welding**, que foi traduzido para o português como processo de soldagem Gás Metal.

A diferença entre os processos MIG e MAG é somente devido ao tipo de gás de proteção utilizado. No processo MIG utiliza-se um gás inerte, que pode ser Ar ou He, que não reagem com os metais presentes no arco elétrico e na poça de fusão. No processo MAG utiliza-se um gás ativo, que contém necessariamente CO₂ ou O₂. Estes gases se decompõem no arco elétrico, gerando reações com os metais ali presentes, por isso são denominados de ativos.

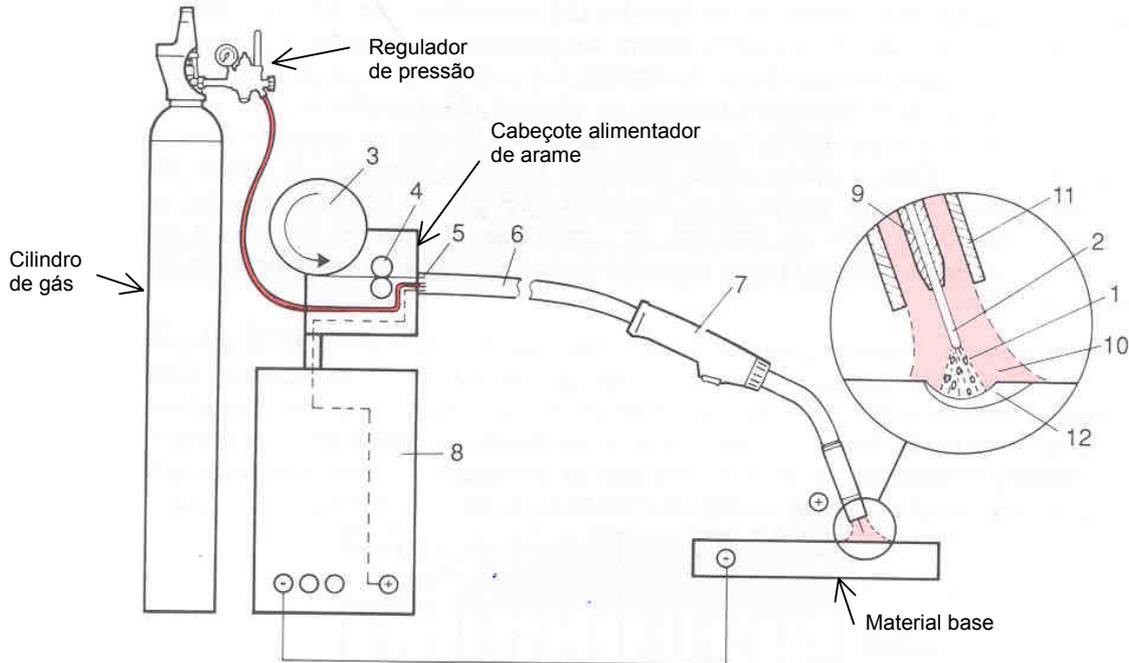
Não existe até hoje uma clara definição quando podemos classificar o processo como MIG ou MAG, sendo esta uma das razões para que até hoje conhecemos o processo como MIG/MAG. Para entender isto, vejamos a tabela abaixo, que mostra os diferentes gases utilizados na soldagem MIG/MAG. Poderíamos classificar de MIG mesmo somente aqueles que utilizassem Ar ou He puros, ou misturas destes. Como MAG, certamente o CO₂ puro ou misturas CO₂-O₂. E para as demais misturas, que contêm grande quantidade de Ar (que na verdade são as mais utilizadas), como ficaria a classificação ?

Tabela 1 – Tipo de gases utilizados na soldagem MIG/MAG e suas aplicações.

Tipo de gás	Comportamento químico	Tipo de material aplicável
Ar puro, misturas Ar-He	Inerte	Al, ligas de Mg, metais reativos – Ti, Zr, Ta
Ar + (1 a 2%) O ₂	Levemente oxidante	Aço ligado e Aço inoxidável
Ar + (3 a 5%) O ₂	Oxidante	Aço carbono e alguns aços baixa liga
CO ₂ puro	Oxidante	Aço carbono e alguns aços baixa liga
Ar + (20 a 50%)	Oxidante	Aço carbono
Ar + 10%CO ₂ + 5%O ₂	Oxidante	Aço carbono (Europa)
CO ₂ + 20%O ₂	Oxidante	Aço carbono (Japão)

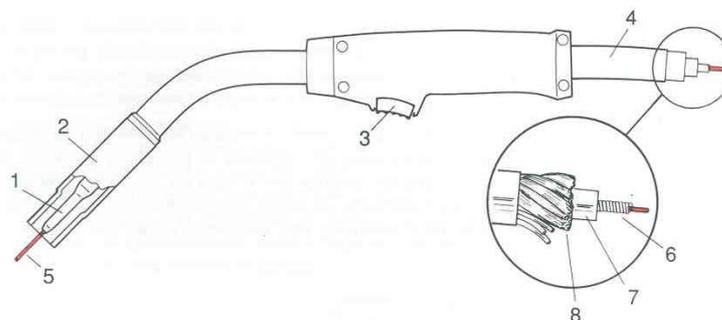
Na verdade não existe hoje até classificação aceita por todos. Alguns definem como MAG todo processo que contenha um gás ativo, mesmo que em percentuais baixos. Outros classificam como MAG apenas quando o gás contém um mínimo de 20% de CO₂, pois entendem que abaixo deste valor o gás comporta de forma semelhante a um gás inerte, podendo-se portanto considerá-lo como MIG. Assim sendo, é mais conveniente definir o processo como MIG/MAG.

O processo MIG/MAG convencional utiliza-se de uma fonte de tensão constante, conforme visto na aula anterior. O esquema geral do equipamento pode ser visto na figura 1, e na figura 2 temos a representação da pistola e de seus componentes. Além da fonte de soldagem temos o cabeçote alimentador do arame, que empurra o arame em direção a peça a ser soldada. O pólo positivo é interligado ao bico de contato através da pistola, que recebe também o gás de proteção.



1 – Arco elétrico; 2 – Arame consumível; 3 – Bobina ou carretel de arame; 4 – Roletes de tração; 5 – Conduíte flexível; 6 – Pacote de Mangueiras; 7 – Pistola ou tocha de soldagem; 8 – Fonte de energia, máquina de solda; 9- Bico de contato; 10 – Gás de proteção; 11 – Bocal; 12 – Poça de fusão

Figura 1 : Esquema geral do processo de soldagem MIG/MAG.



1 – Bico de contato; 2 – Bocal; 3 – Gatilho; 4 – Pacote de mangueiras; 5 – Arame consumível; 6 – Conduíte flexível; 7 – Mangueira do gás de proteção; 8 Cabo de força

Figura 2 : Detalhe da pistola ou tocha de soldagem do processo MIG/MAG.

Este processo caracteriza-se por :

- ter uma alimentação contínua de um arame, que é consumido ao chegar no arco elétrico;
- a fonte é de tensão constante, ou seja, a variação da tensão é pequena, mesmo quando existe variação da corrente;
- a velocidade do arame e a tensão regulada na máquina definem a corrente de soldagem;
- a proteção da poça de fusão é feita através de um gás denominado gás de proteção.

Vamos agora entender como funciona o processo MIG/MAG. Considere a ponta da pistola, onde se forma o arco elétrico na ponta do arame. Imagine que esta configuração é estável, onde todo o arame alimentado pelo cabeçote se funde e se transfere para a poça de fusão, conforme representado pela figura 3.

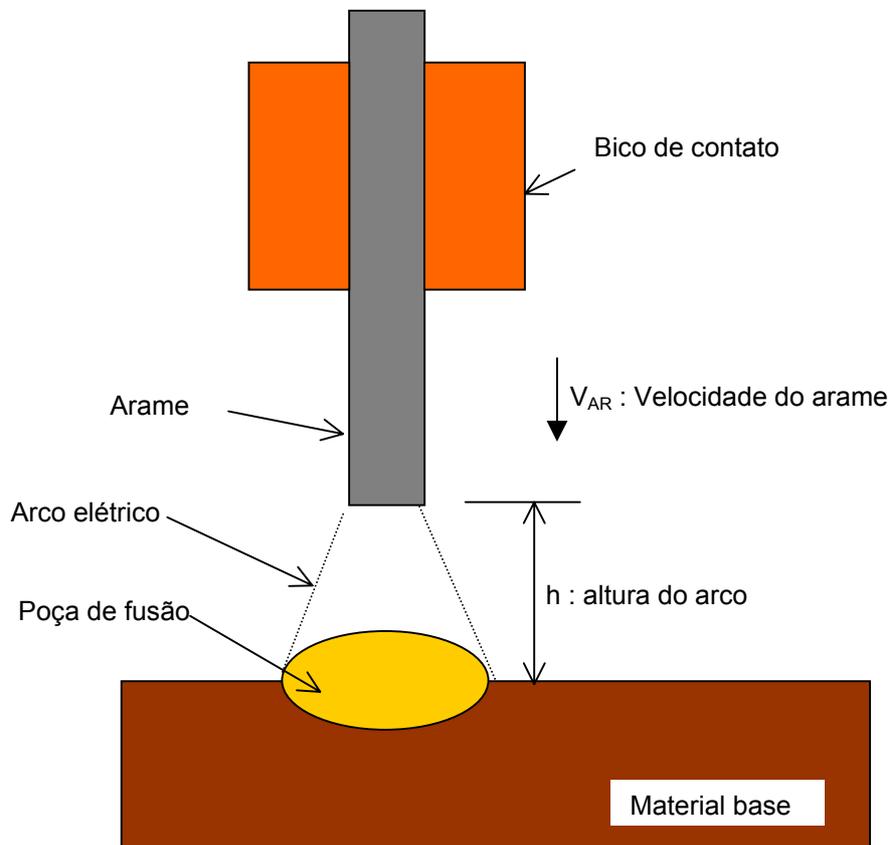


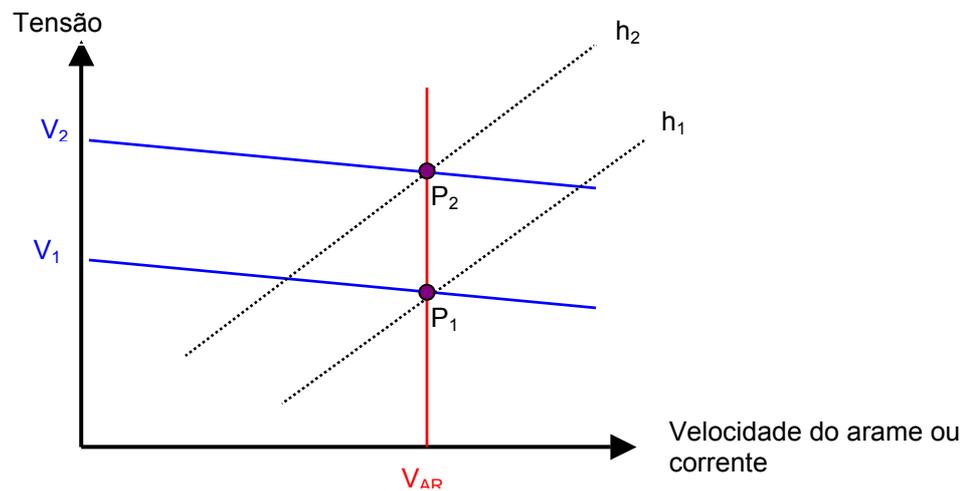
Figura 3 : Representação esquemática da ponta do arame e do arco elétrico.

Para entender o processo MIG/MAG é necessário responder duas perguntas básicas :

- 1) Como a regulagem da máquina afeta a estabilidade deste sistema ?
- 2) Como o material se transfere do arame para a poça de fusão ?

Começamos respondendo a primeira : **Como a regulagem da máquina afeta a estabilidade deste sistema ?** Sabemos que a máquina de solda do processo MIG/MAG é de tensão constante, o que significa dizer que iremos regular a tensão de soldagem. Quando regulamos uma tensão na máquina selecionamos uma curva, dentro das várias possíveis da chamada característica estática da fonte de soldagem (figura 7 da aula anterior). Considerando que o sistema da figura 3 está estável, existe um ponto de funcionamento estabelecido, conforme mostrado na figura 13 da aula anterior. Para facilitar o entendimento, vamos representar num diagrama Tensão (V) x Velocidade do arame (V_{AR}) ou Corrente, o ponto de funcionamento, conforme mostrado na figura 4. O ponto deverá estar localizado no encontro da curva característica estática da fonte selecionada (V_1) com a devida velocidade do arame (V_{AR}), o que ocasiona um arco elétrico de altura h_1 . Denominemos este ponto de P_1 .

Partindo deste ponto de funcionamento estável, ao aumentarmos a tensão da máquina para V_2 e mantendo constante a velocidade do arame, o ponto de funcionamento se desloca para o ponto P_2 . Neste novo ponto de funcionamento, o arco elétrico se altera, tornando-se mais alto, atingindo a altura h_2 .



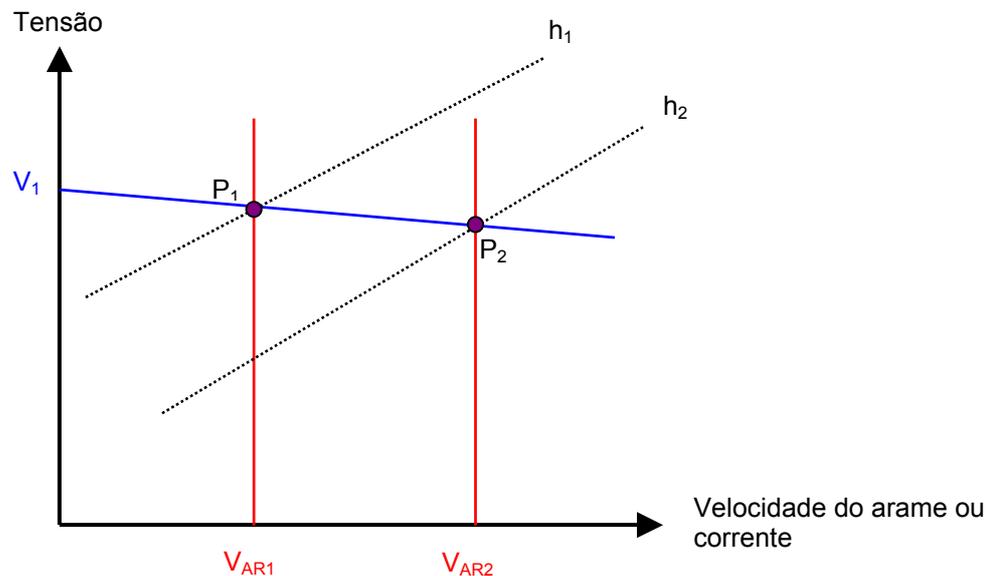
Curvas h_1, h_2 : curvas de altura de arco constante, sendo $h_2 > h_1$
 V_1 e V_2 : tensões reguladas na máquina
 V_{AR} : velocidade do arame

Figura 4 : Representação da variação da altura do arco em função da variação da tensão da máquina.

Ou seja, podemos regular a altura do arco através da tensão de soldagem. Quanto maior a tensão, maior será a altura do arco correspondente.

Pode-se ainda variar a altura do arco trabalhando com a velocidade do arame. Considere como ponto de partida o ponto de funcionamento P_1 obtido pela tensão regulada na máquina V_1 , velocidade do arame de V_{AR1} e conseqüente altura do arco h_1 , mostrado na figura 5. Ao aumentarmos a velocidade do arame para V_{AR2} sem alterar a tensão da máquina, o ponto de funcionamento se desloca para o ponto P_2 .

Neste novo ponto o arco se torna mais curto, pois o aumento da V_{AR} “empurra” o arco para baixo, resultando numa altura de arco h_2 , menor que h_1 . Como conseqüência do encurtamento do arco, a resistência a passagem de corrente se tornará menor, o que ocasiona um aumento da corrente de soldagem. Por isto podemos relacionar o aumento da velocidade do arame com aumento da corrente de soldagem.



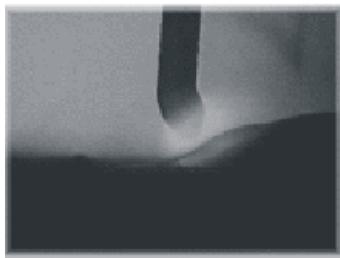
Curvas h_1, h_2 : curvas de altura de arco constante, sendo $h_2 < h_1$
 V_1 e V_2 : tensões reguladas na máquina
 V_{AR} : velocidade do arame

Figura 5 : Representação da variação da altura do arco e da corrente de soldagem em função da variação da velocidade do arame.

Conclui-se, portanto, que trabalhando-se com a regulagem da tensão da máquina e da velocidade do arame, podemos controlar a altura do arco e a corrente de soldagem!!!

Precisamos agora responder a segunda pergunta : **Como o material se transfere do arame para a poça de fusão ?**

Para entendermos isto precisamos estudar os chamados **MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA**. Já sabemos que regulando a tensão da máquina e velocidade do arame podemos controlar a altura do arco e a corrente de soldagem. Vamos inicialmente trabalhar com tensões baixas, forçando um arco curto. Nesta configuração, a gota que se forma na ponta do arame toca a poça de fusão, ocasionando um curto-circuito. Isto pode ser visto na seqüência de fotos na figura 6. A cada vez que ocorre um curto-circuito, uma gota se transfere para a poça de fusão, o arco se extingue enquanto durar o curto-circuito, voltando a se acender após a transferência da gota. Este ciclo, que envolve a formação da gota, o curto-circuito, o reacendimento do arco e a formação de uma nova gota – acarreta um som intermitente, que podemos perceber facilmente. A freqüência dependerá da velocidade do arame. Quanto maior a velocidade do arame maior a freqüência pois forçamos a gota a se formar e ser transferida numa freqüência maior. Este modo de transferência metálica é denominada de **CURTO-CIRCUITO**.



Formação da gota

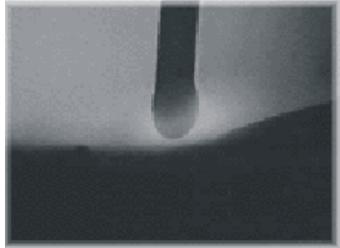
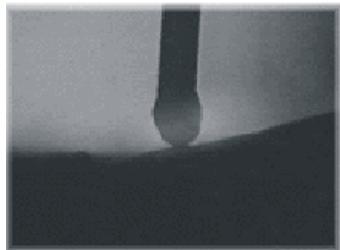
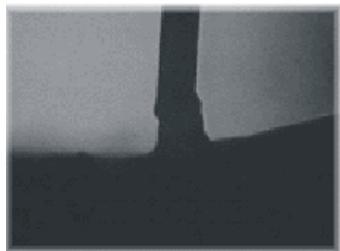


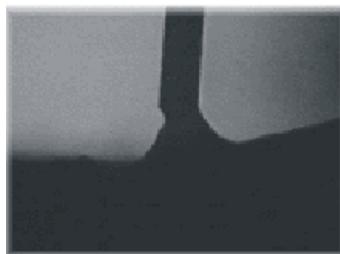
Figura 6 : Seqüência de fotos em transferência por curto-circuito.



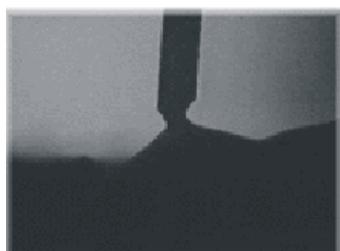
Momento do curto-circuito / extinção do arco
Tensão cai ao valor mínimo e corrente se eleva ao valor máximo devido a resistência do arco ser nula



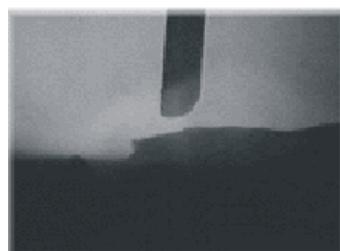
Transferência por tensão superficial



Formação de pescoço – densidade de corrente no pescoço acentua Efeito Pinch – possibilidade de formação de respingos



Reabertura do arco. Tensão se eleva subitamente pois o arco se torna alto novamente. Começa formação de nova gota



Analisando a seqüência de fotos mostrados na figura 6, como ficaria a variação do par tensão e corrente ao longo do tempo ? Façamos uma análise quadro a quadro, a partir do momento em que o arco reabriu e se iniciou a formação da gota. Neste momento, a tensão alcança seu valor máximo, pois o arco também está na sua maior altura. A medida que a gota cresce, a altura do arco vai diminuindo, provocando uma redução gradativa na tensão. Quando a gota encosta na poça de fusão, a tensão cai instantaneamente, pois o arco deixa de existir. Neste exato momento a corrente sobe abruptamente, pois a extinção do arco faz com que a resistência a passagem de corrente seja minimizada. Quando a gota termina de se transferir, a tensão volta a subir ao seu valor máximo devido a nova abertura ocasionar um arco de altura máxima e a corrente cai a seu valor mínimo pois o arco passa a apresentar a maior resistência à passagem da corrente. Um oscilograma real é mostrado na figura 7, com as fotos da figura 6 indicadas no momento em que as mesmas ocorrem.

Suponha agora que você tenha regulado a tensão e a corrente da máquina e conseguido obter uma transferência por curto-circuito. O que ocorreria se você mexesse na regulagem, alterando a velocidade do arame ou a tensão da máquina. Vamos analisar separadamente.

1ª condição) Soldando em curto-circuito, você manteve a velocidade do arame e alterou somente a tensão da máquina. Neste caso, há duas possibilidades : **A)** um aumento da tensão da máquina faz o arco ficar mais longo. Caso o aumento de tensão seja significativo, a gota formada na ponta do arame não consegue tocar na poça de fusão e o modo de transferência deixa de ser por curto-circuito. A gota que se forma na ponta do arame é bem maior que o diâmetro do arame, e por estar longe da poça de fusão, se desprenderá quando seu peso for suficiente para destaca-la da tensão superficial que a segura presa. Neste caso denominamos o modo de transferência de **GLOBULAR**, que pode ser vista na figura 8. **B)** uma redução da tensão forçaria um arco menor ainda, que caso seja curto demais, o arame não chega a fundir, ocasionando a batida do arame no material base.

2ª condição) Soldando em curto-circuito, você manteve a tensão da máquina e alterou a velocidade do arame. Aqui também há duas possibilidades : **A)** um aumento da velocidade do arame provoca aumento da freqüência de curto-circuito. Caso o aumento desta velocidade seja excessivo, o arame não consegue se fundir totalmente e ele baterá no material base. **B)** uma redução na velocidade do arame forçará um aumento do comprimento do arco, podendo este atingir o bico de contato e fundi-lo.

Conclui-se desta análise que para obter uma condição estável de soldagem em curto-circuito, é necessário um casamento entre a tensão regulada na máquina e a velocidade do arame. De maneira simplista, quanto maior a tensão da máquina, maior deverá ser a velocidade do arame para manter o arco curto suficiente que acarrete o curto-circuito. Para evitar o batida do arame no metal base ou a fusão do bico de contato estabelece-se para cada tensão uma certa faixa de velocidade do arame recomendada.

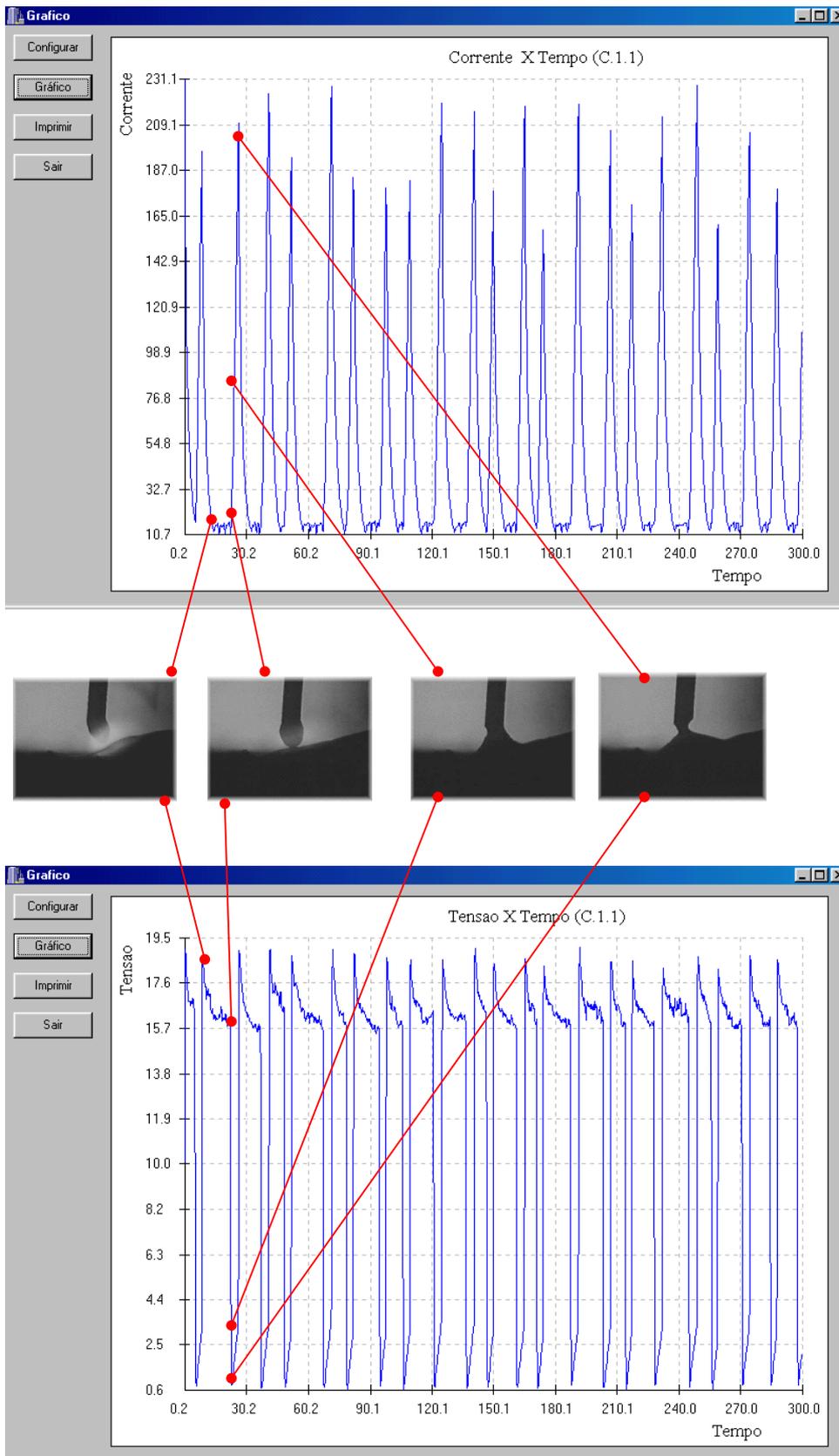


Figura 7 : Oscilogramas tensão x tempo e corrente x tempo no modo de transferência por curto circuito.

A regulagem da máquina no processo MIG/MAG tem 3 variáveis : **tensão, velocidade do arame e indutância**. Já analisamos o que ocorre quando variamos a tensão e a velocidade do arame. E para que serve a indutância ? Para entender sua influência é necessário conhecer as forças que atuam sobre a gota (região do arco elétrico), mostradas na figura 8. Ao todo são 5 forças, abaixo descritas :

- **tensão superficial (oberflächenspannung)** : atua na superfície da gota, sendo responsável por segurar a gota presa à ponta do arame;
- **peso da gota (Schwerkraft)** : depende da posição de soldagem;
- **força eletromagnética (Pinch-Kraft ou elektromagnetische Kraft) - FE** : representa uma força de origem eletromagnética, gerada pela condução de corrente de condutores paralelos na mesma direção. Quando temos diversos condutores com condução elétrica na mesma direção, o campo magnético se soma e causa uma atração entre os condutores, conforme mostrado na figura 9. Este efeito causa o aparecimento de forças no sentido axial, e atuam sobre o arame sólido, sobre o arco elétrico e sobre a gota. Ela é diretamente proporcional ao quadrado da corrente e inversamente proporcional a área por qual passa esta corrente : $FE \propto (I^2 / A)$
- **força de arraste do jato de plasma (Plasmastrahls)**: o formato do plasma implica na movimentação de gases em direção ao material base. Este gás arrasta a gota em direção à poça de fusão;
- **força devido a formação da vapores metálicos (Dampfdruckes)** do arame e do metal base, que tendem a empurrar a gota para cima.

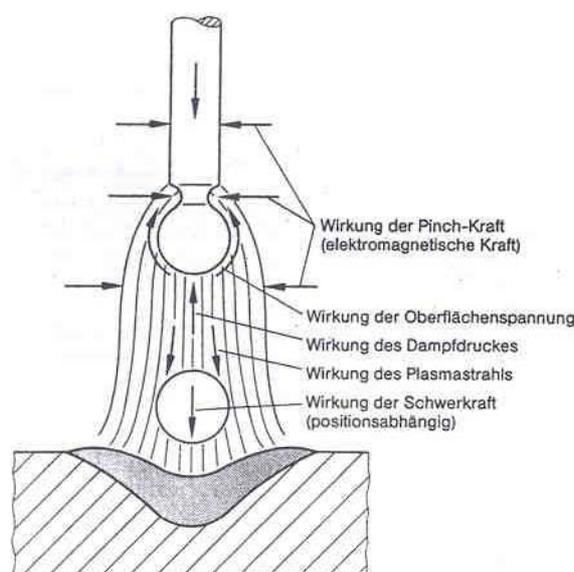


Figura 8 : Representação esquemática das forças que atuam sobre a região do arco elétrico (Transferência globular).

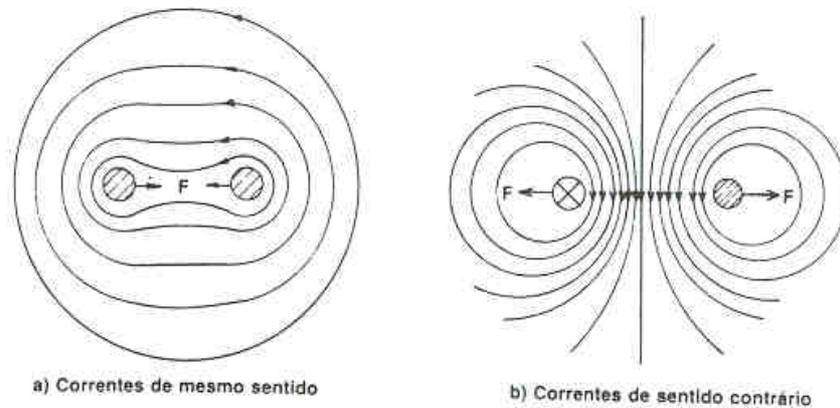


Figura 9 : Representação, através de linhas de força, da composição de campos magnéticos entre dois condutores energizados (Quites e Dutra, 1979).

Entre as diferentes forças que atuam sobre a gota, a força eletromagnética é uma das mais importantes. Se analisarmos o curto-circuito no momento em que a gota está para se desprender do arame (penúltimo quadro da figura 6), nota-se que a corrente é muito alta (devido ao curto-circuito) e a área pela qual ela passa é muito baixa. Neste momento a força eletromagnética é muito alta, e ela se manifesta através de um rápido estrangulamento da gota. Este efeito é conhecido como efeito **PINCH**. Quanto maior a força eletromagnética, mais rápido será o estrangulamento e isto fará com que a gota seja impulsionada mais rapidamente na direção da poça de fusão, perturbando-a, a ponto de gerar a formação de salpicos, conforme mostrado na figura 10.

Para evitar a formação de salpicos, deve-se evitar que a corrente de curto-circuito seja muito elevada. Para isto serve a indutância. Ele amortece a subida da corrente durante o curto-circuito, evitando valores muito altos de corrente, e desta forma atenua-se a atuação da força eletromagnética e assim reduz-se a quantidade de salpicos. Quanto maior a indutância, maior o efeito de amortecimento.

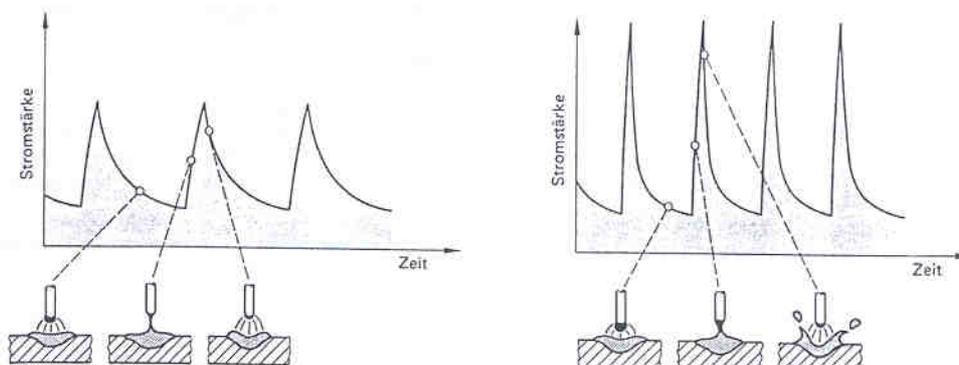


Figura 10 : Representação esquemática da origem dos salpicos.

A força eletromagnética tem ainda papel de destaque a medida que aumentamos a velocidade do arame e a tensão da máquina. Suponha que você tenha regulado a máquina para trabalhar em curto-circuito. Aumentando progressivamente somente a tensão, já verificamos em laboratório que o modo de transferência muda para **GLOBULAR**. No laboratório verificamos que as gotas são grandes, e o arco tende a se apagar quando esta gota se destaca.

O que ocorre se, nesta condição de transferência globular, aumentássemos a velocidade do arame ? Oras, sabemos que iremos aumentar progressivamente a corrente, sem a ocorrência de curto-circuito. Nesta configuração a força eletromagnética atua sobre gota com cada vez mais intensidade (devido ao aumento da corrente), favorecendo a formação de gotas cada vez menores e que são desprendidas cada vez mais rapidamente. Em dada corrente, a gota formada atinge um diâmetro tal que ele se forma dentro do arco e seu desprendimento não causa mais a extinção temporária do arco elétrico. Neste momento alcançamos o modo de transferência conhecido como **PULVERIZAÇÃO** ou **SPRAY** ou **GOTICULAR**. Este modo de transferência é mostrado na figura 11.

Nota-se que a gota formada fica contida dentro do arco elétrico, o que evita a sua interrupção. Observe ainda que a ponta do arame fica afinada. Ocorre que a mesma se encontra parcialmente fundida e, devido a atuação da força eletromagnética ela se deforma adquirindo este formato. Quando a tensão do arco é muito elevada e/ou se trabalha com gás de proteção que possibilita arco longo (por exemplo – Argônio), o arco se sobrepõe a este afinamento, conforme mostrado na figura 12. Para elevadíssimas tensões e correntes, o metal fundido passa a rotacionar em torno do eixo do arame, conforme mostrado na figura 13.

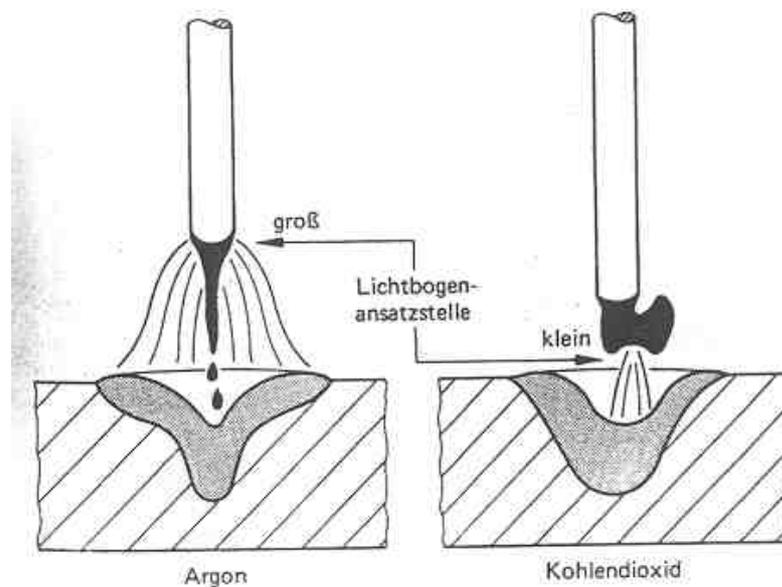


Figura 12 : Transferência metálica por pulverização com ponta do arame inserido no arco para elevada tensão e gás de proteção Ar.

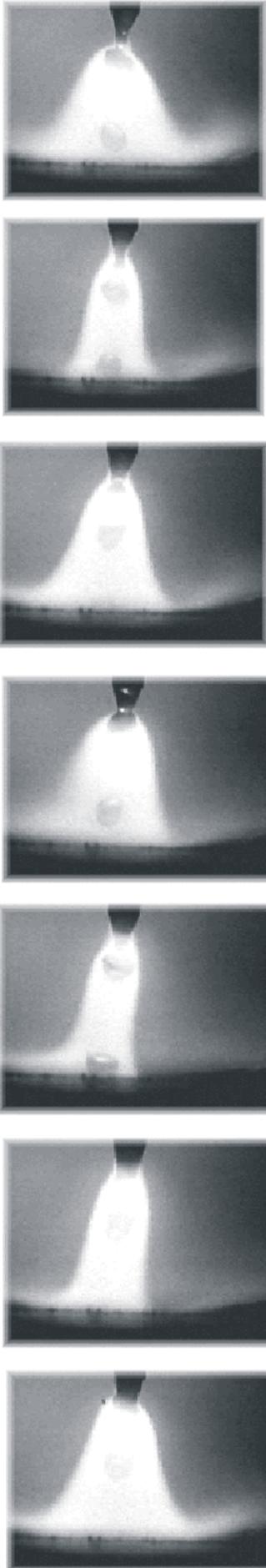


Figura 11 : Seqüência de fotos em transferência por pulverização ou spray ou goticular.

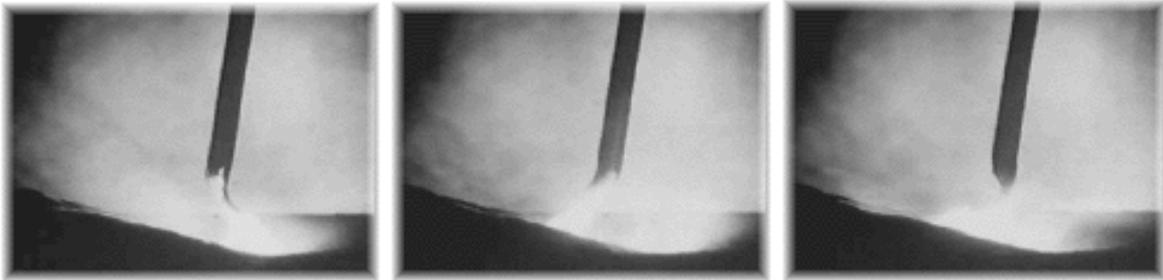


Figura 13 : Sequência de fotos da transferência metálica rotacional.

Para mostrar como ocorre a transição entre a transferência globular e por pulverização, foram realizadas medições de variação do volume e número de gotas formadas num segundo, utilizando-se arame de aço carbono de 1,6mm de diâmetro, gás de proteção Ar-1%O₂. Os resultados são mostrados na figura 14, onde a medida que aumentamos a corrente (corresponde a aumentar a velocidade do arame) o volume das gotas cai, enquanto que o número de gotas formadas aumenta. Em dada corrente o volume das gotas cai abruptamente, ao mesmo tempo de o número sobe bastante. Esta corrente convencionou-se chamar **corrente de transição**, sendo considerada a corrente mínima para obter a transferência por pulverização. A corrente de transição varia com o material, o diâmetro do arame e o gás de proteção. Uma noção de seu valor pode ser vista na tabela 2.

Tabela 2 : Correntes de transição para vários materiais e diâmetros do arame.

Diâmetro do arame (mm)	Corrente de transição (A)		
	Aço carbono (Ar-2%O ₂)	Aço inoxidável (Ar-2%O ₂)	Alumínio (Ar)
0,8	160		90
1,0	185	170	100
1,2	220	225	120
1,6	275	285	170

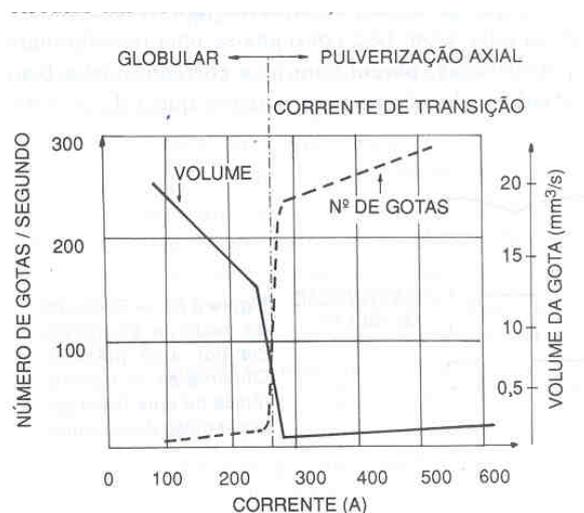


Figura 14 : Variação do volume e número de gotas em função da variação da corrente.

Podemos agora entender o mapa de transferência metálica mostrada na figura 15. Para se obter curto-circuito, é necessário trabalhar em baixas tensões e velocidades do arame. Existe para cada tensão uma certa faixa de velocidade do arame. Na mesma faixa de velocidade de arame, mas com tensões superiores temos a transferência globular. Para obter pulverização, há necessidade de tensões elevadas e uma corrente acima da de transição, que fica definida por uma determinada velocidade do arame mínima.

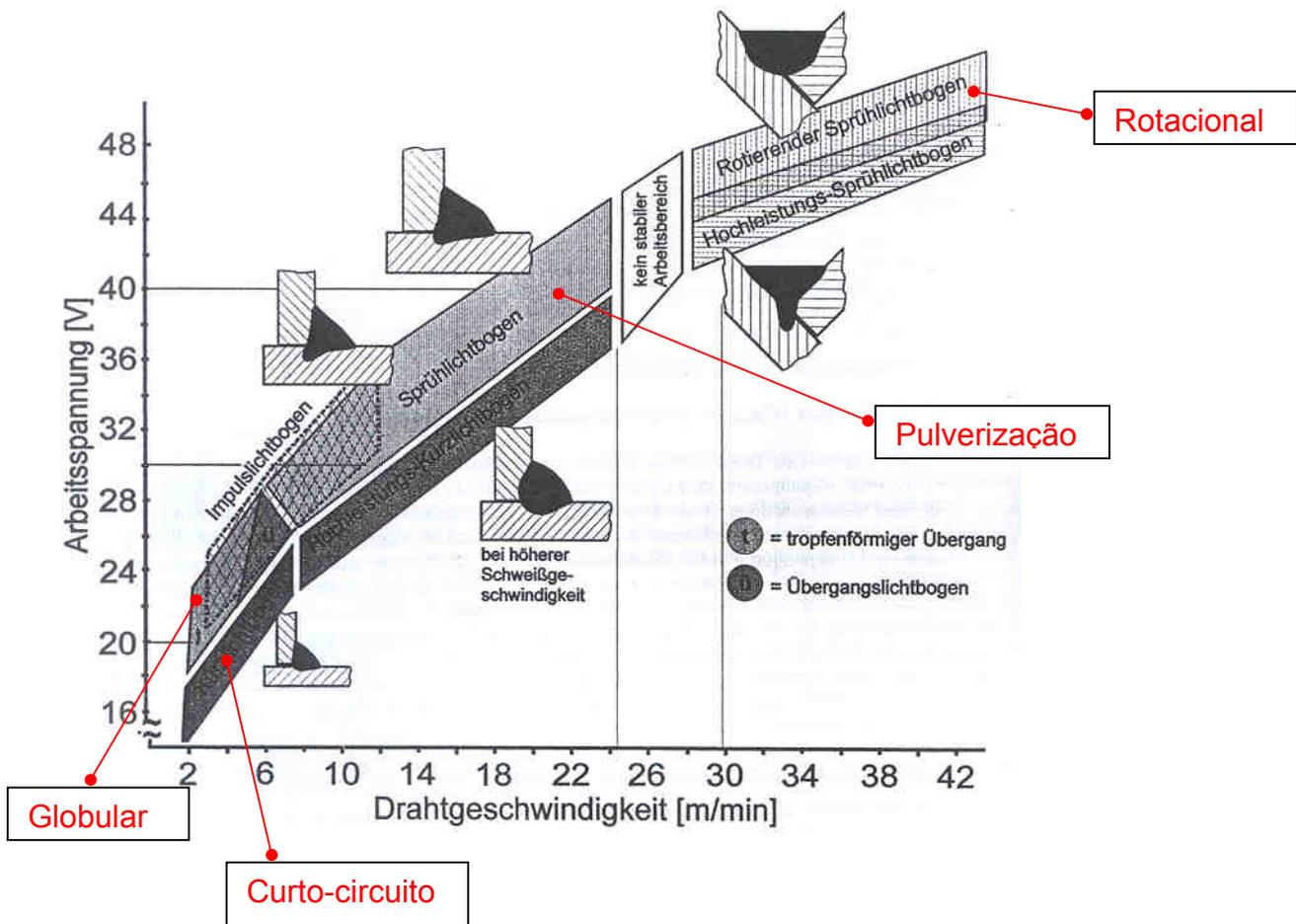


Figura 15 : Mapa de transferência metálica, válida para arame de aço de 1,2mm de diâmetro e gás de proteção Ar-8%CO₂.

Como último comentário, acredito que fique mais fácil entender a figura 16, que comentaremos na sala de aula.

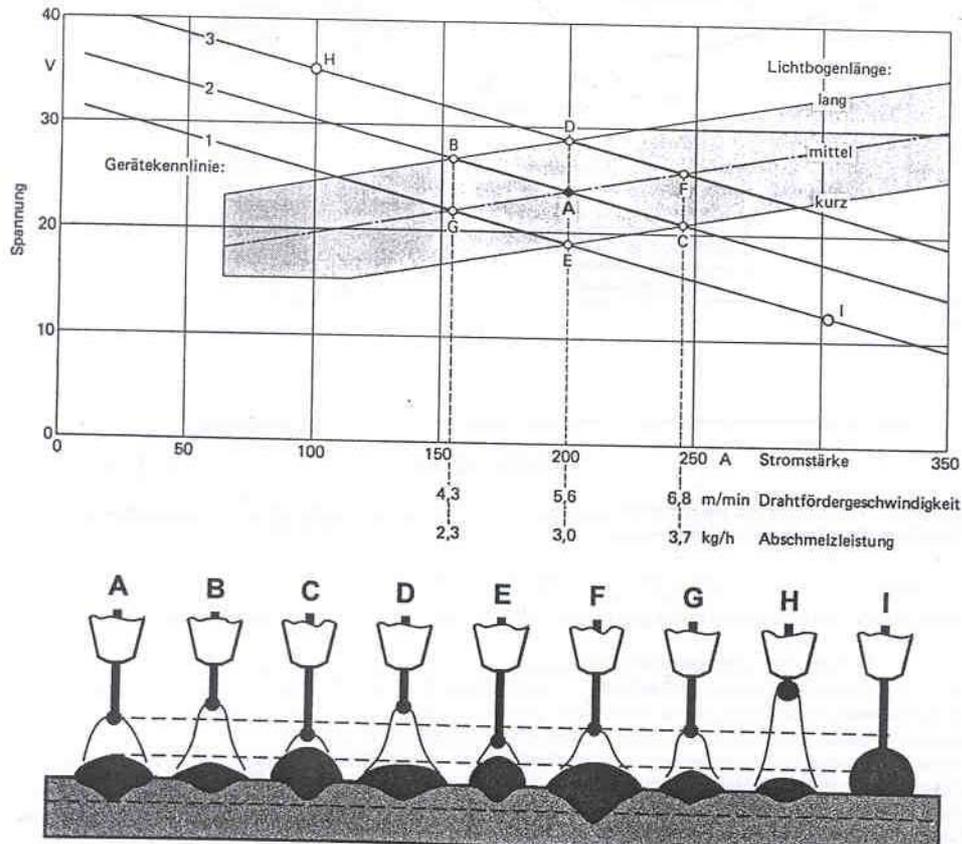


Figura 16 : Influência da tensão de soldagem e velocidade do arame sobre o formato do cordão de solda.