

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Introdução à Física do Arco Elétrico
Soldagem I

Prof. Paulo J. Modenesi

Belo Horizonte, janeiro de 2012

SUMÁRIO

	Página
1. Introdução	01
2. Fontes de Energia para a Soldagem por Fusão	01
3. Descargas Elétricas em Gases	03
4. Características Estáticas do Arco	05
5. Perfil Elétrico	08
6. Região Catódica	09
7. Região Anódica	11
8. Coluna de Plasma	11
9. Uma Síntese: A tensão do Arco	16
10. Transferência de Metal de Adição	18
11. Taxa de Fusão de Arame	27
12. Variáveis da Soldagem a Arco	30
13. Bibliografia	41

LISTA DE SÍMBOLOS E CONSTANTES

(com suas unidades usuais)

A_0	Área de contato (m^2)
B	Campo magnético ($\text{weber}/m^2 = \text{N}/\text{A}\cdot\text{m}$)
e	Carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)
E	Potência gerada no arco (w) Campo elétrico (V/m)
D	Parâmetro de destacamento ($\text{A}^2 \cdot \text{s}$)
f	Taxa de alimentação (m/min)
F	Força (N)
I	Corrente elétrica (A)
J	Densidade de corrente (J/m^2)
k	Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$)
l_a	Comprimento do arco (mm)
m	Inclinação (“slope”) do fonte de energia (V/A) Massa (kg)
m_e	Massa do elétron ($9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$)
P	Pressão (Pa)
P_{eff}	Potência efetiva (w/m^2)
R	Constante dos gases ($8,31 \text{ J}/\text{K mol}$) Raio (m)
t	Tempo (s)
T	Período (s) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
U	Tensão elétrica (V)
U_0	Tensão de vazio da fonte (V)
U_A	Tensão anódica (V)
U_C	Tensão catódica (V)
v	Velocidade (m/s)
V_I	Potencial de ionização (V)
x	Grau de dissociação
w	Taxa de fusão (m/min) Vazão (ml/s)
α	Difusividade térmica (m^2/s) Grau de ionização Constante de fusão de arame (mm/sA)
β	Constante de fusão de arame ($1/\text{sA}^2$)
ϵ_0	Permiabilidade do espaço livre ($8,85 \times 10^{-11} \text{ Farad}/\text{m}$)
ϕ	Função-trabalho (eV)
γ	Energia superficial (J/m^2)
ρ	Resistividade elétrica ($\text{ohm}\cdot\text{m}$) Densidade (kg/m^3 ou g/cm^3)
ρ_e	Densidade de carga (C/m^3)
σ	Condutividade elétrica ($\text{ohm}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)
μ_0	Permeabilidade magnética do ar ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry}/\text{m}$)
ΔG	Energia Livre (J/mol)

Introdução à Física do Arco Elétrico

1. Introdução:

O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, pois apresenta uma combinação ótima de características, incluindo uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores. Como consequência, os processos de soldagem a arco têm uma grande importância industrial na atualidade, sendo utilizados na fabricação dos mais variados componentes e estruturas metálicas e na recuperação de um grande número de peças danificadas ou desgastadas. Obviamente, a seleção de parâmetros de soldagem, as suas condições operacionais e seus resultados dependem fortemente de fenômenos que ocorrem no próprio arco e em suas vizinhanças. Neste contexto, este documento busca apresentar uma descrição geral das características do arco elétrico e de outros aspectos relacionados com a sua aplicação que ocorrem nos eletrodos (incluindo as peças sendo soldadas). A ênfase aqui será nos fenômenos físicos que controlam a soldagem a arco e não nos aspectos tecnológicos, industriais ou metalúrgicos da soldagem.

2. Fontes de Energia para Soldagem por Fusão:

A soldagem por fusão é realizada pela aplicação localizada de energia em uma parte da junta (região da(s) peça(s) onde será feita a solda) de forma a conseguir a sua fusão localizada, de preferência afetando termicamente ao mínimo o restante da(s) peça(s). Este processo é ilustrado na figura 2.1. A fonte transfere energia à junta através de uma área de contato (A_0) de forma a aquecer o material adjacente até a sua fusão. Por outro lado, devido à elevada condutividade térmica dos metais e à grande diferença de temperatura entre as regiões próximas e afastadas da área de contato, a energia fornecida ao material tende a se difundir rapidamente para o restante da(s) peça(s), o que dificulta manter a fusão localizada na região de contato e afeta termicamente as regiões vizinhas.

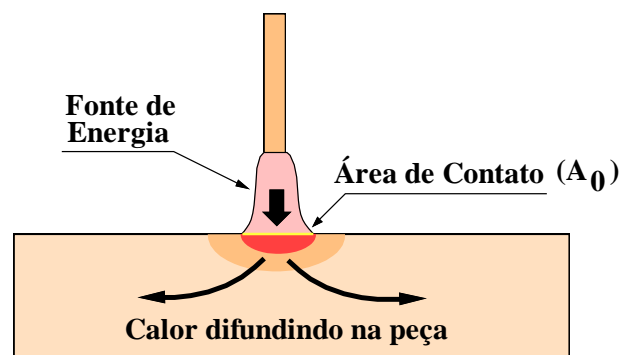


Figura 2.1 - Fluxo geral de calor na soldagem por fusão.

Para ser efetiva na soldagem por fusão, a fonte deve fornecer energia a uma taxa elevada e em uma área pequena para garantir a fusão localizada do metal base na região adjacente à área de contato antes que o calor se difunda para o restante da peça. Para se quantificar este requisito, define-se **potência específica** (P_{esp}) ou **intensidade de uma fonte** de energia como:

$$P_{esp} = \frac{\eta P_F}{A_0} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

onde, P_F é a potência (quantidade de energia por tempo) da fonte, η é o rendimento térmico da fonte (a fração da energia gerada que é transferida para a peça) e A_0 é a área de contato entre a fonte e a peça. No caso de fontes elétricas, como o arco, a potência gerada pode ser estimada pelo produto da tensão (U) e a corrente (I), quando estas não sofrem grandes variações. Assim, para estes processos, a equação de potência específica se torna:

$$P_{esp} = \frac{\eta UI}{A_0} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

Por exemplo, supondo-se uma soldagem GTAW operando com 120 A e 10 V e considerando-se um rendimento térmico de 50% e um diâmetro do arco, junto à peça, de 3 mm, a potência específica seria igual a:

$$P_{esp} = \frac{0,50 \times 120 \times 10}{\pi(0,003^2 / 4)} = 4 \times 10^8 W / m^2$$

Para ser usada na soldagem por fusão, uma fonte deve ter uma potência específica entre cerca de 10^6 a $10^{13} W/m^2$ (figura 2.2). Abaixo do limite inferior, a densidade de energia é insuficiente para fundir a região próxima da área de contato antes que o calor se difunda para o restante da peça. Nesta caso, a fonte permite apenas o aquecimento da peça como um todo sem causar a fusão localizada (como é o caso, por exemplo, de um maçarico de aquecimento ou manta térmica). Acima do limite superior, o calor é fornecido de forma tão concentrada que vaporiza a região de contato antes da fusão ou aquecimento apreciável de outras partes da peça. Tem-se, assim, condições mais favoráveis ao corte do que à soldagem.

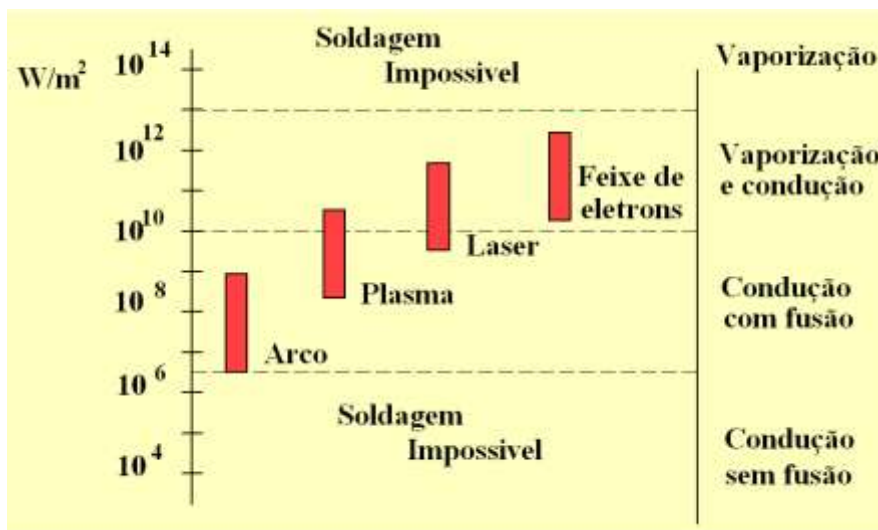


Figura 2.2 – Processos de soldagem e sua faixa usual de intensidade da fonte.

Um aumento da intensidade da fonte reduz o tempo necessário para a criação da poça de fusão e aumenta a sua penetração no metal de base. Desta forma, fontes de maior intensidade tendem a resultar um processos de soldagem de maior produtividade. A figura 2.3 mostra, esquematicamente, a variação da forma da seção transversal do cordão com a intensidade da fonte. Outros fatores, além da P_{esp} , têm um efeito importante no formato do cordão (seção 11). Entre as características da junta, destacam-se a sua espessura e a condutividade térmica

do material base. Neste contexto, a formação da poça de fusão em uma junta de cobre (metal de alta condutividade térmica) tende a ser muito mais difícil do que em aço embora este funda a temperaturas superiores ao cobre. A tabela I lista fontes de energia comumente usadas na soldagem por fusão.

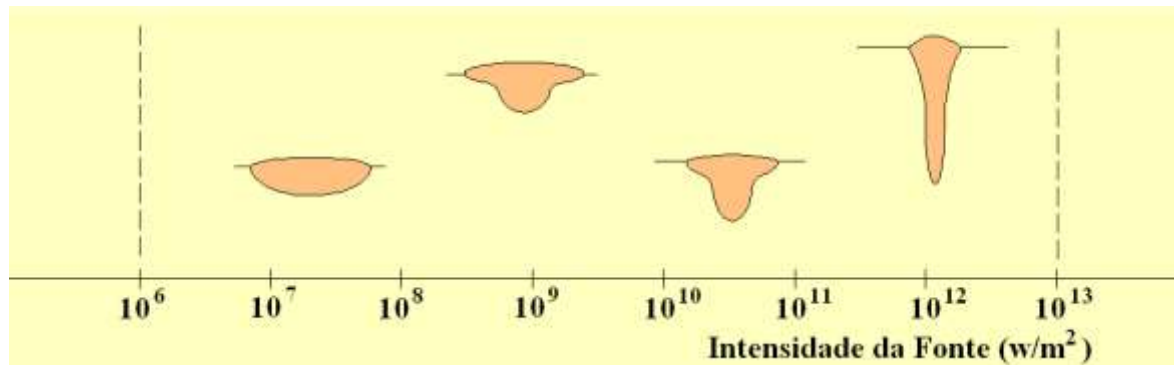


Figura 2.2 – Relação esquemática entre intensidade da fonte e formato (seção transversal) do cordão.

Tabela I – Fontes de energia para a soldagem por fusão.

Fonte de Energia	Exemplo de processo
<ul style="list-style-type: none"> • Química <ul style="list-style-type: none"> - Combustão Oxigás - Reação Aluminotérmica 	OFW, PGW, AHW TW, FOW
<ul style="list-style-type: none"> • Elétrica <ul style="list-style-type: none"> - Arco Elétrico - Resistência Elétrica - Feixe de elétrons 	SMAW, FCAW, SAW, GMAW, ... ESW EBW
<ul style="list-style-type: none"> • Feixe de radiação eletromagnética 	LBW, soldagem com microondas, soldagem com infravermelho

3. Descargas Elétricas em Gases:

O arco é "uma descarga elétrica entre eletrodos em um gás ou vapor (gerado pelos eletrodos) que tem uma queda de tensão, junto ao catodo, da ordem do potencial de excitação do gás ou vapor (isto é, da ordem de 10 V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um valor mínimo de cerca de 100 mA". Atribui-se a primeira observação do arco elétrico em condições controladas a Sir Humphrey Davy, no início do século XIX. O termo **arco** foi aplicado a este fenômeno em função de sua forma característica resultante da convecção dos gases quentes gerados pelo mesmo (figura 3.1). O limite superior de corrente em um arco elétrico não é bem definido, podendo atingir dezenas ou centenas de milhares de Amperes em certos circuitos. Na soldagem a arco, correntes acima de 1000 A são utilizadas no processo ao arco submerso, sendo, contudo, mais comuns valores da ordem de 10^1 a 10^2 A. Correntes da ordem de 1 A ou inferiores são usadas na soldagem com microplasma. Na pressão atmosférica, o arco é caracterizado por **temperaturas muito elevadas**, que causam a **ionização** parcial de seus gases com a

formação de **íons positivos** e **elétrons**. Estes (íons e elétrons) são os responsáveis pela condução da corrente elétrica através do arco, sendo os elétrons responsáveis por mais de 90% da corrente total.

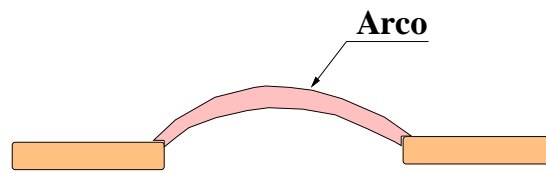


Figura 3.1 - Formato curvo de um arco livre entre eletrodos verticais.

Em soldagem, o arco normalmente ocorre entre um eletrodo cilíndrico e uma superfície (a peça), dando a esse um formato típico de tronco de cone (figura 3.2). O eletrodo pode ser de um material refratário como o tungstênio (**eletrodo não consumível**) ou de metal de menor ponto de fusão como o aço (**eletrodo consumível**). Neste último caso, o processo é mais complicado pois tem-se: (a) passagem de metal fundido (e, às vezes, de escória) através do arco, (b) geometria variável da ponta do eletrodo e (c) comprimento de arco variável e dependente do balanço entre as velocidades de alimentação e fusão do eletrodo (figura 3.3).

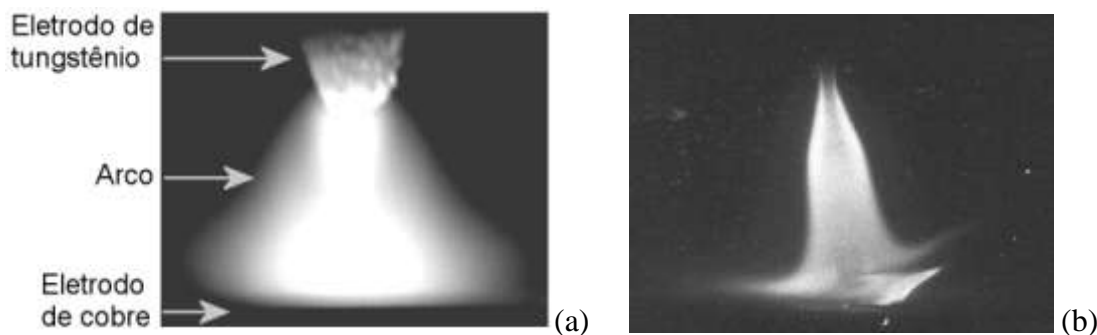


Figura 3.2 – Aspecto típico do arco elétrico na soldagem (a) GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e (b) GMAW (Gas Metal Arc Welding).

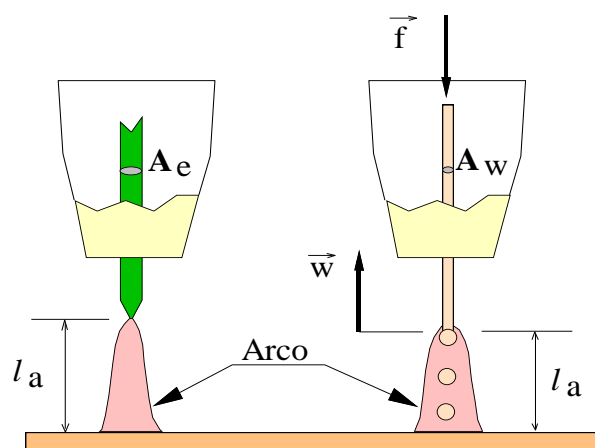


Figura 3.3 - Diferenças entre um processo de soldagem com eletrodo não consumível (esquerda) e eletrodo consumível (direita). l_a - comprimento do arco, f - velocidade de alimentação do arame (eletrodo), w - velocidade de fusão, A_e - área do eletrodo de tungstênio e A_w - área do arame (eletrodo).

4. Características Estáticas do Arco:

A curva característica estática é a relação entre os *valores médios* de tensão (U) e corrente (i) para um valor fixo do comprimento de arco e mantidas as outras características do processo inalteradas. Ela pode ser obtida experimentalmente mantendo-se o comprimento do arco e outras condições operacionais fixas e medindo-se a tensão e a corrente de soldagem enquanto a regulagem da máquina de soldagem é variada (figura 4.1).

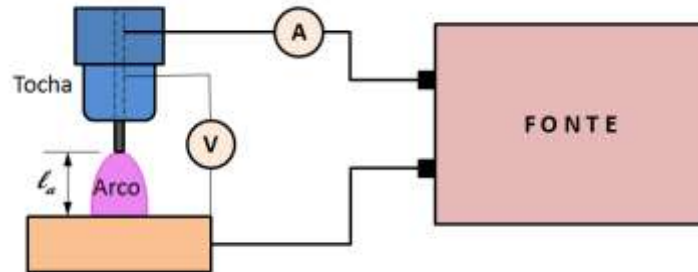


Figura 4.1 – Representação esquemática de uma montagem para a determinação de curvas características do arco no processo GTAW. (A) Amperímetro e (V) Voltímetro.

A figura 4.2 mostra curvas características para três diferentes comprimentos de arco com o processo GTAW (TIG). Pode-se observar que estas curvas são diferentes da esperada para uma resistência comum, para a qual vale a Lei de Ohm ($U = Ri$, com R constante) que expressa uma linha reta que passa pela origem. A curva característica do arco apresenta um valor mínimo de tensão para valores intermediários de corrente. Para maiores ou menores correntes, a tensão tende a aumentar. O aumento da tensão para pequenos valores de corrente está ligado, em parte, com a redução da temperatura dos gases do arco devido à menor quantidade de energia gerada no arco. Menores temperaturas implicam em menos ionização e, portanto, em uma maior resistência à passagem da corrente elétrica.

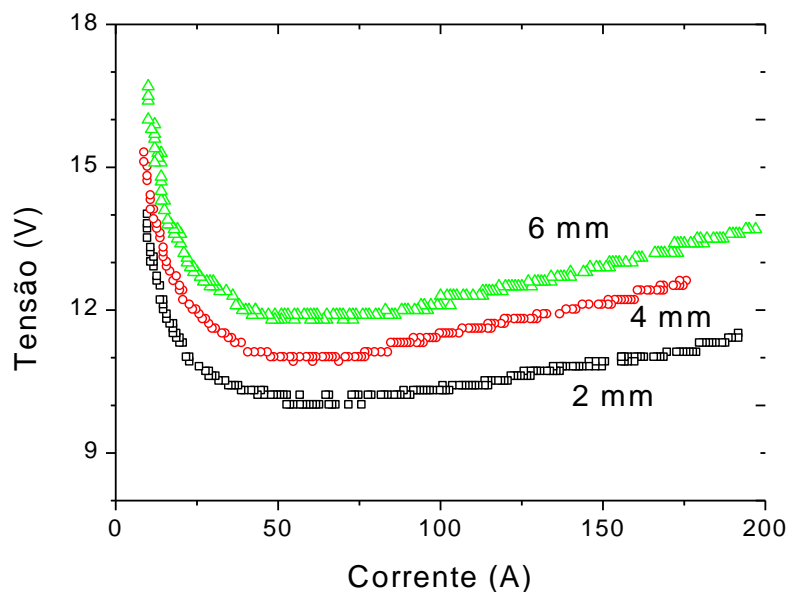


Figura 4.2 - Curvas características do arco GTAW para diferentes comprimentos de arco.

A posição e forma da curva característica dependem de inúmeros fatores como o tamanho, forma, material e temperatura dos eletrodos, composição e pressão do gás de proteção e o

comprimento do arco (l_a). Um aumento do comprimento do arco desloca a curva característica para maiores valores de tensão (figura 4.2). A relação entre U e l_a , para um valor fixo de corrente, é descrita razoavelmente por uma reta que **não** passa pela origem, isto é, $U \approx U_0 + k \cdot l_a$ (figura 4.3). Este comportamento também diferencia o arco dos condutores comuns, para os quais a relação entre a tensão e o comprimento do condutor para um valor fixo de corrente pode ser descrita por uma reta que passa pela origem.

O cátodo (o eletrodo ligado ao pólo negativo da fonte que fornece energia elétrica para o arco) tem grande importância sobre a curva característica pois passa para o arco a maior parte dos elétrons necessários para a sua manutenção. No processo GTAW, a adição de pequenas quantidades de óxido de metais como o tório, cério e tântalo ao eletrodo de tungstênio modifica as condições de emissão de elétrons pelo eletrodo, tornando-a mais fácil e podendo reduzir a tensão do arco em cerca de 1 a 2 V. Por outro lado, quando o cátodo é de um metal não refratário (aço, alumínio, etc.), a maior dificuldade na produção de elétrons eleva a tensão do arco em cerca de 10 V em comparação com o caso anterior (ver seção 6). Estes efeitos obviamente mudam a posição e a forma da curva característica.

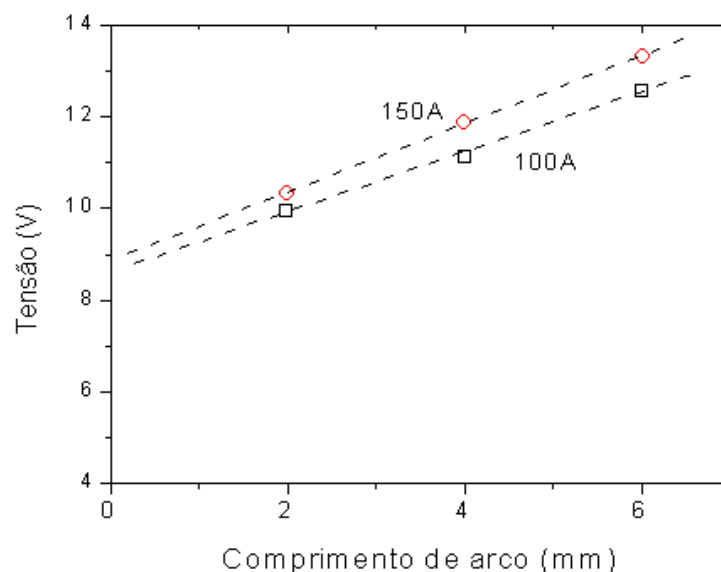


Figura 4.3 – Relação entre tensão e comprimento de arco (dados da figura 4.2).

A composição química da atmosfera do arco influencia características como a facilidade de ionização e a transferência de calor do arco para o meio ambiente. Estes efeitos por sua vez afetam a condutividade elétrica do arco e, portanto, a forma da curva característica. Por exemplo, na soldagem GTAW, a adição ao argônio de praticamente qualquer um dos gases usualmente usados neste processo tende a aumentar a tensão de operação do arco, isto é, desloca a curva característica para cima (figura 4.4).

Na soldagem com eletrodo consumível, a determinação da curva característica é mais complexa, pois l_a depende do balanço entre as taxas de alimentação e fusão do eletrodo (figura 3.2) e o formato da ponta do eletrodo é variável com a formação, crescimento e destacamento de gotas de metal líquido. Existem resultados, contudo, que mostram que a forma da curva característica do arco nestes processos é similar à obtida com eletrodos não consumíveis.

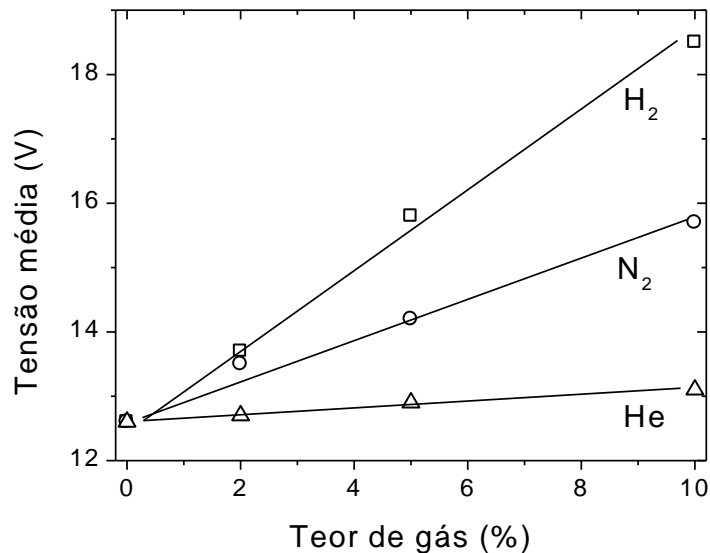


Figura 4.4 - Influência da adição de diferentes gases ao argônio na tensão do arco GTAW (para corrente de 150 A e comprimento do arco de 4 mm).

É também possível levantar a curva característica para a máquina de soldagem¹. Esta é obtida, para uma dada regulagem do equipamento, variando-se o valor de uma resistência elétrica ligada ao equipamento e medindo-se os valores obtidos de corrente e tensão. Classicamente, as fontes de soldagem são divididas em dois tipos básicos: (a) de corrente constante e (b) de tensão constante, figura 4.5. No primeiro tipo, para uma dada regulagem do equipamento, a corrente é mantida relativamente constante enquanto a tensão varia de acordo com as condições de operação. No segundo tipo, a corrente é que varia mais fortemente para atender às condições operacionais. As primeiras são usadas, por exemplo, nos processos SMAW e GTAW e as segundas são comumente usadas nos processos GMAW, FCAW e SAW. Finalmente, considerando uma condição de soldagem relativamente estável, sem a ocorrência de curtos-circuitos, os valores médios de corrente e tensão de soldagem correspondem à interseção das curvas características do arco e da fonte (figura 4.5). Mais detalhes sobre as máquinas de soldagem serão discutidos em seu capítulo específico.

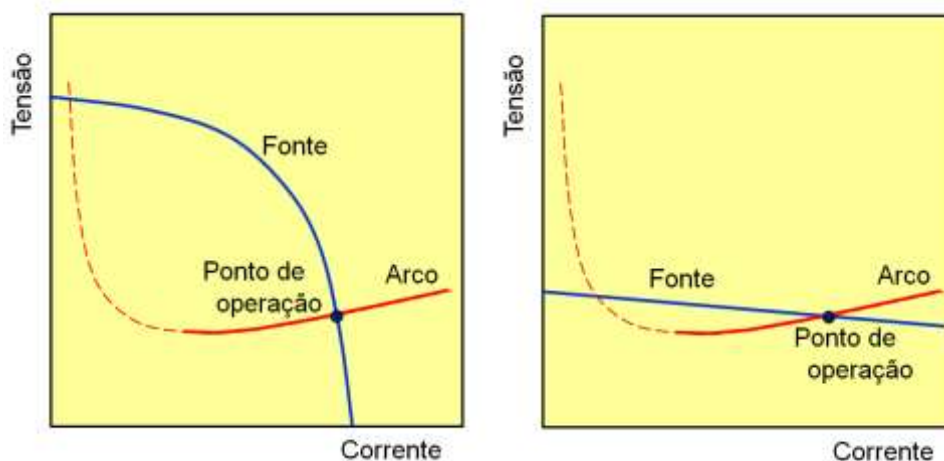


Figura 4.5 – Curvas características de fontes de (a) corrente constante e de (b) tensão constante. A interseção destas curvas com a curva do arco corresponde ao ponto de operação.

¹ Existem atualmente máquinas de soldagem com controle eletrônico cuja curva característica pode variar durante a operação. De qualquer forma, o conceito é útil para o entendimento de um processo de soldagem.

5. Perfil Elétrico:

Em um fio metálico percorrido por um dado valor de corrente, a tensão elétrica varia uniformemente ao longo de seu comprimento (x) pois:

$$U = Ri \text{ e } R = \rho x / A, \text{ e, portanto:}$$

$$U = (\rho i / A)x = kx$$

onde ρ é a resistividade elétrica do fio e A é a área de sua seção transversal.

O mesmo não acontece ao longo do arco elétrico, existindo quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo) que atingem entre 1 e 20 V (figura 5.1). A variação da tensão ao longo do arco sugere que este pode ser dividido em, pelo menos, três regiões principais:

- Zona de Queda Catódica,
- Coluna de Plasma, e
- Zona de Queda Anódica.

A coluna de plasma corresponde a quase todo o volume do arco, podendo ter vários milímetros de comprimento, enquanto que as zonas de queda são pequenas regiões localizadas junto aos eletrodos, com espessuras da ordem de 10^{-2} a 10^{-3} mm! Em soldagem, a queda de tensão na região anódica (U_A) vale entre 1 e 6 V e a catódica (U_C), entre 1 e 15 V. As quedas de tensão junto aos eletrodos são aproximadamente independentes do comprimento do arco e variam pouco com a corrente elétrica.

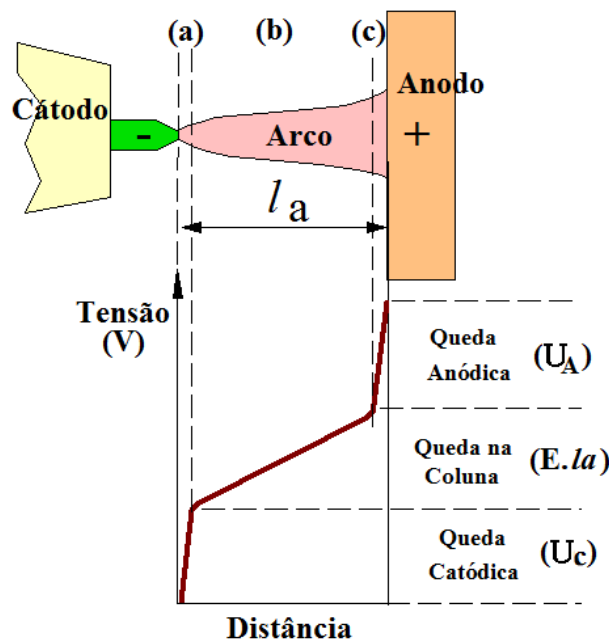


Figura 5.1 - Distribuição esquemática de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica, (b) Coluna do Arco e (c) Zona de Queda Anódica.

A queda de tensão na coluna de plasma é aproximadamente proporcional a l_a ($U_{CP} \approx E.l_a$), onde E é o campo elétrico na coluna, o qual depende, entre outros fatores, da composição do gás do plasma. Na soldagem GTAW, E vale cerca de 800 a 1000 V/m com proteção de argônio e de 1500 a 1800 V/m com o hélio. Com base no discutido acima, a tensão no arco, para um dado valor de corrente, pode ser representada pela equação de uma reta em função de l_a (o que está de acordo com o mostrado na figura 4.2):

$$U = (U_c + U_A) + E \cdot l_a \quad (3)$$

A tabela II (Jackson, 1960) ilustra alguns valores obtidos experimentalmente para as quedas de potencial das diferentes regiões do arco GTAW operando em CC-.

Tabela II - Valores de tensão típicos no processo GTAW (eletrodo negativo Ar puro como gás de proteção).

Corrente (A)	l_a (mm)	$U_A + U_C$ (V)	U_{CP} (V)
200	1,3	6,9	0,8
200	2,5	6,9	1,6
200	5,0	6,9	3,2
400	5,0	6,9	3,2

OBS: U_A - Tensão na queda anódica
 U_C - Tensão na queda catódica
 U_{CP} - Tensão na coluna de plasma

6. Região de Queda Catódica:

Embora o seu volume seja desprezível em comparação com o da coluna, a região catódica é extremamente importante para a existência do arco, pois ela fornece a maioria dos elétrons responsáveis pela condução da corrente no arco. Na soldagem com corrente alternada (CA), na qual o arco se apaga a cada mudança de polaridade dos eletrodos, os processos ocorrendo no cátodo são também importantes para a reabertura do arco.

A emissão de elétrons pelo cátodo é importante pois estes conduzem mais de 90% da corrente elétrica através do arco (embora o arco seja constituído de elétrons e íons positivos, os primeiros apresentam uma mobilidade muito maior devido à sua massa muito menor). A emissão de elétrons pelo cátodo pode ocorrer por diferentes mecanismos. Em soldagem, os mais importantes são a **emissão termiônica**, em cátodos de material refratário como o tungstênio e o carbono, e os mecanismos de **emissão a frio**, para os outros materiais.

A emissão termiônica decorre, basicamente, do aquecimento do material do cátodo a uma temperatura suficientemente alta para causar a emissão (ou "vaporização") de elétrons em sua superfície por agitação térmica. A densidade de corrente (J) resultante do efeito termiônico pode ser estimada pela **equação** empírica de **Richardson-Dushman**:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right), \quad [A/m^2] \quad (4)$$

onde A é uma constante que vale entre 6 e 7×10^5 $A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$ para a maioria dos metais, T é a temperatura (K), e é a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C), ϕ é a função-trabalho termiônica do material (eV) e k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K). A função-trabalho indica a energia requerida para um elétron escapar da superfície do sólido (tabela III).

Para emitir elétrons por este mecanismo em quantidades adequadas para a soldagem, o cátodo deve ser aquecido a temperaturas superiores a cerca de 3500 K, o que torna este mecanismo viável apenas com eletrodos de materiais refratários, em particular de tungstênio. Na soldagem com eletrodos consumíveis ou na soldagem GTAW com o eletrodo positivo (isto é, quando a peça é o pólo negativo), o cátodo não pode atingir temperaturas suficientemente

altas e mecanismos alternativos de emissão de elétrons devem operar para manter o funcionamento do arco.

Tabela III – Função-trabalho termiônica para diferentes elementos.

Elemento	ϕ (eV)	Elemento	ϕ (eV)
Alumínio	3,8-4,3	Magnésio	3,1-3,7
Cério	1,7-2,6	Molibdênio	4,0-4,8
Césio	1,0-1,6	Níquel	2,9-3,5
Cobalto	3,9-4,7	Titânio	3,8-4,5
Cobre	3,1-3,7	Tungstênio	4,1-4,4
Ferro	3,5-4,0	Zircônio	3,9-4,2

Na soldagem com um cátodo de material não refratário com proteção gasosa e, possivelmente, com proteção de fluxo, filmes de óxido com espessura microscópica existentes na superfície do cátodo têm uma importância fundamental na emissão a "frio" de elétrons (isto é, a temperaturas inferiores a cerca de 3500 K). Este mecanismo parece envolver a formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxido pela adsorção de íons positivos, a formação de filetes condutores de corrente elétrica no óxido com a emissão de elétrons e a destruição da camada neste local e, portanto, do ponto de emissão (figura 6.1). A destruição da camada de óxido associada com este processo é fundamental na soldagem GTAW e GMAW do alumínio pois permite a remoção do Al_2O_3 da superfície do metal de base, melhorando a sua molhabilidade e facilitando a formação da solda. Por outro lado, quando as camadas de óxido próximas da poça de fusão são consumidas, o arco tende a se desviar para longe desta em busca de novas regiões para a emissão de elétrons e este efeito tende a reduzir a estabilidade do processo e, também, a intensidade da fonte (pois a área de contato, A_0 , é aumentada – ver equação 1). A figura 6.2 mostra a remoção da camada de óxido na superfície de uma chapa de aço inoxidável pela deposição de um cordão de solda (processo GMAW), quando a proteção é de argônio puro.

Na soldagem GMAW de aços, a remoção da camada de óxidos, quando esta não é muito espessa, não é fundamental para a formação do cordão e, assim, é interessante reduzir o desvio do arco. Para estes materiais, visando regenerar a camada de óxido e, assim, eliminar este efeito, uma quantidade de um gás oxidante (O_2 ou CO_2) é usualmente adicionada à mistura de proteção. Assim, no exemplo da figura 6.2, trocando o gás de proteção por uma mistura Ar-2% O_2 , usual na soldagem GMAW de aços inoxidáveis, a deflexão do arco com a remoção da camada de óxido não é mais observada.

A emissão de elétrons a frio é mais difícil que a termiônica, o que se traduz na necessidade de uma maior diferença de potencial na região de queda catódica (U_c em torno de 10-15 V no primeiro caso e em torno de 2-6 V no segundo). Assim, enquanto, na soldagem GTAW com eletrodo negativo (emissão termiônica), a tensão total do arco atinge cerca de 10 V, na soldagem GMAW (emissão a frio), esta fica em torno de 20 V. O principal fator responsável por esta diferença de valor é o mecanismo de emissão de elétrons atuando em cada caso. Além disto, como a emissão causa a destruição da camada de óxido no local, o cátodo associado com a emissão a frio tende a apresentar um comportamento dinâmico e menos estável do que o associado com a emissão termiônica. A figura 6.3 compara a aparência do arco na soldagem GTAW operando com eletrodo negativo e positivo.

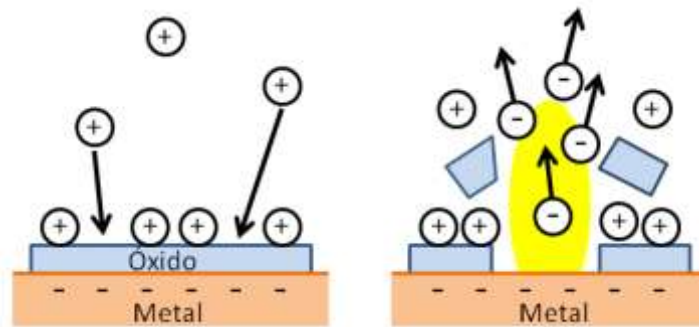


Figura 6.1 - Representação esquemática do mecanismo de emissão de elétrons a frio assistido por camadas de óxido na superfície do cátodo.



Figura 6.2 – Cordão de solda GMAW em aço inoxidável realizada com proteção de argônio puro mostrando a região de limpeza catódica na superfície da chapa.



Figura 6.3 – Aspecto do arco na soldagem GTAW de alumínio com polaridade variável. Observar as “manchas catódicas” na superfície da peça na soldagem com eletrodo positivo (imagens extraídas de uma filmagem realizada no Laprosolda/UFU).

7. Região Anódica:

A região anódica, embora essencial para a continuidade do arco, não é tão importante para a manutenção do arco como a zona catódica. O ânodo não emite íons positivos (que são criados por ionização térmica dos gases na coluna do arco) e assim, há uma maior concentração de elétrons (cargas negativas), o que causa a queda de tensão nesta região. Resultados indicam um valor entre 1 e 4 V para a tensão de queda anódica (U_A) em condições de soldagem. Valores típicos são 2 e 4 V para o arco GTAW com proteção de argônio e de hélio respectivamente. A queda anódica depende de vários fatores, tendendo a se reduzir com a temperatura do ânodo e a aumentar com a sua condutividade térmica

8. Coluna de Plasma:

8.1. Aspectos Gerais:

A coluna compreende praticamente todo o volume do arco, sendo constituída por partículas neutras (moléculas e átomos), íons e elétrons livres. Para a formação do plasma, o gás do arco deve ser aquecido a temperaturas elevadas para, como resultado da agitação térmica, ocorrerem choques entre os seus constituintes e, assim, a sua ionização.

A medida que a temperatura de um gás é elevada, a energia de suas moléculas aumenta, estando este aumento ligado principalmente com a translação e vibração das moléculas. A temperaturas elevadas, a energia vibracional de moléculas poliatômicas torna-se suficiente para causar a sua ruptura ou **dissociação** em átomos. A temperaturas ainda mais altas, um elétron nas camadas mais externas pode ser expulso dos átomos quando estes se chocam em grande velocidade, ocorrendo a **ionização**. A temperaturas ainda maiores, mais elétrons podem ser expulsos, tendo-se a ionização múltipla. A dissociação e a ionização podem ser representadas como:



A maior ou menor facilidade de um átomo se ionizar é indicada pelo valor de seu **potencial de ionização** (V_I para a retirada de um elétron, V_{II} para dois elétrons, etc.), tabela IV. Quanto maior o valor deste potencial, maior a dificuldade para se ionizar e, portanto, maior a temperatura necessária para que uma dada fração dos átomos no plasma esteja ionizada (grau de ionização, α). Em geral, uma melhor estabilidade, maior facilidade de abertura do arco e menores tensões de operação para um dado comprimento do arco são favorecidas pela presença, no arco, de elementos de baixo potencial de ionização como, por exemplo, certos vapores metálicos. Deve-se enfatizar, contudo, que o comportamento global do arco em soldagem depende de diversos outros fatores como as condições de dissipação de energia no arco para o ambiente e as características das regiões de queda. Assim, nem sempre a adição de um elemento de menor potencial de ionização (por exemplo, a adição de hidrogênio ao argônio, figura 4.3) resulta em uma maior estabilidade ou menor tensão de operação.

A figura 8.1 mostra a variação calculada do grau de ionização para vapores de alumínio e de ferro e para o argônio e o hélio em função da temperatura a 1 atm de pressão. Relacione o grau de ionização para cada elemento a uma dada temperatura com o seu grau de ionização. Indique o elemento que deve contribuir para uma maior condutividade elétrica do arco.

Uma característica importante do arco elétrico nas condições usuais de soldagem é a sua **neutralidade elétrica**. Esta pode ser entendida como, para cada ponto da coluna, na presença de iguais quantidades de portadores de cargas positiva e negativa, isto é, uma carga resultante **nula**. Como consequência da neutralidade elétrica, o campo elétrico **E** ao longo da coluna do arco tende a ser basicamente constante como já discutido (seção 5).

Outra característica importante do arco é o seu **equilíbrio térmico**, isto é, a energia cinética média dos seus constituintes (átomos neutros, íons e elétrons) é basicamente a mesma. Isto ocorre pois, para pressões próximas da ambiente, o número de choques entre os diferentes constituintes do arco é suficientemente elevado para equalizar a sua energia. Devido às altas temperaturas da coluna, os elétrons, íons e partículas neutras apresentam elevada energia

cinética e se movem com velocidades elevadas. Como a massa dos elétrons é muito menor que a dos outros constituintes do plasma, a velocidade daqueles é muito maior e, desta forma, eles transportam a maior parte da corrente do arco.

Tabela IV - Primeiro (V_I) e segundo (V_{II}) potenciais de ionização (eV) de alguns elementos.

Elemento	V_I	V_{II}
Alumínio	5,98	18,82
Argônio	15,75	27,62
Carbono	11,26	24,38
Césio	3,89	25,10
Ferro	7,90	16,18
Hélio	24,58	54,40
Hidrogênio	13,60	
Nitrogênio	14,54	29,61
Oxigênio	13,61	35,15
Potássio	4,34	31,81
Sódio	5,14	47,29
Titânio	6,83	13,63
Tungstênio	7,94	

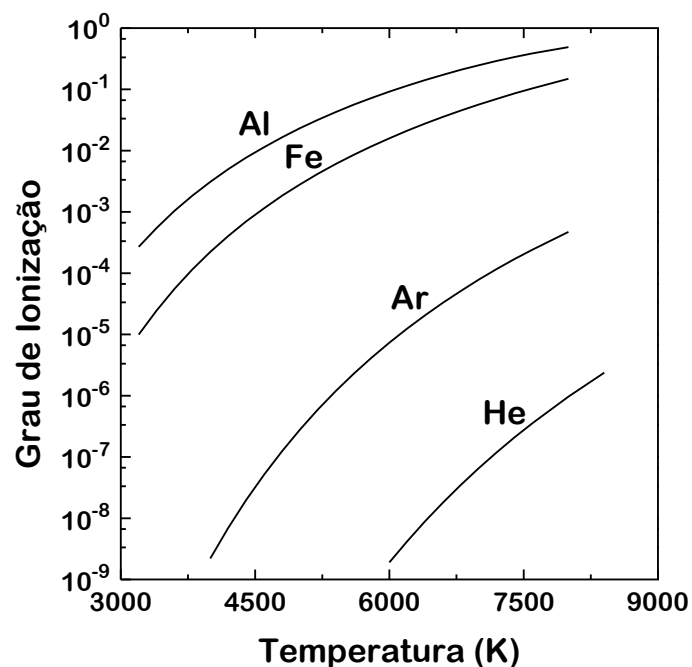


Figura 8.1 – Variação do grau de ionização com a temperatura para diferentes elementos.

A coluna do arco atinge temperaturas muito elevadas, da ordem das encontradas na superfície das estrelas. Estas temperaturas foram determinadas por métodos espectroscópicos e ficam em torno de 6.500 K na soldagem com eletrodos revestidos e atingem até 10.000 a 30.000 K na soldagem GTAW, GMAW e plasma. A figura 8.2 ilustra a distribuição de temperatura no arco GTAW, indicando temperatura de até 18.000 K para regiões do arco próximas do eletrodo. Obviamente estas temperaturas variam com as condições operacionais, por exemplo, elas tendem a aumentar para maiores correntes de soldagem. Compare esta figura com a anterior e estime, para diferentes regiões do arco, o grau de ionização do argônio.

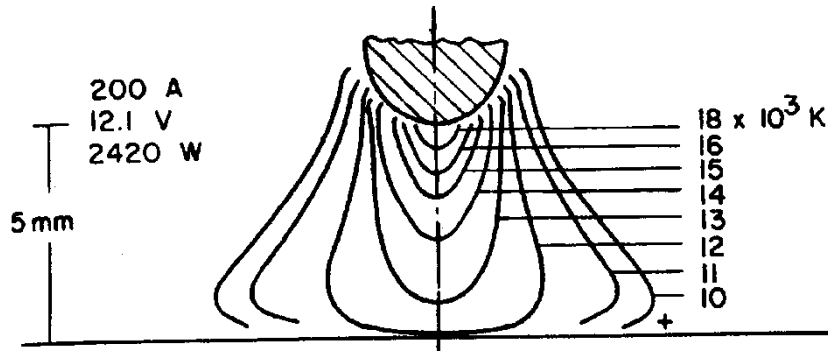


Figura 8.2 - Isotermas no arco GTAW em argônio.

8.2. Efeitos Magnéticos:

O arco é um condutor, em muitos aspectos, similar aos cabos que o ligam à máquina de soldagem. Diferentemente destes, contudo, o arco é gasoso sendo, portanto, muito mais sensível às diferentes forças atuando sobre ele. Em particular, pode-se mostrar que o campo magnético (\mathbf{B}) induzido pela corrente (\mathbf{I}) em torno de um condutor gera uma pressão (\mathbf{P}) ao longo da seção (r) deste condutor que é dada por (figura 8.3):

$$P = P_a + \frac{\mu_0 \cdot I J}{4\pi} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (7)$$

onde P_a é a pressão atmosférica, μ_0 é a permeabilidade magnética J é a densidade da corrente ($I / \pi R^2$) e R é o raio do condutor.

A diferença de pressão ($P - P_a$) é máxima no centro do arco ($r = 0$) e vale $\mu_0 I J / 4\pi$ (equação 7). Considerando-se valores de corrente usuais na soldagem, pode-se verificar que esta pressão é muito baixa (atingindo um valor entre 10^{-4} a 10^{-3} do limite de escoamento do cobre), sendo, assim, desprezível para condutores sólidos. Contudo, para o arco, um condutor gasoso, esse valor é significativo e causa diversos fenômenos como, por exemplo:

- Jato de plasma,
- Sopros magnéticos, e
- Transferência de metal (seção 9).

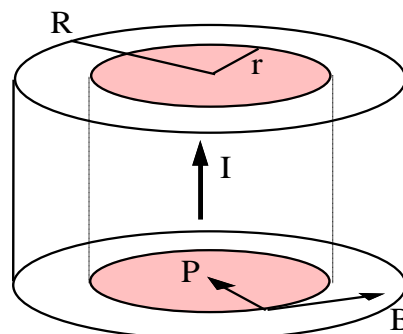


Figura 8.3 - Campo magnético no interior de um condutor cilíndrico. \mathbf{B} – indução magnética.

Jato de Plasma: Observa-se que, em geral, os gases são absorvidos pelo arco junto do eletrodo e impulsionados como um jato a alta velocidade (de até 10^2 m/s) para a peça independentemente da polaridade usada (figura 8.4). Este jato confere ao arco uma certa rigidez ou resistência a correntes de ar e influencia características do processo como, por exemplo, a soldagem fora da posição plana, o formato do cordão, a estabilidade do processo e a absorção de gases pela poça de fusão. O jato de plasma é causado pela forma do arco, mais concentrado junto do eletrodo do que na peça (isto R , equação 7, é menor próximo do eletrodo). Desta forma, a densidade de corrente (J) da região próxima do eletrodo tende a ser maior e, desta forma, a pressão de origem magnética no centro do arco é maior junto eletrodo do que próximo da peça. Esta variação da pressão no centro do arco entre as regiões próximas do eletrodo e da peça causa o fluxo dos gases no sentido observado e, desta forma, o jato de plasma.

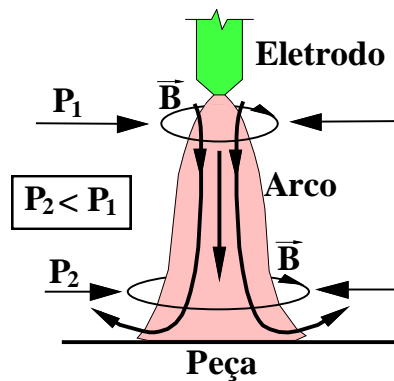


Figura 8.4 - Representação esquemática da formação do jato de plasma. Este jato é criado pela maior pressão de origem magnética junto ao eletrodo (P_1) em relação à pressão junto da peça (P_2).

Sopro Magnético: O campo magnético induzido pela corrente tende a se distribuir uniformemente em torno do arco (figura 8.4). Quando esta distribuição é perturbada, levando a uma maior concentração do campo magnético em um dos lados do arco, as forças magnéticas, que antes geravam o movimento de gases apenas no sentido do eixo do arco, passam a possuir uma componente transversal que tende a empurrar lateralmente o arco. Como resultado a arco passa de defletir lateralmente, tendo este efeito a aparência similar de um leve sopro sobre a chama de uma vela. Este efeito, sopro magnético, reduz o controle que se tem sobre o arco, dificultando a soldagem e aumentando a chance de formação de discontinuidades no cordão. A perda de simetria na distribuição do campo magnético em torno do arco pode ser causada por diversos fatores, destacando-se mudanças bruscas na direção da corrente elétrica, a existência de magnetismo residual na peça e uma distribuição assimétrica de material ferromagnético em torno do arco. O sopro magnético pode ocorrer, por exemplo, na soldagem de uma barra delgada de aço ligada à máquina por um único cabo (figura 8.5), o que causa uma mudança brusca de direção na corrente quando esta passa do arco para a peça. Este efeito é mais provável, também, na soldagem junto da borda de peças de aço (que é um material ferromagnético) ou na soldagem de peças de aço com espessuras diferentes. Como a pressão magnética aumenta com o quadrado do valor da corrente elétrica (equação 7), o problema é mais comum na soldagem com corrente elevada. O sopro magnético pode ser minimizado por medidas como:

- Inclinando o eletrodo para o lado em que se dirige o arco,
- Reduzindo o comprimento do arco,
- Balancear a saída de corrente da peça, ligando-a à fonte por mais de um cabo,

- Reduzir a corrente de soldagem e
- Soldar com corrente alternada, pois, com esta, o sopro magnético é sempre menor.

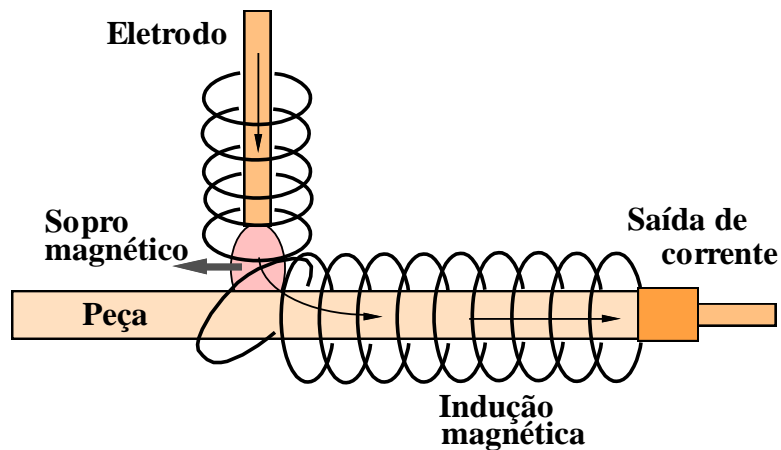


Figura 8.5 – Sopro magnético causado por mudança brusca na direção da corrente.

9. Uma Síntese: A tensão do Arco

Para um dado valor de corrente, a tensão do arco é dado pela equação 3. Esta equação sugere uma relação direta entre a tensão de soldagem e o comprimento do arco e, de fato, esta é comumente usada em equipamentos e na análise de procedimentos de soldagem. Por exemplo, para mecanizar a soldagem GTAW existem dispositivos (conhecidos como AVC – “Automatic Voltage Control”) que utilizam a tensão para controlar o comprimento do arco. O equipamento continuamente mede a tensão de operação e, caso esta esteja, por exemplo, maior do que um valor de referência, este interpreta que o arco está mais longo que o desejado e aciona um mecanismo que desloca a tocha em direção à peça até a tensão de operação igualar à tensão de referência. Um deslocamento no sentido oposto é feito caso a tensão de soldagem fique menor que o valor de referência.

É também possível desenvolver um dispositivo capaz de determinar a trajetória ao longo de uma junta no caso da soldagem em chanfro. Isto é feito monitorando a variação dos parâmetros de soldagem durante um movimento de tecimento (isto é, perpendicular à junta, figura 9.1). No caso da soldagem GTAW, o centro da junta corresponderá à posição de maior comprimento de arco e, portanto maior tensão. Desta forma, a variação de tensão ao longo de cada movimento lateral (de tecimento) da tocha pode ser usada para localizar a posição do centro do chanfro e esta informação pode ser usada para controlar o posicionamento do tocha ao longo da junta.. Para processos que utilizam alimentação contínua de um eletrodo consumível (o processo GMAW, por exemplo), a corrente e o modo de transferência de metal (seção 10) tendem a variar durante o tecimento, mas uma abordagem similar, embora mais complicada, pode ser aplicada para determinar o centro da junta.

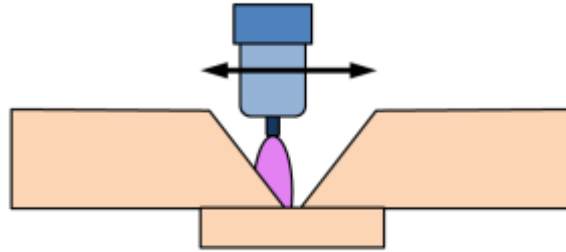


Figura 9.1 – Tecimento dentro de uma junta.

Embora a relação entre comprimento do arco e a tensão de soldagem seja muito útil, não se pode esquecer que diversos fatores adicionais afetam a tensão de operação. Por exemplo, a composição do gás de proteção tem um efeito importante sobre o campo elétrico (E) da coluna enquanto o mecanismo de emissão de elétrons (determinado, em boa parte, pelo material do cátodo) afeta fortemente o valor da tensão de queda catódica (U_C). A figura 9.2 ilustra efeito destes fatores no perfil elétrico (ver seção 5) do arco e, por consequência, na tensão do arco. Além destes, outros efeitos mais “práticos” também afetam a tensão de operação, por exemplo, o comprimento dos cabos e seu comprimento e a qualidade das conexões elétricas.

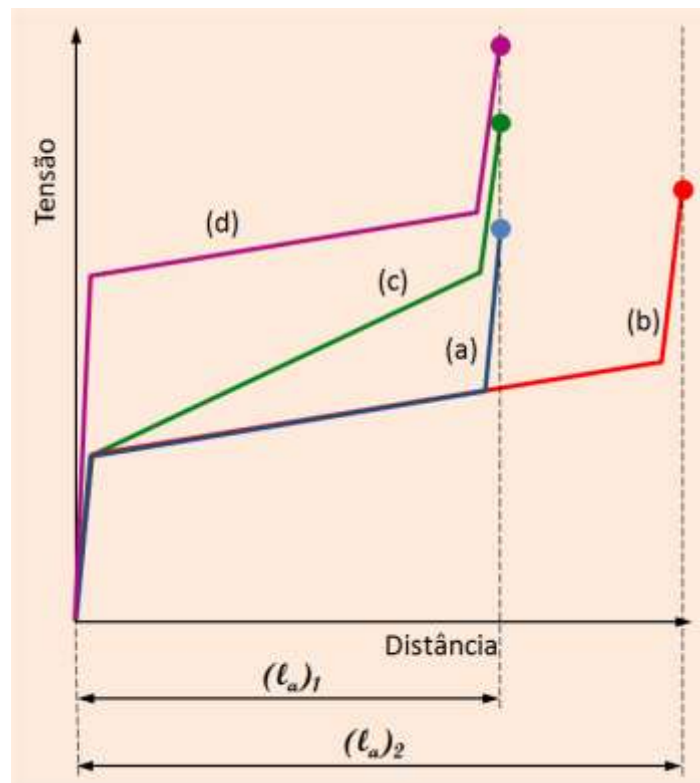


Figura 9.2 – Variações da tensão do arco por alterações em seu perfil elétrico. (a) Curva original, (b) variação do comprimento do arco, (c) mudança no gás de proteção ($E_c > E_a$), (d) mudança no mecanismo de emissão de elétrons ($U_{C(d)} > U_{C(a)}$).

10. Transferência de Metal de Adição:

10.1. Introdução:

A forma pela qual o metal de adição fundido se transfere para a poça de fusão influencia o nível de respingos e fumos gerados, a capacidade de se soldar fora da posição plana, o formato do cordão e a própria estabilidade do processo. A maior dos estudos de transferência de metal foi realizada com o processo GMAW e, assim, a maior parte das informações refere-se a este processo.

Diversas formas de transferência de metal são observadas para os diferentes processos e condições operacionais. Diferentes terminologias, muitas vezes conflitantes, existem na literatura. Um sistema de classificação proposto pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW) e baseado em aspectos fenomenológicos da transferência de metal é apresentado na tabela V e na figura 10.1.

Tabela VI - Formas usuais de transferência de acordo com o IIW.

Tipo de Transferência	Exemplo de Processo de Soldagem
1. Queda Livre (Free Flight Transfer):	
1.1. Globular (Globular)	
1.1.1. Globular (Drop)	GMAW - baixa corrente
1.1.2. Repelida (Repelled)	GMAW com proteção de CO ₂
1.2. Goticular ou Aerossol (Spray ou Goticular)	
1.2.1. Projetado (Projected)	GMAW - corrente intermediária
1.2.2. Com Alongamento (Streaming)	GMAW - corrente média
1.2.3. Rotacional (Rotating)	GMAW - corrente elevada
1.3. Explosiva (Explosive)	SMAW (eletrodos revestidos)
2. Por Contato (Bridging Transfer)	
2.1. Curto Circuito (Short-circuiting)	GMAW - arco "curto"
2.2. Contínua (Without Interruption)	GTAW com alimentação contínua
3. Protegida por Escória (Slag Protected Transfer):	
3.1. Guiada pela parede (Flux-Wall Guided)	SAW
3.2. Outros modos (Other modes)	SMAW, FCAW, ESW, etc

O modo de transferência de uma dada condição de soldagem depende de fatores como os parâmetros elétricos do arco (tipo e valor da corrente, tensão e polaridade), o diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento o eletrodo, etc. A seguir, as características principais da transferência de metal de adição no processo GMAW e em outros processos serão discutidas em maior detalhe.

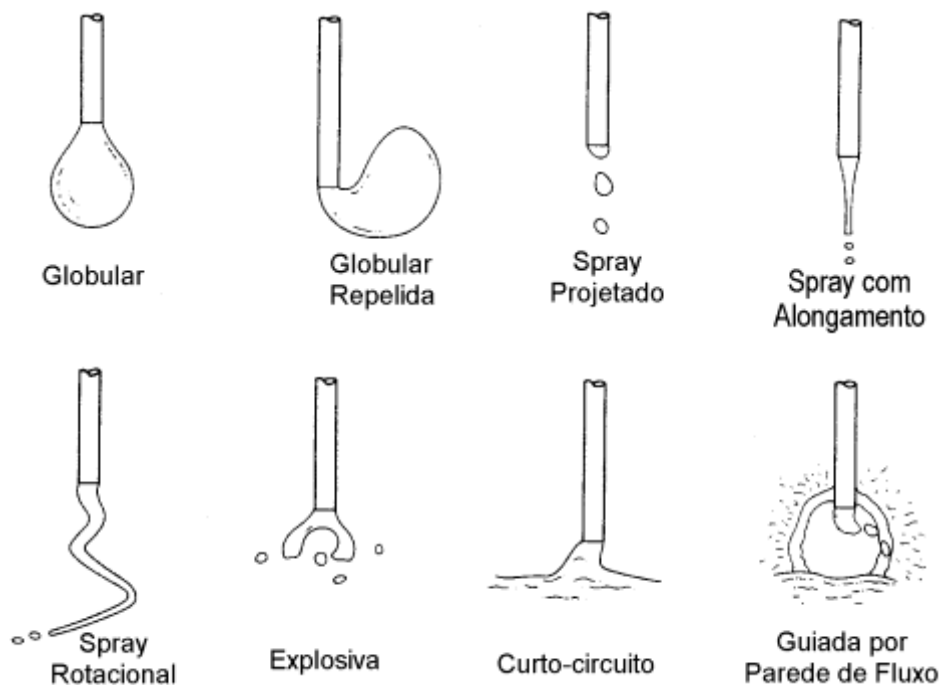


Figura 10.1 - Modos de transferência de acordo com a classificação do IIV.

10.2. Transferência de Metal no Processo GMAW:

A transferência de metal no processo GMAW apresenta inúmeras facetas. Classicamente, se considera três formas principais: (a) Transferência por Curto Circuito, (b) Transferência Globular, (b) Transferência por "Spray", Aerossol ou Goticular. Formas derivadas destas são citadas na literatura, por exemplo, a transferência globular repulsiva e diferentes formas da transferência spray (tabela V).

A figura 10.2 mostra, esquematicamente, os campos operacionais das formas principais de transferência na soldagem GMAW com eletrodo positivo e um gás de proteção a base de argônio.

• Transferência por Curto Circuito:

A transferência por curto circuito ocorre na soldagem com um pequeno comprimento do arco (baixa tensão) e, mais comumente, com uma baixa corrente. Nesta forma de transferência, a ponta do eletrodo atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando um curto circuito e a extinção do arco. Com o curto circuito, a corrente eleva-se rapidamente, aquecendo o eletrodo por efeito Joule ($R I^2$) e aumentando a sua fusão. Ao mesmo tempo, o metal fundido tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética (seção 8.2). Com isto, o curto circuito é rompido e o arco é restabelecido. A figura 10.3 ilustra o processo acima, juntamente as variações de corrente e tensão que ocorrem durante este tipo de transferência. Nesta figura, o arco existe entre **A** e **B**, o curto circuito ocorre durante **C** e, em **D**, tem-se a reignição do arco.

A cada segundo, entre cerca de 20 e 200 curtos podem ocorrer neste tipo de transferência dependendo das condições operacionais. Durante um curto circuito, a corrente aumenta rapidamente e a ruptura do contato entre a poça de fusão e o eletrodo tende a ser explosiva, com a vaporização de parte do material e a formação de inúmeros respingos. Por outro lado,

se a corrente não aumentar de forma suficientemente rápida, o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte líquida e formar um emaranhado não fundido sobre o metal de base. Para controlar a velocidade de variação da corrente e, assim, otimizar as condições operacionais na soldagem com transferência por curto circuito, as máquinas para soldagem GMAW possuem um controle adicional (“indutância”). O correto ajuste deste controle permite obter uma corrente, durante o curto circuito, elevada o suficiente para romper o curto, contudo, sem a formação de uma quantidade excessiva de respingos.

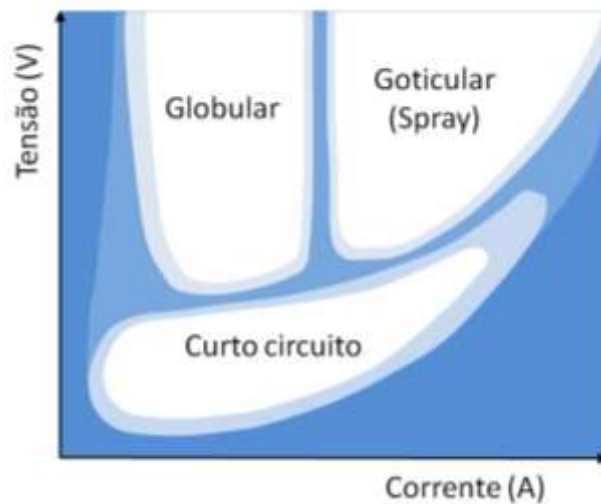


Figura 10.2 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático).

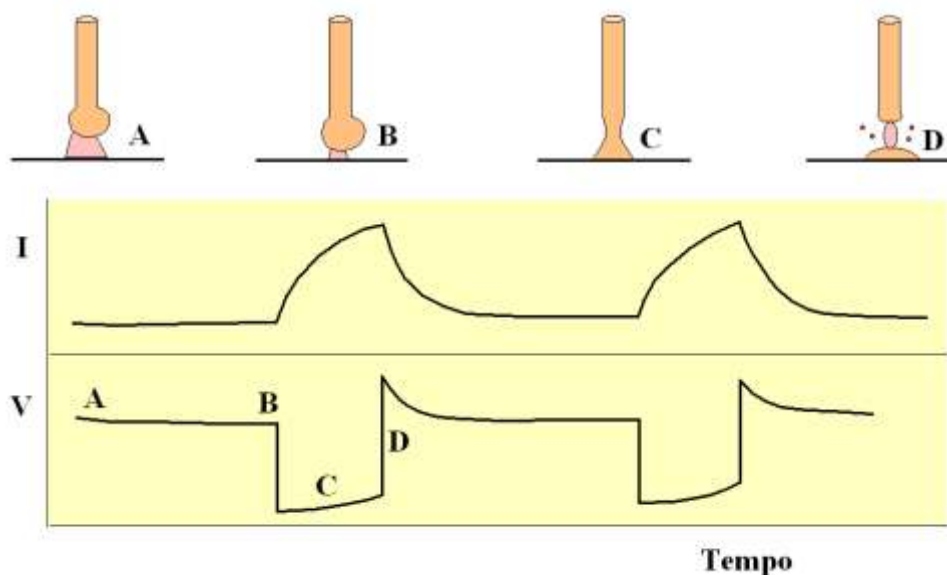


Figura 10.3 - Transferência por curto circuito

Como o arco é extinto durante os curtos circuitos, o calor transferido para a peça e, portanto, a capacidade de fusão da mesma fica reduzida nesta forma de transferência, o que pode levar à formação de defeitos de fusão (falta de fusão) na soldagem de peças de maior espessura. Por outro lado, este mesmo aspecto torna a soldagem por curtos circuitos muito adequada para peças de pequena espessura. Esta é a forma de transferência mais comumente utilizada na soldagem GMAW de aços estruturais com mistura de proteção rica em CO_2 e com arames de

pequeno diâmetro (0,8 a 1,2 mm). A figura 10.4 mostra um oscilograma de corrente e tensão associada com a transferência por curto circuitos (comparar com a figura 10.3).

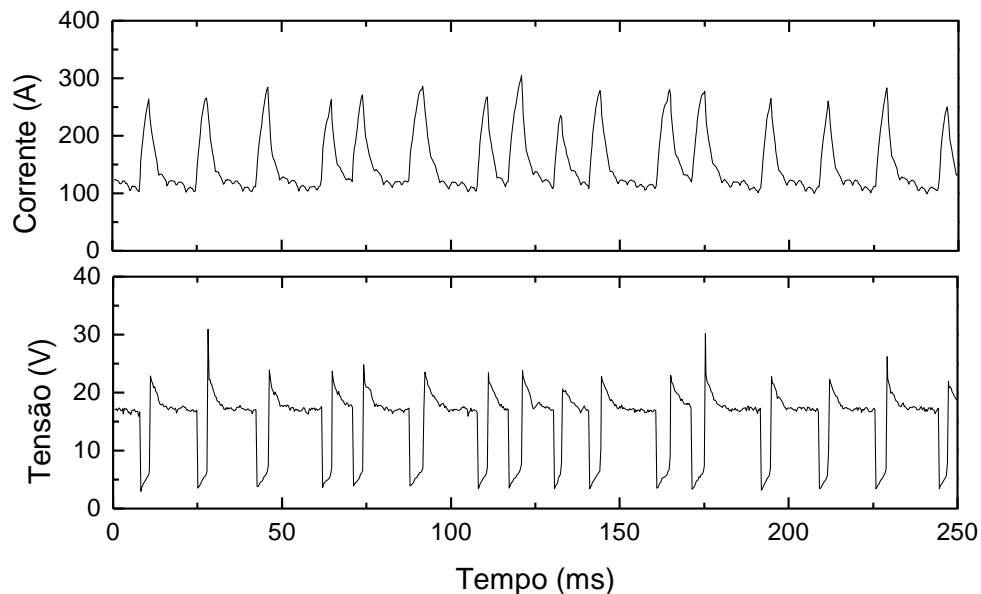


Figura 10.4 - Oscilograma da transferência por curto circuitos para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O₂.

- **Transferência Globular:**

A transferência globular é caracterizada pela formação, na ponta do eletrodo, de grandes gotas de metal líquido (diâmetro superior ao do eletrodo) que se transferem sob a ação da gravidade para poça de fusão com uma baixa frequência (10^{-1} a 10^0 gotas/s). Com um gás de proteção a base de argônio, esta forma de transferência é observada para corrente baixa e tensão (e comprimento de arco) elevada. Na soldagem de aço com proteção a base de CO₂, a transferência globular ocorre mesmo com valores elevados de corrente.

A transferência globular típica é similar a uma torneira gotejando. O metal líquido forma-se na ponta do arame e mantém-se preso a esta por ação da tensão superficial. Com o aumento do tamanho da gota, o seu peso aumenta e acaba por ocasionar a sua separação do arame e a sua transferência para a poça de fusão ocorre por ação da gravidade.

Na soldagem GMAW com eletrodo negativo ou com proteção de CO₂, a gota na ponta do eletrodo pode ser repelida do eletrodo para longe da poça de fusão. Esta forma de transferência é denominada de **globular repulsiva** e está associada com forças de reação pela geração de vapores ou do plasma em uma pequena região da gota (figura 10.5). Como a transferência globular depende da gravidade (não podendo, assim, ser utilizada fora da posição plana) e está associada com um arco instável e grande volume de respingos, o seu uso na soldagem GMAW é limitado. Oscilogramas típicos da transferência globular são mostrados na figura 10.6.

Quando o metal de adição possui materiais voláteis capazes de gerar grande quantidade de gases na gota ainda presa à ponta do eletrodo, esta pode explodir devido à formação de bolhas no seu interior. Neste caso (**transferência explosiva**), o material se transfere na forma de finas gotas, lançadas em diferentes direções.



Figura 10.5 - Transferência globular repulsiva.

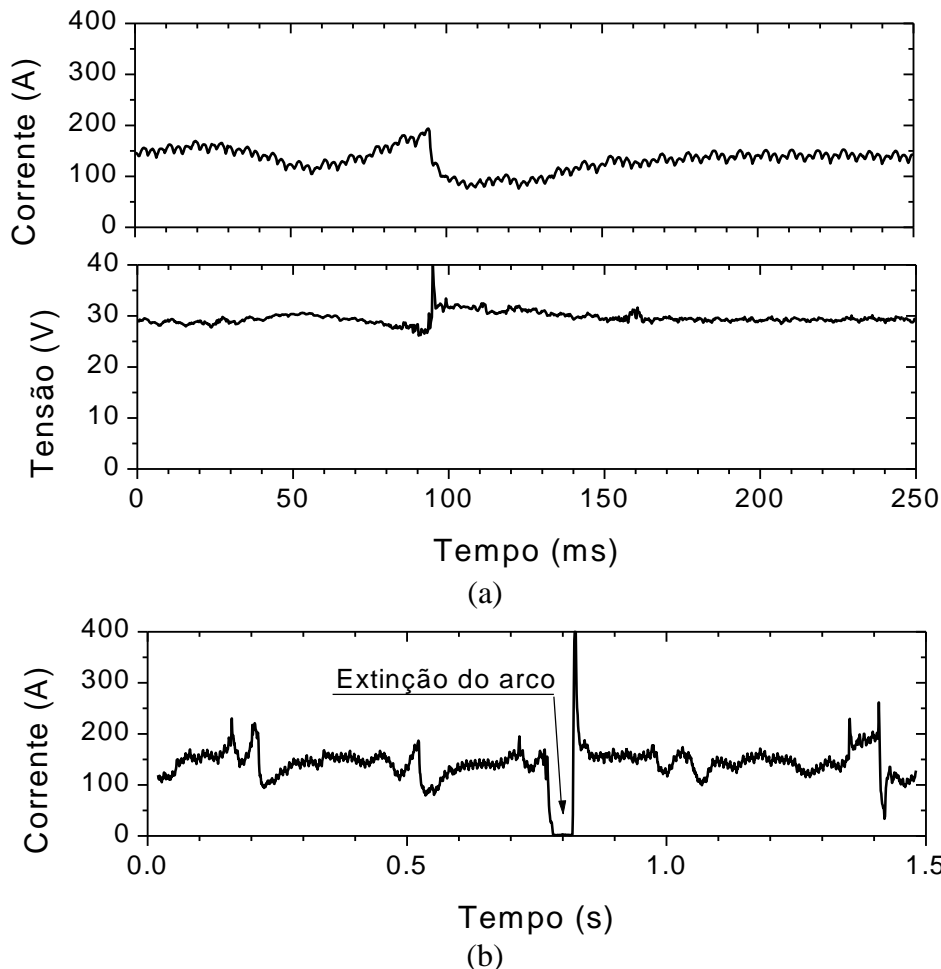


Figura 10.6 - Oscilograma de corrente de um processo com transferência globular em: (a) 250ms e (b) 1,5s. Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: CO₂.

- **Transferência Spray (Goticular):**

Observa-se que, quando a mistura de proteção é rica em argônio e o eletrodo está ligado ao polo positivo, o diâmetro das gotas transferidas se reduz com o aumento da corrente. Acima de um certo nível de corrente (**corrente de transição, I_C**), ocorre uma rápida redução do diâmetro das gotas ao mesmo tempo que o arco, que antes cobria apenas a parte inferior da gota na ponta do eletrodo, passa a envolvê-la completamente. A transferência não é mais controlada pela força de gravidade, passando a ser dominada pela força magnética (seção 8.2), e as gotas são lançadas para a poça de fusão independentemente da posição de

soldagem. A transferência tende a ser muito estável, com mínimas perturbações no arco e muito poucos respingos. A necessidade de uma corrente relativamente alta dificulta ou inviabiliza a soldagem de chapas finas (pela facilidade de furar o metal base) ou a soldagem fora da posição plana (pela formação de uma poça de fusão grande e de difícil controle) com transferência spray.

A corrente de transição depende de fatores como a composição, diâmetro e comprimento do eletrodo e o tipo de gás de proteção. A tabela VI mostra valores da corrente de transição para aço carbono e alumínio para diferentes diâmetros de arame.

Tabela VI - Corrente de transição para arames de diferentes materiais e diâmetros (Fonte: Welding Journal, Fev. 2006).

Diâmetro (mm)	Corrente de Transição (A)	Gás de Proteção	Material
0,6	135	Ar-2%O ₂	Aço baixo Carbono
0,8	150		
0,9	165		
1,2	220		
1,6	275		
0,9	155	Ar-5%O ₂	
1,2	200		
1,6	265		
0,9	175	Ar-8%CO ₂	
1,2	225		
1,6	290		
0,9	180	Ar-15%CO ₂	
1,2	240		
1,6	295		
0,9	195	Ar-20%CO ₂	
1,2	255		
1,6	345		
0,9	150	Ar-1%O ₂	
1,2	195		
1,6	265		
0,8	95	Ar	Alumínio
1,2	130		
1,6	180		
0,9	180	Ar	Cobre desoxidado
1,2	210		
1,6	310		

A transferência spray é característica da soldagem GMAW com proteção rica em argônio e com o eletrodo positivo. Na soldagem dos aços, adições de CO₂ ao gás de proteção aumentam I_C até que, acima de cerca de 30% de CO₂, esta forma de transferência não é mais observada. Adições de O₂ ao argônio reduzem I_C até cerca de 5% de O₂ quando, então, I_C

passa a aumentar. Adições de nitrogênio e hélio também dificultam a transferência spray. Para teores de até 75% de He, a transferência spray ainda ocorre na soldagem de aço com misturas ternárias Ar-He-2%O₂, não ocorrendo, contudo, para uma mistura He-2%O₂. Oscilogramas típicos da transferência spray no processo GMAW são mostrados na figura 10.7.

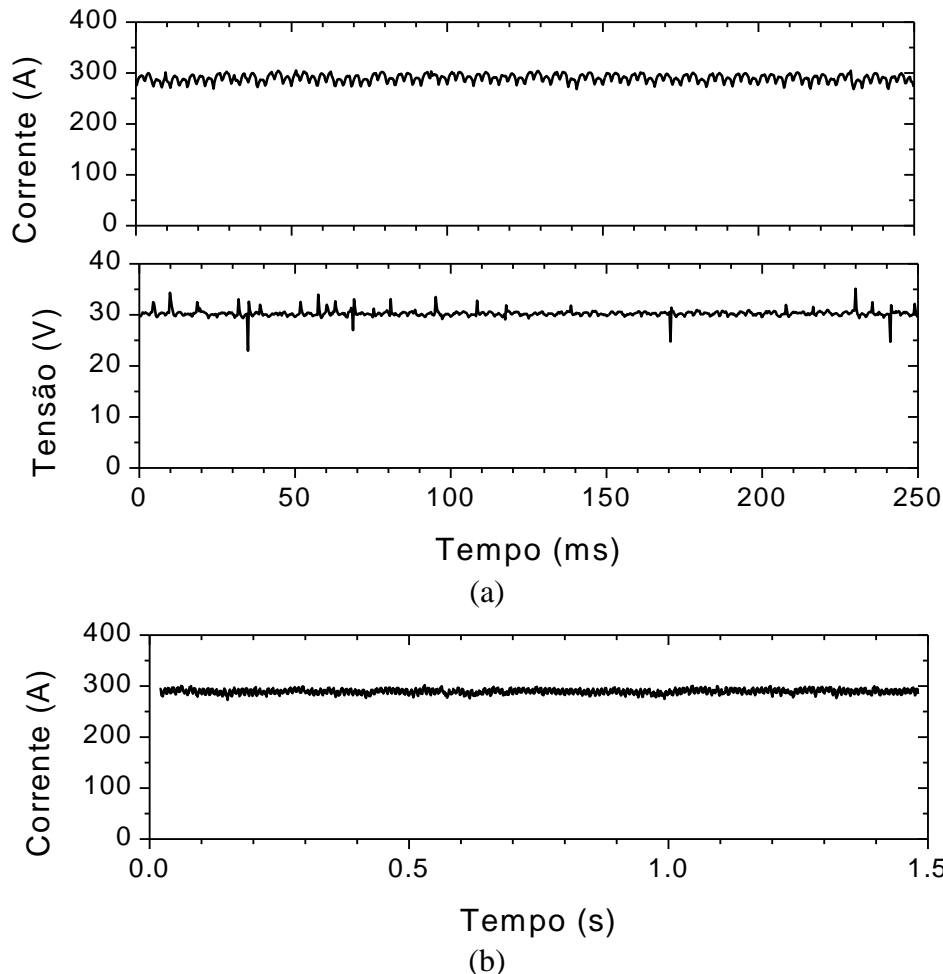


Figura 10.7 - Oscilograma de um processo com transferência spray mostrado em: (a) 250ms e (b) 1,5s. Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: Ar-25%CO₂.

- **Transferência com Corrente Pulsada:**

A transferência spray apresenta excelentes características operacionais. Contudo, devido à necessidade de correntes superiores a I_C , o uso desta forma de transferência fica, em geral, limitado à soldagem de juntas de maior espessura e na posição plana. Para outras condições, trabalha-se, usualmente, com a transferência por curto circuito. Esta, contudo, tende a ser menos estável, gerar elevada quantidade de respingos, além de ser sensível à formação de defeitos de falta de fusão. Adicionalmente, para metais como o alumínio e o cobre, a transferência por curto circuitos pode ser difícil de ser realizada devido à baixa resistividade elétrica destes materiais.

No início da década de 60, pesquisadores do The Welding Institute (TWI, Inglaterra) mostraram que é possível obter uma transferência do tipo spray com o uso de uma corrente variável cujo valor médio era inferior a I_C mas que passava por picos (ou pulsos) acima de I_C

(Needham, 1965). A figura 10.8 ilustra a corrente pulsada e mostra os parâmetros que a definem. Com base nestes, pode-se calcular a corrente média de soldagem como:

$$I_M = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (8)$$

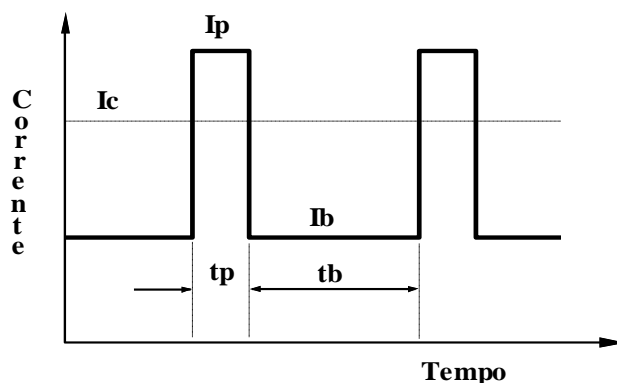


Figura 10.8 - (a) Representação esquemática da pulsação de corrente: I_p - corrente de pico, I_b - corrente de base, t_p - tempo de pico e t_b - tempo de base.

Os principais parâmetros que controlam o tipo de transferência na soldagem com corrente pulsada são o tempo e a corrente de pico e esta influência pode ser representada pelo parâmetro de destacamento (D):

$$D = I_p^2 t_p \quad (9)$$

Para uma dada composição química e diâmetro do eletrodo e um tipo de gás de proteção, existe um valor ótimo de D com o qual a transferência de metal ocorre por spray projetado com uma única gota de metal sendo transferida por pulso de corrente. Para valores menores de D, a transferência tende a ser globular com a gota se formando e se destacando durante vários pulsos de corrente. Para arames de aço carbono de 1,2mm de diâmetro e proteção de Ar-5%CO₂, por exemplo, condições ótimas de operação na soldagem com corrente pulsada ocorrem para um valor de D igual a cerca de 500A²s.

A soldagem GMAW com corrente pulsada não teve inicialmente um grande sucesso devido à necessidade de se controlar parâmetros adicionais em um processo que é bastante sensível à variações de ajuste. Na década de 80, com o desenvolvimento de máquinas de soldagem programáveis com controle eletrônico, houve um ressurgimento do interesse por esta forma de transferência. Nestas máquinas, a seleção e controle dos parâmetros de pulsação são feitos automaticamente pelo próprio equipamento, reduzindo a complexidade no ajuste das condições de soldagem (Soldagem MIG Sinérgica). Com este tipo de equipamento, é possível soldar com transferência pulsada (spray) em uma ampla faixa de correntes cabendo ao operador, para o ajuste, essencialmente a seleção da intensidade da corrente ou velocidade do arame desejadas. Esta forma de soldagem GMAW está se tornando cada vez mais comum.

10.3. Outros Processos de Soldagem:

- **Eletrodos Revestidos:** Formas de transferência similares às discutidas anteriormente ocorrem neste processo. Contudo, este processo se diferencia do anterior pela presença de escória e pela densidade de corrente usada que é, em geral, muito menor. Na soldagem com eletrodos revestidos, o modo de transferência é controlado em grande parte pelo seu tipo de revestimento o qual afeta a composição e propriedades físicas do metal fundido

(tensão superficial, por exemplo), determina em grande parte as características do arco elétrico e cria, em alguns tipos de eletrodo, uma cavidade que ajuda a direcionar o metal de adição para a poça de fusão (figura 10.9). Dependendo do grau de desoxidação do metal fundido ou da presença de componentes voláteis, gases podem ser gerados na ponta do eletrodo, causando uma transferência explosiva.

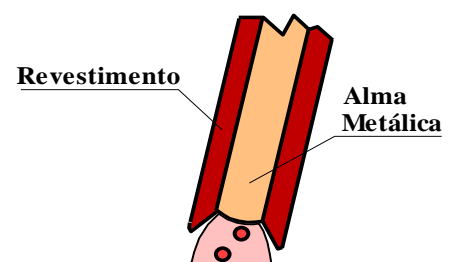


Figura 10.9 - Cavidade formada em eletrodos com revestimentos refratários.

- **Arco Submerso:** Neste processo, a observação da transferência de metal é difícil pois o arco ocorre sob uma camada de fluxo. De forma similar à soldagem GMAW, o modo de transferência depende da polaridade do eletrodo, tendendo a ser mais regular para a soldagem com eletrodo positivo, e o diâmetro das gotas se reduz com o aumento da corrente de soldagem. Como na soldagem SMAW, as características da escória formada influenciam de forma importante o tipo de transferência. O arco ocorre dentro de uma cavidade de fluxo fundido que pode periodicamente se fechar para voltar a se formar logo em seguida. A transferência pode ocorrer através do arco ou as gotas podem colidir com a parede de fluxo e se transferir através desta.
- **Arame Tubular:** Neste processo, o fluxo fica localizado no interior da parte metálica do arame, sendo esta a responsável pela condução da maior parte da corrente elétrica até o arco. Este ocorre externamente ao fluxo e, assim, as condições para a fusão do fluxo são menos favoráveis do que em outros processos. Como na soldagem SMAW e SAW, a forma de transferência depende particularmente das características do fluxo, figura 10.10 (Norrish & Richardson, 1988). Arames com o núcleo de pó metálico e que contêm muito poucas adições não metálicas ("**metal cored**") se comportam de forma similar aos arames não tubulares. A presença, contudo, de adições capazes de estabilizar o arco (por exemplo, elementos de baixo potencial de ionização) possibilita a operação com transferência não repulsiva com eletrodo negativo. Arames **rutílicos** operam normalmente a altas correntes com uma transferência spray projetada não axial. Arames **básicos** operam com transferência globular não axial a correntes elevadas e curto circuito para menores correntes. Em arames **auto-protegidos**, as transferências por curto circuito e globular repelida são típicas.

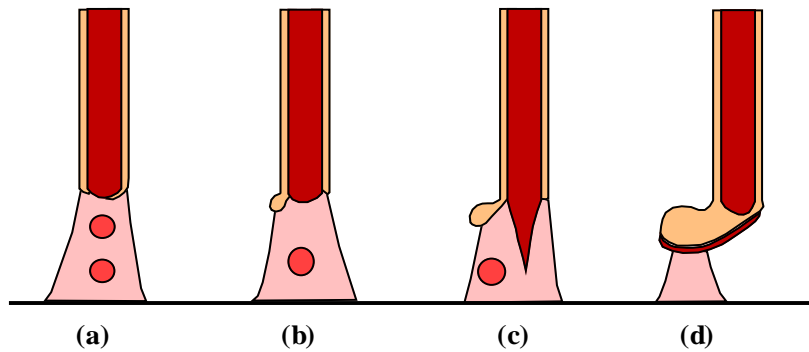


Figura 10.10 - Formas típicas de transferência na soldagem com arames tubulares. Arames: (a) "metal cored", (b) rutílico, (c) básico e (d) auto-protegido.

10.4. Teorias para a Transferência de Metal na Soldagem GMAW:

A teoria mais difundida para o estudo da transferência de metal é baseada no equilíbrio estático das forças atuando na ponta fundida do eletrodo. As principais forças que podem atuar na ponta do eletrodo e contribuir para a transferência de metal são (figura 10.11):

- a gravidade (F_g),
- a tensão superficial (F_γ),
- a força eletromagnética (F_{em}),
- a força de arraste pela passagem de gases (F_a) e
- a força de reação à jatos de vapores ou ao jato de plasma (F_v).

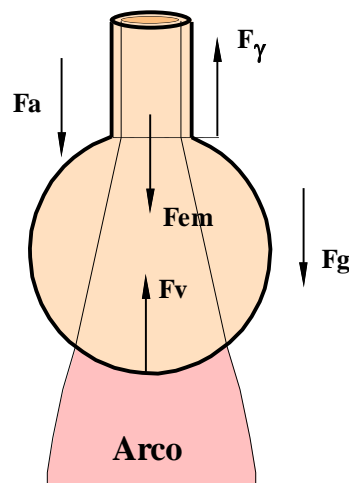


Figura 10.11 - Balanço de forças na ponta do eletrodo. F_g - força gravitacional, F_{em} - força eletromagnética, F_γ - força de tensão superficial, F_a - força de arraste e F_v - força de reação.

Considera-se que uma gota na ponta do eletrodo se destacará deste quando o balanço das forças atuando nesta passar a apresentar uma resultante que a afaste do eletrodo. Por exemplo, no caso da figura 10.11, o destacamento da gota ocorrerá quando:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad (10)$$

11. Velocidade de Fusão de Arame:

Na soldagem a arco com eletrodo consumível, para o processo funcionar de forma adequada, o eletrodo deve ser fundido a uma velocidade, em média, igual à velocidade com que ele é alimentado. Nos processos GMAW, FCAW e SAW com transferência de metal sem curto-circuito, pode-se considerar que um estado estacionário é atingido no qual o comprimento do eletrodo ("stickout") é mantido relativamente constante. Por outro lado, na soldagem com eletrodos revestidos, o comprimento do eletrodo diminui continuamente com o seu consumo. Além de ser importante para o controle do processo, **velocidade de fusão** de arame determina em grande parte a quantidade de metal que será depositado na solda por unidade de tempo (**taxa de deposição**), influenciando diretamente o custo e a produtividade da soldagem.

Na soldagem a arco, a fusão do arame depende principalmente de seu aquecimento pelo arco e por efeito Joule (aquecimento pela passagem da corrente por uma resistência elétrica, isto é, o próprio eletrodo). Considerando estas duas fontes de aquecimento do arame, pode-se mostrar que a velocidade de fusão deste pode ser representada, para os processos GMAW, FCAW e SAW, pela equação:

$$w = \alpha i_{med} + \beta s i_{rms}^2 \quad (11)$$

onde w é a velocidade de fusão (em mm/s ou m/min), α e β são, respectivamente, coeficientes ligados ao aquecimento do eletrodo pelo arco e por efeito Joule, s é o comprimento do eletrodo (comumente denominado de "stickout") e i_{med} e i_{rms} são, respectivamente, os valores médio e quadrático da corrente de soldagem. A tabela VII mostra valores de α e β obtidos experimentalmente para arames de aço carbono. A figura 11.1 mostra as curvas típicas de w para o processo GMAW com arames de diferentes materiais e bitolas. Observar, o formato menos linear das curvas do aço inoxidável austenítico que é o material de maior resistividade elétrica (e, portanto, possui um coeficiente β de maior valor).

Tabela VII - Valores dos coeficientes da equação de velocidade de fusão para aço carbono (Allum & Quintino, 1984).

Diâmetro (mm)	α (mm/sA)	β (1/sA ²)
0,8	0,70	26,3x10 ⁻⁵
1,0	0,47	9,1x10 ⁻⁵
1,2	0,27	5,9x10 ⁻⁵
1,6	0,18	1,2x10 ⁻⁵

A fusão do eletrodo pode ser alternativamente descrita em termos de massa de arame por unidade de tempo (**taxa de fusão**, w_m). A passagem de w para w_m é simples quando se conhece a densidade (ρ) e o diâmetro (d) do arame:

$$w_m = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \rho w \quad (12)$$

A **taxa de deposição** (z_m) relaciona-se com a de alimentação por:

$$z_m = \varphi w_m \quad (13)$$

onde φ é a **eficiência de deposição** ($\varphi < 1$).

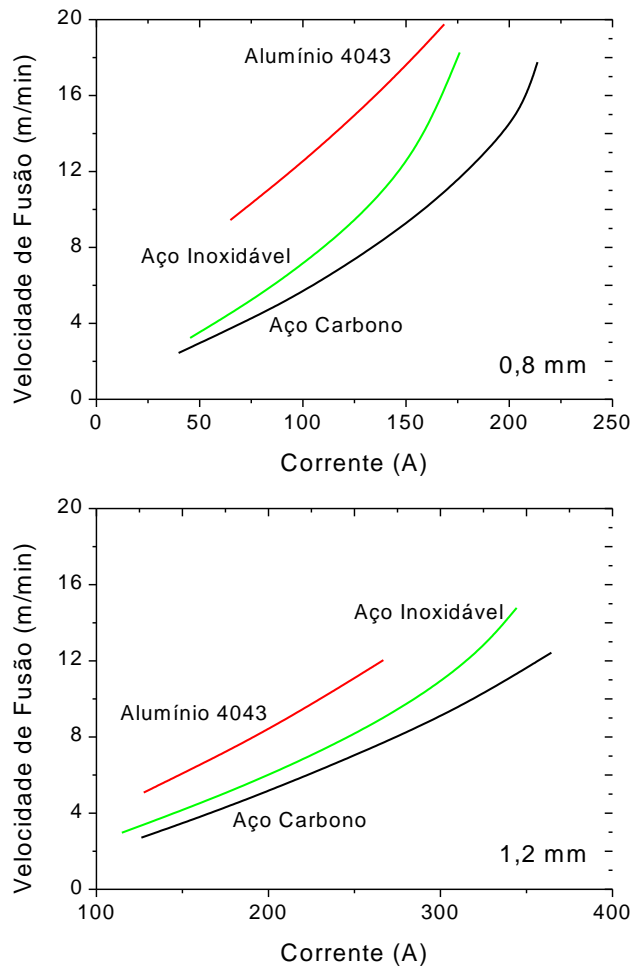


Figura 11.1 – Curvas de velocidade de fusão para arames de 0,8 e 1,2mm.

A figura 11.2 mostra intervalos típicos da taxa de deposição para alguns processos de soldagem. Diferentes técnicas podem ser usadas para aumentar estes valores. Na soldagem SAW, pode-se adicionar pó metálico à junta, o qual é fundido e incorporado à solda. Na soldagem GTAW mecanizada, é possível pré-aquecer o arame de adição pela passagem de uma corrente elétrica através do mesmo (soldagem com “arame quente”).

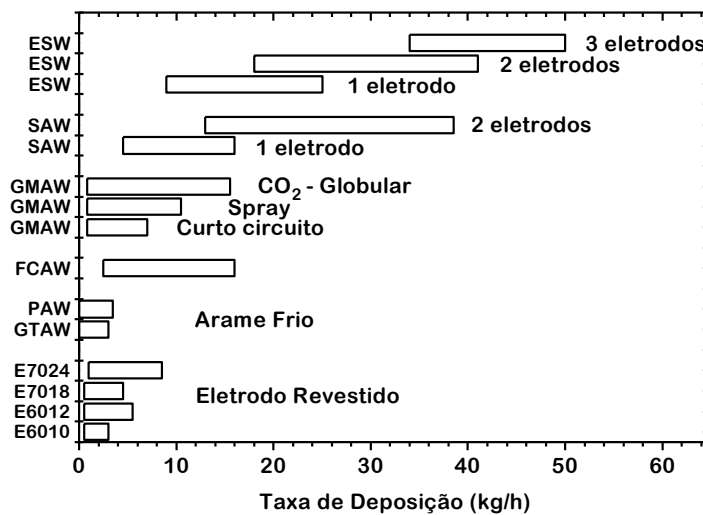


Figura 11.2 - Taxas de deposição comuns de alguns processos de soldagem (Cary, 1994).

12. Variáveis da Soldagem a Arco

12.1. Introdução:

Durante a soldagem, o soldador ou operador controla um número de fatores que afetam o formato final do cordão, as condições gerais de operação e outras características do processo. Na soldagem com eletrodos revestidos, o soldador controla o deslocamento do eletrodo ao longo da junta, o seu movimento transversal (tecimento), o seu posicionamento em relação à junta, o comprimento do arco e, desta forma, a tensão de operação. Por outro lado, a corrente é regulada na fonte antes da abertura do arco. Todos estes fatores afetam o formato da poça de fusão, a penetração no metal de base, a posição da escória sobre a poça de fusão e a estabilidade do processo. Um soldador bem treinado procura, intuitivamente, ajustar todos esses fatores para manter o processo operando corretamente. Adicionalmente, diversos outros fatores, como o tipo de eletrodo, o seu diâmetro, tipo/polaridade da corrente, precisam ser selecionados antes da soldagem.

Esta seção discute resumidamente as principais variáveis de um processo de soldagem e a sua influência no formato final do cordão e nas condições operacionais. Algumas das principais variáveis da soldagem a arco são:

- Nível de corrente,
- Tipo de corrente (corrente contínua com o eletrodo positivo, CC+, ou negativo, CC-, e corrente alternada, CA),
- Tensão de operação,
- Comprimento do arco (figura 12.1),
- Velocidade de deslocamento,
- Velocidade de alimentação de metal de adição,
- Composição e diâmetro do eletrodo,
- Comprimento do eletrodo (“stickout”), figura 12.1,
- Distância do ponto de tomada de corrente à peça (figura 12.1),
- Ângulo da tocha, ou eletrodo, em relação à peça, e
- Tipo de gás de proteção ou de fluxo (ou de revestimento).

Adicionalmente, existem variáveis específicas de cada processo (como a forma da ponta do eletrodo e a vazão de gás de proteção, no processo GTAW, ou a espessura da camada de fluxo, na soldagem SAW) e variáveis que não estão ligadas diretamente à operação de soldagem, como a sequência de deposição de passes (figura 12.2) e a de soldagem, mas têm grande importância nas características finais do componente soldado.

A seleção das variáveis de soldagem para uma dada aplicação depende de fatores como: (i) disponibilidade de equipamentos e materiais, (ii) considerações geométricas (espessura dos componentes, tipo de junta, posição de soldagem e facilidade de acesso), (iii) metalúrgicas (tipo de material de base e sua sensibilidade ao ciclo térmico e às deformações associadas ao processo de soldagem) e (iv) econômicas e (v) a necessidade de se garantir uma estabilidade adequada para o processo e (vi) de se reduzir a chance de formação de discontinuidades (mordeduras, inclusões de escória, falta de fusão, etc.) no cordão.

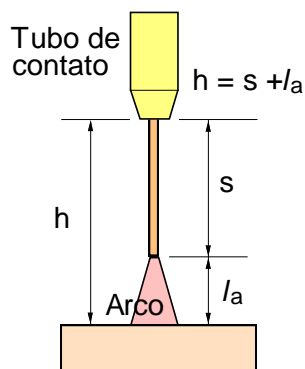
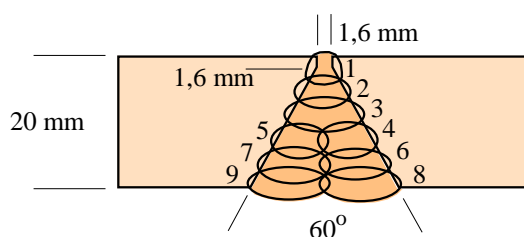


Figura 12.1 - Distância do ponto de tomada de corrente à peça (h), “stickout” (s) e comprimento de arco (l_a)



Processo: SMAW		
Posição: Sobre-cabeça		
Passe	1	2-9
Classe de Eletrodo	E6010	E7018
Diâmetro (mm)	3,2	4,0
Corrente (A), CC+	110	170
Velocidade (cm/min)	10-12	10-12
Tempo de soldagem (h/m)	1,3	

Figura 12.2 - Exemplo de uma sequência de deposição de passes na soldagem sobre-cabeça de um aço estrutural de baixo carbono pelo processo SMAW. E6010 - eletrodo celulósico, E7018 - eletrodo básico.

A seleção das condições de soldagem é complicada ainda pela inter-relação entre as seus variáveis de processo, sendo, em geral, difícil alterar uma variável mantendo as demais fixas. Por exemplo, para um dado processo e consumível, a faixa de tensão que o processo opera de forma estável depende do valor da corrente de soldagem (figura 12.3). A faixa e o tipo de corrente dependem da bitola e do tipo de eletrodo (tabela VIII).

Nos processos GMAW, FCAW e SAW, as velocidades de alimentação e de fusão do eletrodo, o stickout, o comprimento de arco (a tensão) e a corrente de soldagem estão todos relacionados, não sendo possível alterar uma variável mantendo as outras constantes.

Assim, o estabelecimento das condições ótimas de soldagem não é sempre direto e, em geral, diferentes soluções, para uma dada aplicação, existem. Frequentemente, as condições de soldagem são selecionadas de forma empírica, com base na experiência prática, e auxiliada com testes prévios. No caso de aplicações sujeitas aos requerimentos de normas de fabricação, estes testes prévios podem ser parte integrante e formal de um sistema de monitoração e garantia de qualidade da operação de soldagem, correspondendo ao desenvolvimento de uma especificação de procedimento de soldagem e a sua qualificação.

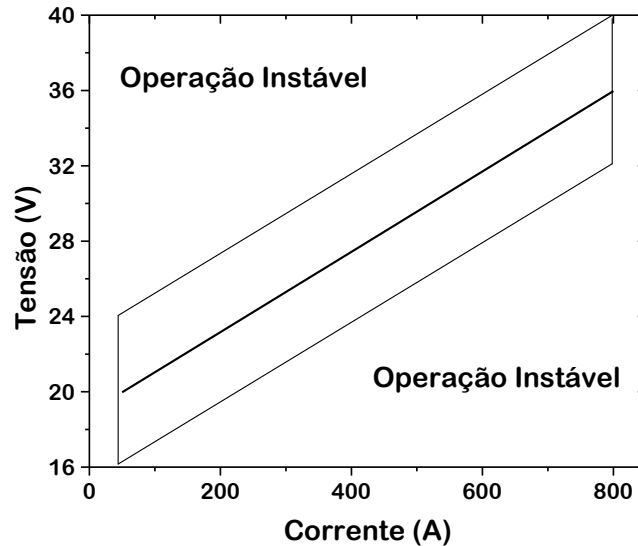


Figura 12.3 - Relação entre a corrente e tensão na soldagem SAW com CC+ (esquemática).

Tabela VIII - Tipo e faixa de corrente para diferentes eletrodos revestidos (dados extraídos do catálogo de um fabricante).

Tipo	Tipo de corrente	Bitola (mm)	Faixa de corrente (A)
E6010 Celulósico	CC+	2,5	60 - 80
		3,2	80 - 140
		4,0	100 - 180
		5,0	120 - 250
E6013 Rutílico	CA ≥ 50A CC+ ou -	2,5	60 - 100
		3,2	80 - 150
		4,0	105 - 205
E7018 Básico	CA ≥ 70A CC+	5,0	155 - 300
		2,5	65 - 105
		3,2	110 - 150
		4,0	140 - 195
		5,0	185 - 270

12.2. Efeito da corrente e tensão do arco - um modelo:

Nesta seção, será desenvolvido um modelo simples da distribuição de energia na região do arco para avaliar as condições de formação de um cordão de solda. O arco é um eficiente transdutor de energia no qual a energia elétrica é convertida quase que totalmente em calor. A energia dissipada no arco é obtida multiplicando-se a tensão (equação 3) pela corrente de soldagem:

$$H_{IN} = UI = U_C I + U_A I + E l_a I \quad (14)$$

A figura 12.4 mostra uma representação simplificada da estrutura do arco. A transferência de calor em cada região será considerada separadamente. Nas regiões de queda, o calor tende a se difundir principalmente na direção longitudinal para o eletrodo ou para a peça onde a temperatura é muito menor. O calor gerado na coluna do arco se transfere principalmente na direção radial para o meio ambiente. Assim, a potência específica (P_{esp}) do arco pode ser definida como:

$$P_{esp} = \frac{Q_{RQ}}{A_0} \quad (15)$$

onde Q_{RQ} é o calor gerado por unidade de tempo na região de queda junto à peça e A_0 é a área de contato entre o arco e a peça.

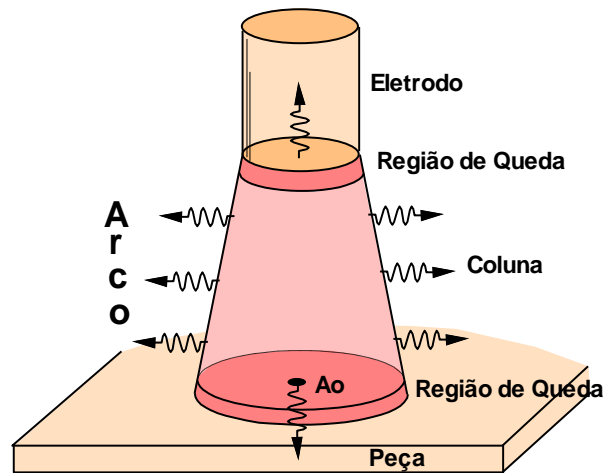


Figura 12.4 - Representação simplificada das direções dominantes de fluxo de calor nas diferentes regiões do arco

Na soldagem com eletrodo consumível, o eletrodo é comumente ligado ao polo positivo da máquina de soldagem (CC+). Neste caso, a região de queda catódica fica junto da peça e a quantidade de energia que poderá difundir pela peça (Q_C) será igual à energia gerada pela passagem dos elétrons pela região de queda ($Q_V = U_C I$) menos a energia necessária para a emissão dos elétrons ($Q_\phi = \phi I$, onde ϕ é a função-trabalho) e a energia necessária para o aquecimento destes até a temperatura da coluna do arco ($Q_T = 3/2 kTI/e$, onde T é a temperatura do arco). Assim:

$$Q_C = -Q_T + Q_V - Q_\phi \quad (16)$$

ou

$$Q_C \approx I \left(-\frac{3kT}{2e} + U_C - \phi \right) \quad (17)$$

Esta energia (Q_C) seria a responsável pelo aquecimento e fusão da peça e a sua capacidade de fundir localmente a peça seria dada pela potência efetiva associada (Q_C / A_0).

Para a região anódica, tem-se:

$$Q_A = Q_T + Q_V + Q_\phi \quad (18)$$

isto é:

$$Q_A \approx I \left(\frac{3kT}{2e} + U_A + \phi \right) \quad (19)$$

Na soldagem com CC+, esta energia está associada com o aquecimento e fusão do eletrodo.

Na coluna do arco, o calor gerado pela queda de energia na coluna, $El_a I$ é perdido principalmente na direção radial (Q_r):

$$Q_r = E l_a \cdot I \quad (20)$$

onde E é o campo elétrico na coluna e l_a é o comprimento do arco.

As equações acima indicam que a **corrente de soldagem** tem uma relação direta com a quantidade de calor transferido para a peça (Q_C), sendo portanto uma variável fundamental para determinar a quantidade de fusão no metal de base e a penetração da solda. Por outro lado, **tensão** tem um menor efeito na penetração pois variações desta causam maiores efeitos na coluna do arco cujo calor gerado é transmitido principalmente na direção radial (figura 12.4). Lembrando que o comprimento de arco está diretamente associado com a sua tensão e que o arco de soldagem tem um formato de tronco de cone, pode-se concluir que a tensão de soldagem afeta principalmente a largura do cordão (figura 12.5). Por outro lado, devido ao aumento de A_o (e, portanto, a redução de P_{eff}) com uma maior tensão de soldagem (e maior l_a), a penetração da solda pode, inclusive ser reduzida com um aumento da tensão.

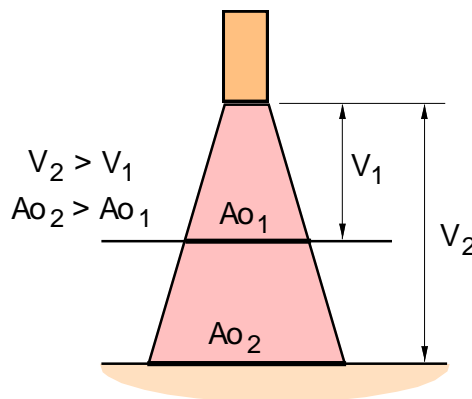


Figura 12.5 - Relação entre a tensão do arco e a largura e área do contato do arco com a peça.

Supondo o processo GMAW, com proteção a base de argônio ($E \approx 800 \text{ V/m}$), $I = 100 \text{ A}$, l_a de 4 mm , CC+ (para a peça ligada ao negativo, tem-se a emissão de elétrons por efeito de campo e, portanto, $U_C \approx 14\text{V}$), substituindo-se os valores nas equações acima, tem-se:

$$Q_C \approx 100\text{A} \cdot (-1\text{V} + 14\text{V} - 4\text{V}) \approx 900\text{W}, \text{ e}$$

$$Q_A \approx 100\text{A} \cdot (1\text{V} + 1\text{V} + 4\text{V}) \approx 600\text{W},$$

$$Q_r \approx 800(\text{V/m}) \cdot 4 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot 100\text{A} \approx 320\text{W}$$

A tabela IX resume estes resultados.

Tabela IX - Balanço térmico em um arco GMAW.

	Saída (W)	Saída (%)
Cátodo	900	49,5
Anodo	600	33,0
Coluna	320	17,5
Total:	1820	100,0

Assim, para a soldagem GMAW com CC+, a maior parte do calor é gerado na peça. Caso a polaridade seja invertida (CC-), o balanço permanece o mesmo, mas, agora, a região catódica

está localizada junta ao eletrodo. Assim, pode-se esperar uma maior velocidade de fusão do arame e uma menor penetração na peça, o que é, de fato, observado (figura 12.6).

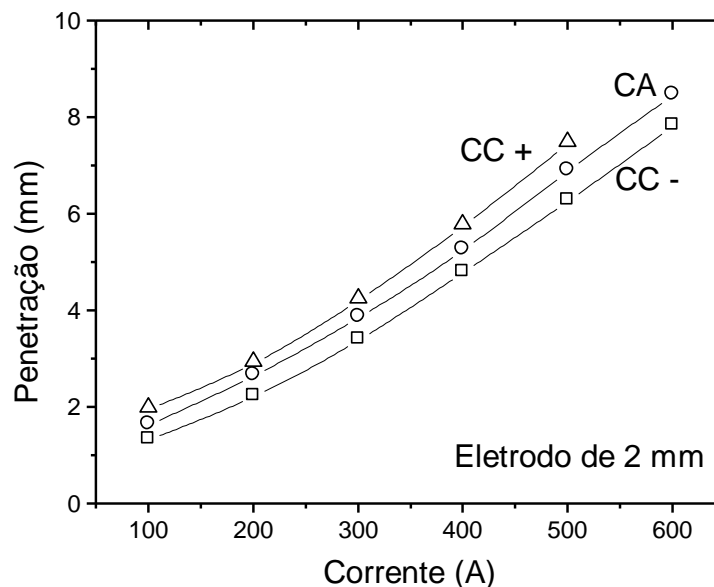


Figura 12.6 - Exemplo do efeito do tipo e nível da corrente na penetração da solda (processo SAW).

Na soldagem GTAW, operando com CC-, a emissão de elétrons no eletrodo de tungstênio ocorre por efeito termiônico ($U_C \approx 6 \text{ V}$). Neste caso, a quantidade de calor gerado no eletrodo é muito menor (tabela X), o que justifica a preferência por esta polaridade no processo GTAW (menor aquecimento e, portanto, menor desgaste do eletrodo).

Tabela X - Balanço térmico em um arco GTAW com eletrodo negativo.

	Saída (W)	Saída (%)
Cátodo	100	9,8
Anodo	600	58,8
Coluna	320	31,4
Total:	1020	100,0

12.3. Variáveis de soldagem e seu efeito:

Segundo Jones (1978), pode-se dividir as variáveis de um processo de soldagem a arco em quatro grupos básicos:

- Variáveis pré-determinadas:
 - Tipo e espessura do metal de base,
 - Propriedades requeridas para o metal de solda e região afetada pelo calor.
 Estes fatores são estabelecidos ainda em fase de projeto, com pouca chance de serem alterados posteriormente.
- Variáveis de fundo:
 - Processo(s) de soldagem,
 - Tipo(s) de equipamento,

- Técnica básica de soldagem,
- Projeto da junta,
- Tipo de eletrodo, fluxo, gás, etc,
- Diâmetro do eletrodo.

Estas variáveis são decididas na fase inicial de produção e, em alguns casos, são determinadas em função da disponibilidade de equipamentos e materiais.

- Variáveis secundárias:
 - Stickout do eletrodo (quando for o caso),
 - Posicionamento do eletrodo (ou tocha) em relação à peça.
- Variáveis primárias:
 - Corrente (tipo e valor),
 - Tensão,
 - Velocidade de soldagem.

Os dois últimos grupos são particularmente importantes pois estas variáveis (principalmente as primárias) são estabelecidas por último na elaboração de um procedimento de soldagem.

As figuras 12.7, 12.8 e 12.9 mostram, de forma qualitativa, a influência da corrente, tensão e velocidade de soldagem na penetração, largura e altura do reforço (figura 12.10) do cordão de solda. A influência da corrente e da tensão de soldagem na largura e penetração do cordão já foi analisada na seção anterior. Resumindo e simplificando, pode-se afirmar que a corrente tem uma influência mais importante na penetração do cordão (maior corrente → maior penetração) e a tensão na sua largura (maior tensão → cordão mais largo). O efeito da corrente no reforço pode ser analisado considerando-se a sua forte influência da velocidade de fusão do arame (equação 13) e, desta forma, na quantidade de material depositado. Como a tensão tem um efeito menor na velocidade de fusão do arame, mas aumenta fortemente a largura do cordão, o reforço tende a ser reduzido com o aumento da tensão (isto é, a área depositada, A_d , tende a permanecer constante, mas como, a largura aumenta, o reforço fica menor quando a tensão de soldagem é elevada).

A redução da largura e penetração do cordão com a velocidade de soldagem está associada com a diminuição da quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta, figuras 12.7 e 12.8. A influência no reforço do cordão, ou melhor na área depositada (A_d , figura 12.10), está associada com a redução da quantidade de material de adição que é fornecido à solda com o aumento da velocidade de soldagem (v). Um balanço de massa simples mostra que:

$$A_d = \varphi \frac{A_w \cdot f}{v} \quad (21)$$

onde A_w é a área da seção transversal do eletrodo, φ é a eficiência de deposição e f é a sua velocidade de alimentação.

A figura 12.11 ilustra, em desenhos da seção transversal de cordões de solda SAW depositados sobre chapas de aço carbono, o efeito da corrente, tensão e velocidade de soldagem no formato do cordão.

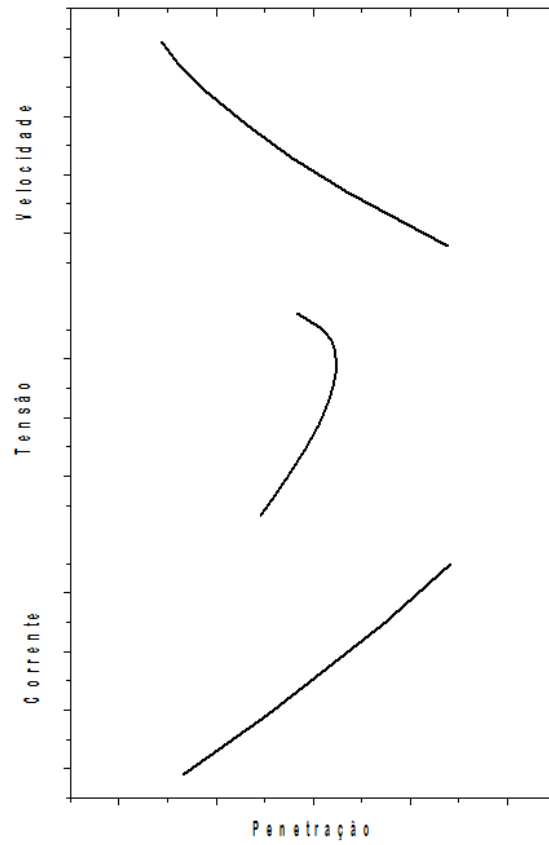


Figura 12.7 - Relação entre a penetração e as variáveis primárias de soldagem (esquemática).

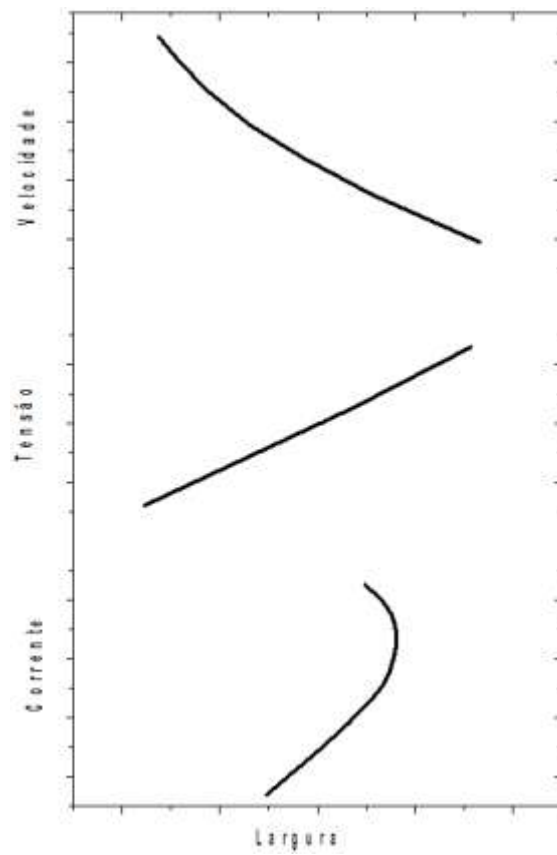


Figura 12.8 - Relação entre a largura e as variáveis primárias de soldagem (esquemática).

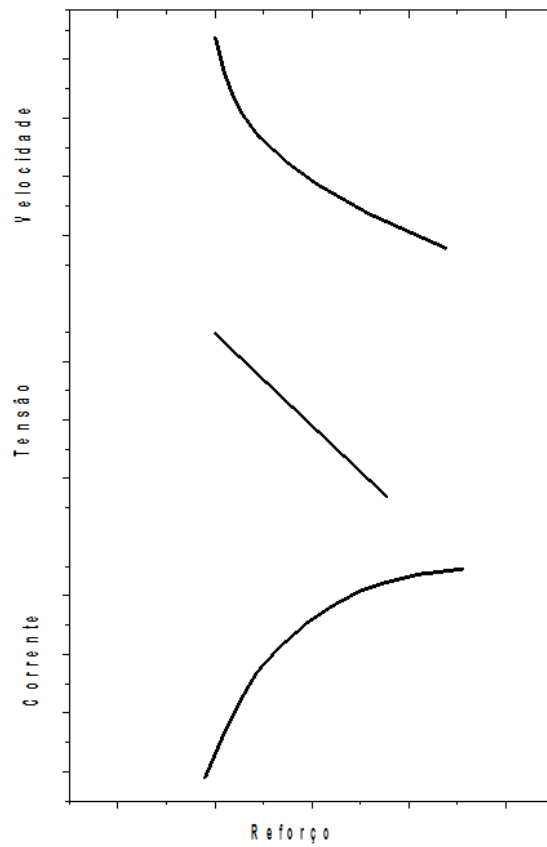


Figura 12.9 - Relação entre o reforço do cordão e as variáveis primárias (esquemática).

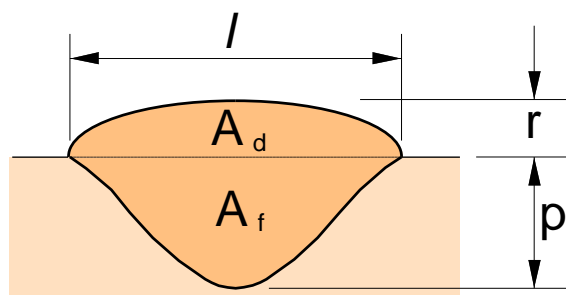
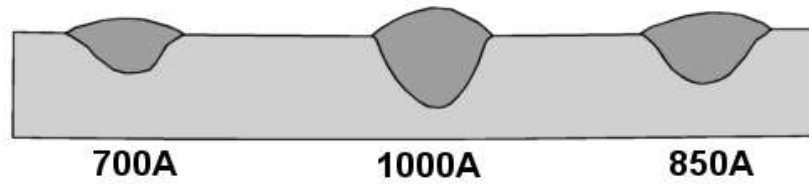
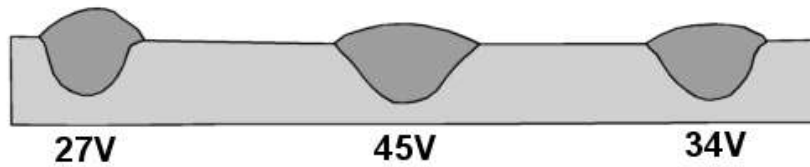


Figura 12.10 - Características geométricas de um cordão de solda: p - penetração, r - reforço, l - largura, A_d - área depositada, A_f - área fundida.

SOLDAGEM MECANIZADA
ARAME DE 5,6 mm - 34 V, 13 mm/s



ARAME DE 5,6 mm, 850 A, 13 mm/s



ARAME DE 5,6 mm, 850 A, 34 V

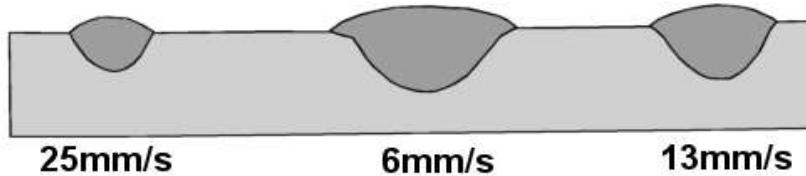


Figura 12.11 – Representação da seção transversal de cordões de solda depositados por SAW em chapas de aço carbono mostrando a influência da corrente, tensão e velocidade de soldagem no formato do cordão (adaptado do AWS Welding Handbook Vol. 1)..

Deve ficar claro que inúmeras outras variáveis e detalhes do processo afetam o formato do cordão de solda, incluindo, por exemplo, o posicionamento da tocha de soldagem (ou melhor, do eletrodo), a posição de soldagem, o tipo de junta e/ou de chanfro e, na soldagem com vários passes, o tipo e o posicionamento do passe dentro da junta.

O posicionamento do eletrodo pode ser caracterizado pela posição do eletrodo (ou de uma projeção deste) no plano de deslocamento (plano que contém o eixo da solda e a normal à face desta). Neste plano, define-se o ângulo de deslocamento como o ângulo formado entre a normal à face da solda e o eletrodo (ou a sua projeção), figura 12.12. De acordo com esse ângulo, processo será feito “puxando” ($\theta < 0$) ou “empurrando” ($\theta > 0$) a poça de fusão. Esta orientação influencia o formato final do cordão, tendendo o cordão que foi feito puxando-se a poça a ser mais estreito e a apresentar uma maior penetração (figura 12.13).

Dependendo da posição de soldagem e das dimensões da poça de fusão, a gravidade pode de forma importante o formato desta poça e, desta forma, o formato do cordão. Por exemplo, a tendência à formação de mordeduras e de um cordão assimétrico é grandemente aumentada na posição horizontal.

As considerações apresentadas acima são apenas uma pequena introdução a este importante aspecto da soldagem. Apenas como um exemplo final, a figura 12.14 mostra a seção transversal de dois cordões feitos com o processo TIG em chapas de 5 mm de espessura de

aço inoxidável austenítico, usando-se os mesmos parâmetros de soldagem. A grande diferença no formato do cordão foi causada pela aplicação, no corpo de prova com o cordão de maior penetração, de uma final camada de um óxido (um “fluxo”) antes da soldagem. Este processo TIG com o uso de fluxo para alterar o formato do cordão é conhecido como processo TIG ativado (ATIG).

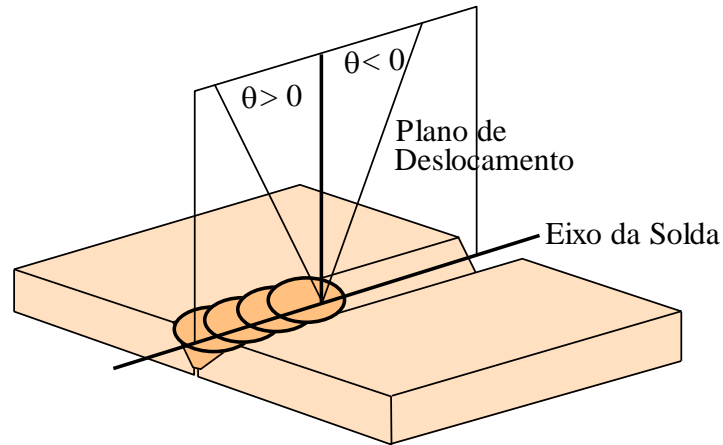


Figura 12.12 - Ângulo de deslocamento.

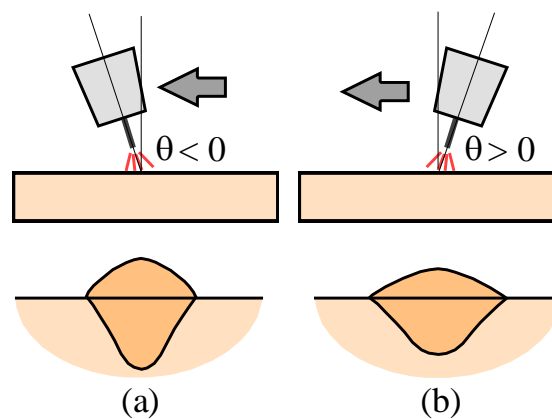


Figura 12.13 - Efeito do ângulo de deslocamento no formato do cordão (esquemático).

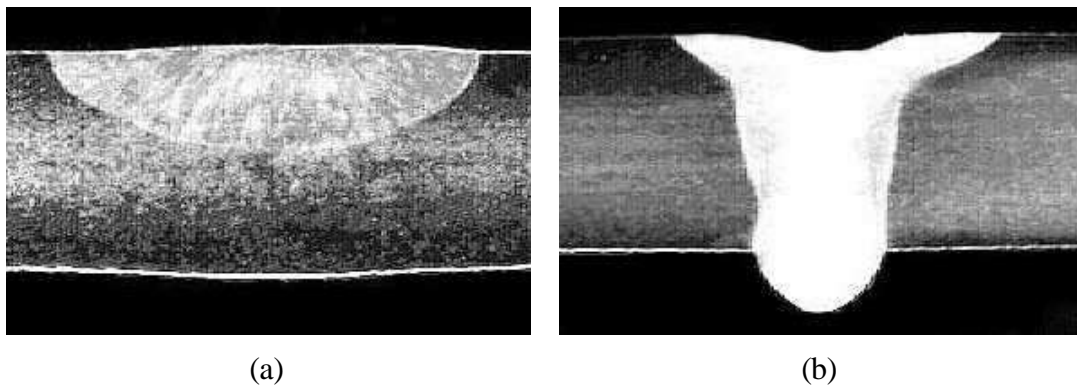


Figura 12.14 – Seção transversal de cordões depositados com a soldagem TIG convencional (a) e com fluxo (b) em chapas de aço inoxidável AISI304 de 5mm de espessura.

12. Bibliografia:

- Allum, C.J., Quintino, M.L. (1984)
Pulsed GMAW, Interactions and Process Parameters - Parts 1 & 2, **Weld. & Metal Fab.**, 52(3) e (4), p. 85-89 e 126-129.
- Cary, H.B. (1994)
Modern Welding Technology, 3ª edição, Regents Pretence-Hall, p. 183-196.
- Goldman, K. (1966)
Electric Arcs in Argon, **Physics of the Welding Arc** [Proc. Conf.], Londres: The Institute of Welding, p. 17-22.
- Jackson, C.E. (1960)
The Science of Arc Welding, **Welding Journal**, 39, p. 129s-140s, 177s-190s, 225s-230s.
- Jones, S.B. (1978)
Procedure selection in submerged arc welding. In: **Submerged Arc Welding**. Cambridge: The Welding Institute, p. 37-42.
- Lancaster, J.F. (1987a)
The Physics of Welding. Part 1: The Electric Arc in Welding, **IEEE Proceedings B**, 134(5), Sept., p. 233-254.
- Lancaster (1987b)
The Physics of Welding. Part 2: Mass Transfer and Heat Flow, **IEEE Proceedings B**, 134(6), Nov., p. 297-316.
- Modenesi, P.J. (1990)
Statistical Modelling of the Narrow Gap Gas Metal Arc Welding Process, PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology.
- Needham, J.C. (1965)
Pulsed Controlled Consumable Electrode Welding Arc, **British Weld. Journal**, 12, pp. 191-197.
- Norrish, J. (1992)
Advanced Welding Processes, IOP, Bristol, 375 p.