

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 2001

SUMÁRIO

	Página
1. Introdução	03
2. Fontes de Energia para a Soldagem por Fusão	03
3. Descargas Elétricas em Gases	06
4. Características Estáticas do Arco	07
5. Perfil Elétrico	09
6. Região Catódica	12
7. Região Anódica	15
8. Coluna de Plasma	15
9. Transferência de Metal de Adição	22
10. Taxa de Fusão de Arame	36
11. Variáveis da Soldagem a Arco	39
12. Bibliografia	53

LISTA DE SÍMBOLOS E CONSTANTES

(com suas unidades usuais)

A_0	Área de contato (m^2)
B	Campo magnético ($\text{weber}/m^2 = N/A.m$)
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 ($A^2.s$)
f	Taxa de alimentação (m/min)
F	Força (N)
I	Corrente elétrica (A)
J	Densidade de corrente (J/m^2)
k	Constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)
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 ($8,31 \text{ J/K mol}$) Raio (m)
t	Tempo (s)
T	Período (s) Temperatura ($^{\circ}C$)
v	Velocidade (m/s)
V	Tensão elétrica (V)
V_0	Tensão de vazio da fonte (V)
V_a	Tensão anódica (V)
V_c	Tensão catódica (V)
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 ($1/sA^2$)
ϵ_0	Permiabilidade do espaço livre ($8,85 \times 10^{-11} \text{ Farad/m}$)
ϕ	Função de trabalho (eV)
γ	Energia superficial (J/m^2)
ρ	Resistividade elétrica ($ohm.m$) Densidade (kg/m^3 ou g/cm^3)
ρ_e	Densidade de carga (C/m^3)
σ	Condutividade elétrica ($ohm^{-1}.m^{-1}$)
μ_0	Permeabilidade magnética ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry/m}$)
ΔG	Energia Livre (J/mol)

Introdução à Física do Arco Elétrico

1. Introdução:

O arco elétrico é a fonte de calor mais comumente utilizada na soldagem de materiais metálicos por fusão, pois apresenta uma combinação ótima de características, incluindo uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de 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. Este documento apresenta uma descrição geral das características do arco elétrico, em particular aquelas importantes para a sua aplicação em soldagem. 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 a solda será realizada) 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) aquecendo o material próximo 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, o calor se difunde rapidamente para o restante da peça, resfriando e dificultando a fusão da região de contato e afetando termicamente regiões vizinhas.

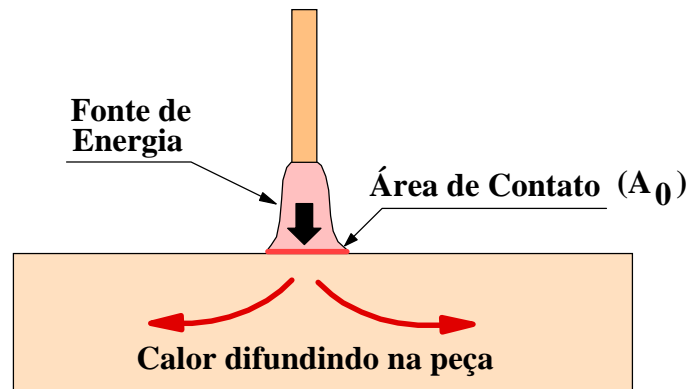


Figura 2.1 - Fluxo geral de calor na soldagem por fusão.

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

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

onde, E é a quantidade de energia gerada pela fonte, η é o rendimento térmico da fonte (a fração da energia que é transferida para a peça) e t é o tempo. No caso de fontes elétricas, como o arco, a energia gerada por unidade de tempo é dada pelo produto da tensão V e a corrente I . Assim, para estes processos, a equação de potência específica se torna:

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

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

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

Para ser usada na soldagem por fusão, uma fonte deve ter uma potência específica entre cerca de 10^6 e 10^{13} W/m². 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, 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.

A intensidade da fonte influencia o formato da poça de fusão, a sua penetração no metal de base e, desta forma, pode ter um importante efeito sobre a produtividade do processo. A figura 2.2 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), destacando-se a espessura da junta e a condutividade térmica do material. Neste sentido, por exemplo, a formação da poça de fusão no cobre (metal de alta condutividade térmica) tende a ser muito mais difícil do que no aço. A tabela I lista fontes de energia comumente usadas na soldagem por fusão.

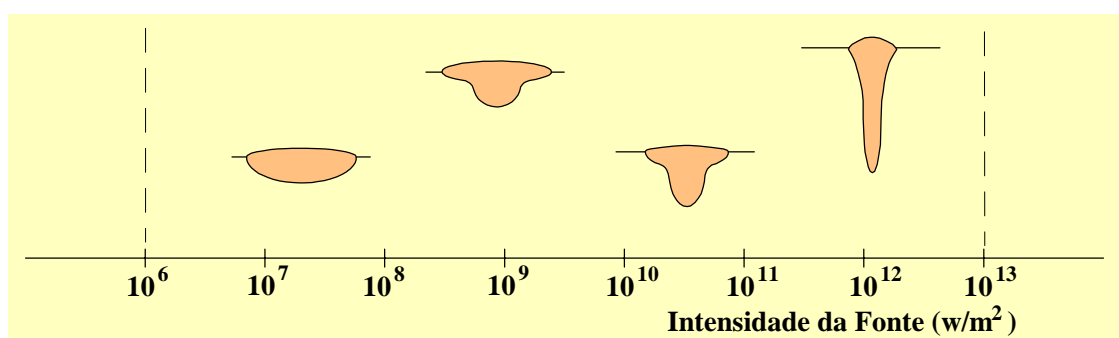


Figura 2.2 – Relação esquemática entre intensidade da fonte e formato do cordão.

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 10V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um valor mínimo de cerca de 100mA". 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 1000A 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 1A ou inferiores são usadas na soldagem com microplasma.

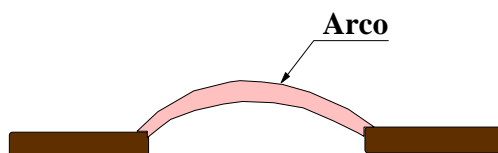


Figura 3.1 - Formato curvo de um arco livre entre eletrodos verticais.

Em soldagem, o arco normalmente ocorre entre um eletrodo cilíndrico e um plano (a peça), dando a esse um formato típico de tronco de cone. 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 3.2).

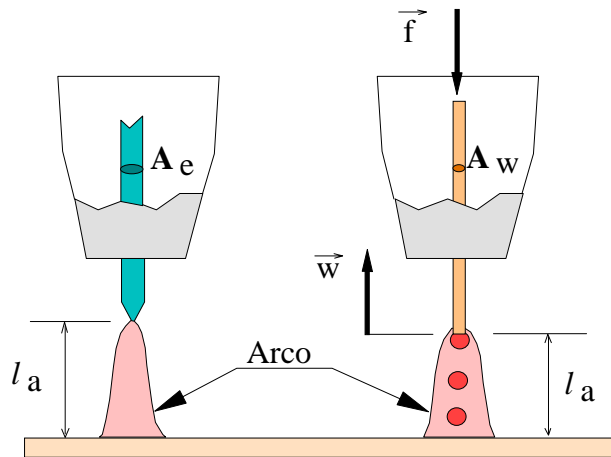


Figura 3.2 - Diferenças entre um processo de soldagem com eletrodo não consumível (esquerda) e eletrodo consumível (direita). l_a - comprimento do arco, f - velocidade de alimentação do arame (eletrodo), w - velocidade de fusão, A_e - área do eletrodo de tungstênio e A_w - área do arame (eletrodo).

4. Características Estáticas do Arco:

Curva característica é a relação entre os valores médios de tensão e corrente para um dado comprimento de arco. A figura 4.1 mostra curvas características para o processo GTAW para diferentes comprimentos de arco. A curva característica do arco difere muito da de uma resistência comum, para a qual vale a Lei de Ohm ($V = Ri$), que tem o formato de uma reta passando pela origem. Por sua vez, a curva do arco passa por valor mínimo de tensão para valores intermediários de corrente e aumenta tanto para maiores como menores correntes. A posição e formato da curva dependem do tamanho,

geometria e material e temperatura dos eletrodos, da composição e da pressão do gás de proteção e do comprimento do arco (l_a).

Um maior comprimento do arco desloca a curva para maiores valores de tensão e a relação entre l_a e V , para uma dada corrente, é aproximadamente linear (figura 4.2). O material do cátodo (isto é, o eletrodo negativo) tem grande importância sobre a curva característica. No processo GTAW, a adição de pequenas quantidades de óxido de metais como o tório, cério e tântalo modifica as condições de emissão de elétrons no cátodo de tungstênio e reduz a tensão em cerca de 1 a 2V. Por outro lado, quando o cátodo é de um metal não refratário (aço, alumínio, etc.), a tensão do arco é cerca de 10V maior que no caso anterior (ver seção 6).

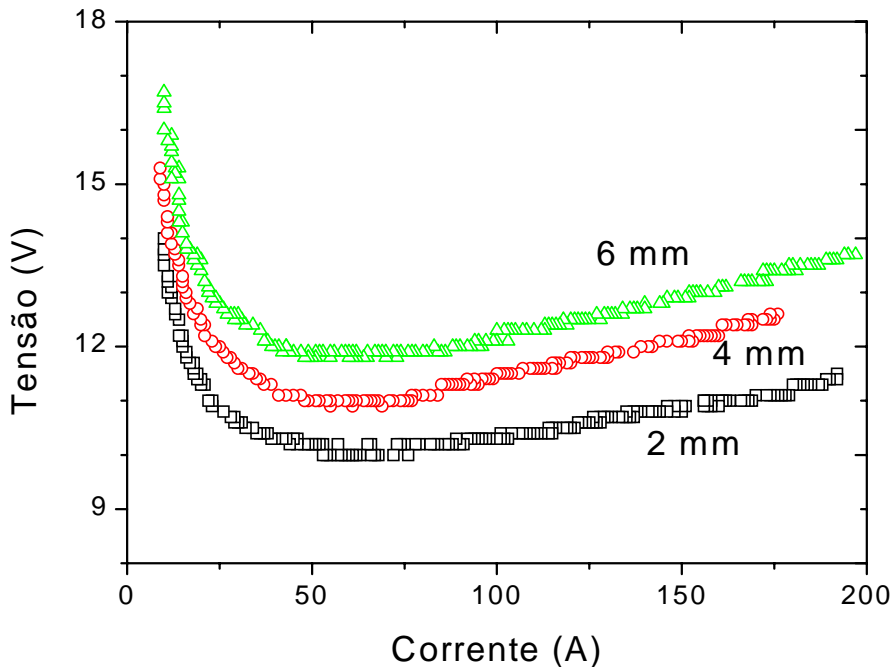


Figura 4.1 - Curvas características do arco GTAW para diferentes comprimentos de arco.

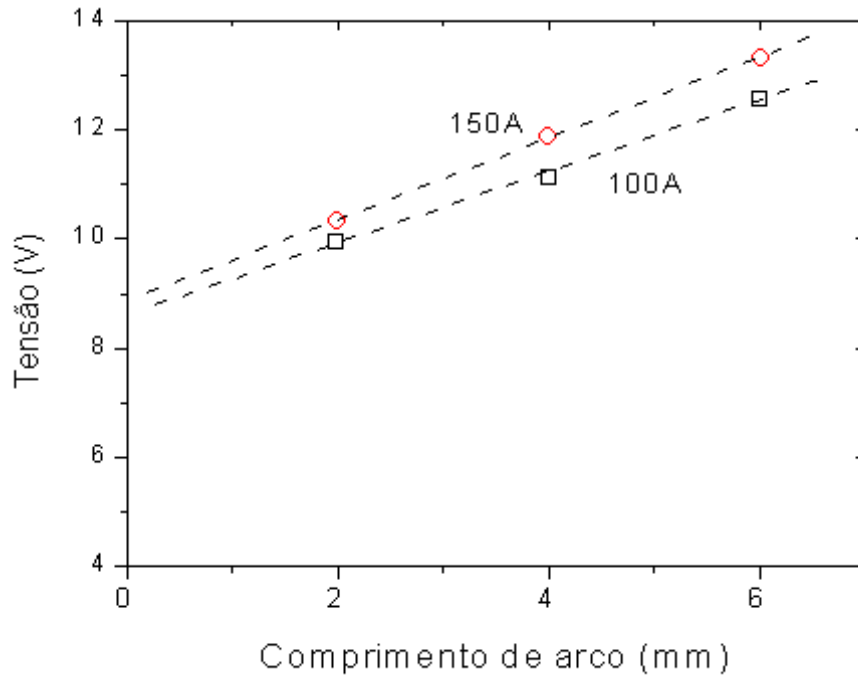


Figura 4.2 – Relação entre tensão e comprimento de arco (dados da figura 4.1).

Na soldagem com eletrodo consumível, a determinação da curva característica é mais complicada pois l_a depende do balanço entre as taxas de alimentação e fusão do eletrodo (figura 3.2) e a sua determinação pode ser difícil devido ao formato variável da ponta do eletrodo. Existem resultados, contudo, que indicam que a forma da curva característica do arco nestes processos é similar à obtida com eletrodos não consumíveis.

5. Perfil Elétrico:

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

$$V = RI \quad \text{e} \quad R = \rho x / A, \quad \text{assim:}$$

$$V = (\rho I / A)x = k x$$

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

O mesmo não acontece ao longo de um arco elétrico, existindo quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo) que atingem entre 1 e 20V (figura 5.1).

Baseado na variação de tensão ao longo do arco, este pode ser dividido em três regiões principais:

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

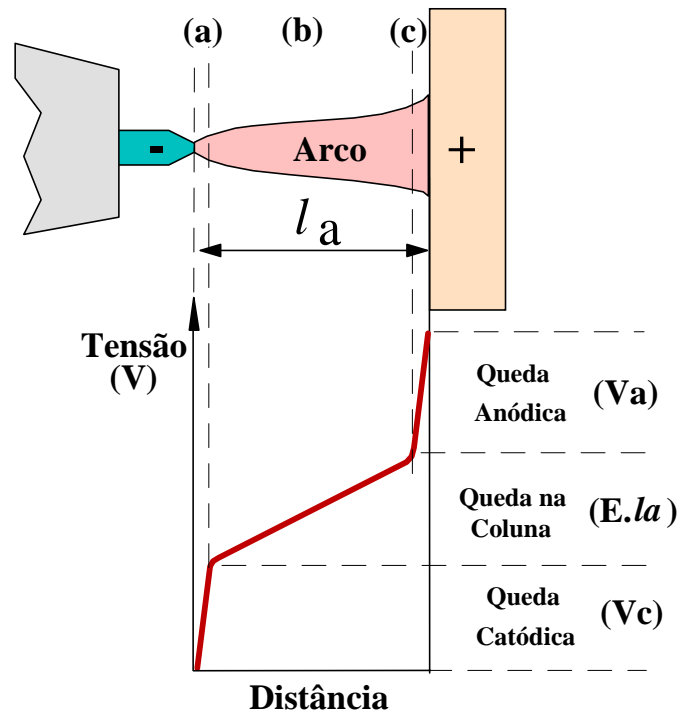


Figura 5.1 - Distribuição de potencial em um arco e suas regiões: (a) Zona de Queda Catódica, (b) Coluna do Arco e (c) Zona de Queda Anódica (esquemático).

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 junto aos eletrodos, com espessuras da ordem de 10^{-2} a 10^{-3} mm! Em soldagem, a queda de tensão na região anódica (V_A) vale entre 1 e 10V e a catódica (V_C), entre 1 e 15 V (os valores menores correspondem a um cátodo de tungstênio). As quedas de tensão junto aos eletrodos são aproximadamente independentes do comprimento do arco e variam pouco com a corrente.

A queda de tensão na coluna de plasma é aproximadamente proporcional a l_a ($V_{CP} \approx E \cdot l_a$). E é o campo elétrico na coluna e depende da composição do gás do plasma. Na soldagem GTAW, E vale cerca de 800 a 1000V/m com proteção de argônio e 1500 a 1800V/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 :

$$V = (V_C + V_A) + E \cdot l_a \quad (3)$$

As principais características das regiões do arco são:

- Regiões de Queda:
 - (a) Elevado gradiente (campo) elétrico:
 - Catodo $\approx 10^8$ V/m
 - Anodo $\approx 10^6$ - 10^7 V/m.
 - (b) Elevado gradiente térmico $\approx 10^5$ - 10^6 °K/m
 - (c) Contração (aumento da densidade de corrente em relação à coluna de plasma):
 - Catodo $\approx 10^6$ - 10^{14} A/m²
 - Anodo $\approx 10^6$ - 10^9 A/m²

- Coluna de Plasma:
 - Altas temperaturas (suficiente para ionizar o gás irá formar o plasma),
 - Equilíbrio térmico (mesma energia cinética média de seus constituintes),
 - Equilíbrio elétrico (mesmo número de cargas elétricas positivas e negativas) e
 - Fluxo de gases (estes são acelerados por forças de origem eletromagnéticas).

A tabela II (Jackson, 1960) ilustra valores comuns para as quedas de potencial das diferentes regiões do arco GTAW.

Tabela II - Valores de tensão típicos no processo GTAW (eletrodo negativo).

Corrente (A)	l_a (mm)	$V_A + V_C$ (V)	V_{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: V_a - Tensão na queda anódica

V_c - Tensão na queda catódica

V_{CP} - Tensão na coluna de plasma

6. Região de Queda Catódica:

Embora o seu volume seja desprezível em comparação com a coluna, a região catódica é extremamente importante para a existência do arco, pois ela é responsável pelo fornecimento da maioria dos elétrons responsáveis pela condução da corrente no arco. Na soldagem com corrente alternada (AC), na qual o arco se apaga a cada mudança de polaridade dos eletrodos, os processos ocorrendo no cátodo são importantes para a reabertura do arco. Assim, as condições de operação desta região são fundamentais para o funcionamento do arco.

O cátodo precisa emitir uma grande quantidade de elétrons, pois estes conduzem mais de 90% da carga elétrica através do arco (embora o arco seja constituído de elétrons e ions positivos, os primeiros apresentam uma mobilidade muito maior que os ions devido à sua massa muito menor). Os elétrons podem ser emitidos por diferentes mecanismos. Em soldagem, os mais importantes são a **emissão termiônica**, em cátodos de material refratário, com o tungstênio e o carbono, e os mecanismos de **emissão a frio**, nos processos com eletrodo consumível.

A emissão termiônica ocorre, basicamente, do aquecimento do material 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 é estimada pela **equação empírica de Richardson-Dushman**:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (4)$$

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

Tabela III - Função termiônica de trabalho 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

Para emitir elétrons por este mecanismo em quantidades adequadas para o arco, o cátodo deve ser aquecido a temperaturas superiores a cerca de 3500K, o que torna este mecanismo viável apenas com eletrodos de materiais refratários, em particular com o tungstênio. Na soldagem com eletrodos consumíveis ou na soldagem GTAW com o eletrodo positivo (isto é, a peça sendo o cátodo), o cátodo não pode atingir temperaturas suficientemente altas e mecanismos alternativos de emissão de elétrons devem operar para explicar as densidades de corrente observadas no arco.

Na soldagem 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 3500K). Este mecanismo não é completamente conhecido, mas

parece envolver a formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxido pela adsorção de ions positivos, a formação de filetes condutores 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 (figura 6.2). Na soldagem GMAW de aços, este efeito pode reduzir a estabilidade do processo quando as camadas de óxido próximas da poça de fusão são consumidas e o arco tende a se desviar para longe desta em busca de novas regiões para a emissão de elétrons. Para regenerar a camada de óxido e, assim, eliminar este efeito, uma quantidade de um gás oxidante (O_2 ou CO_2) é adicionado à mistura de proteção para a soldagem GMAW de aços.

A emissão a frio exige uma maior diferença de potencial na região de queda catódica. Assim, enquanto, na soldagem GTAW com eletrodo negativo (emissão termiônica), a tensão do arco atinge cerca de 10V, na soldagem GMAW (emissão a frio), a tensão fica em torno de 20V. O principal fator responsável por esta diferença de valor é o mecanismo de emissão de elétrons atuando em cada caso.

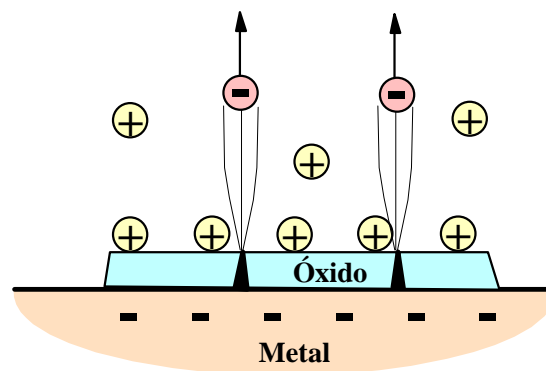


Figura 6.1 - Representação esquemática do mecanismo de emissão de elétrons a frio assistido por camadas de óxido na superfície do cátodo.

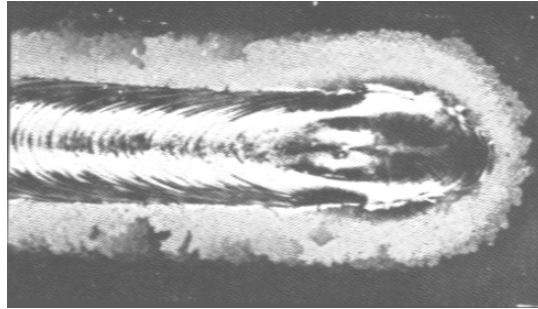


Figura 6.2 – Superfície de uma solda em alumínio mostrando a região de limpeza catódica.

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 ions positivos (que são criados por ionização térmica na coluna do arco) e assim, há uma maior concentração de elétrons (cargas negativas), o que causa a sua queda de tensão nesta região.

Resultados indicam um valor entre 1 e 10V para a tensão de queda anódica, com valores entre 1 e 4V sendo mais comuns para condições de soldagem. Valores típicos são 2 e 4V 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), ions 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 o movimento 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:



Uma relação entre o grau de dissociação (x = fração das moléculas de G_2 que foram dissociadas) de um gás diatômico e a temperatura pode ser obtida de considerações termodinâmicas:

$$\frac{4x^2}{1-x^2} \frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{\Delta G_0}{RT}\right) \quad (7)$$

onde ΔG_0 é a energia livre de dissociação, R é a constante dos gases e T é a temperatura.

Uma estimativa da variação do grau de ionização (α = fração de átomos G que foram ionizados) com a temperatura pode ser feita pela **equação de Saha**:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} \frac{p}{p_0} = CT^{5/2} \exp\left(-\frac{eV_I}{kT}\right) \quad (8)$$

O valor da constante C pode ser derivado a partir da termodinâmica estatística, e é a carga do elétron e V_I é o potencial de ionização do elemento (tabela IV).

As duas equações anteriores indicam uma forte influência, tanto para a dissociação como para a ionização, da temperatura e da "força motriz" (ΔG_0 ou V_I). A figura 8.1 mostra a composição de equilíbrio do plasma de argônio em função da temperatura.

Um menor valor de V_I resulta em uma maior ionização a uma dada temperatura. Como o número de portadores de carga é proporcional a α , plasmas com elementos de baixo V_I , como vapores metálicos, podem ter um grau de ionização suficiente para manter a corrente do arco a temperaturas mais baixas. Isto favorece uma melhor estabilidade, maior facilidade de abertura do arco e em menores tensões de operação para um dado comprimento do arco. Deve-se enfatizar, contudo, que o comportamento global do arco depende de diversos outros fatores como as condições de dissipação de energia no arco e as características das regiões de queda. Assim, nem sempre a adição de um elemento de menor potencial de ionização (por exemplo, o hidrogênio) resulta em uma maior estabilidade ou menor tensão de operação.

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

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	

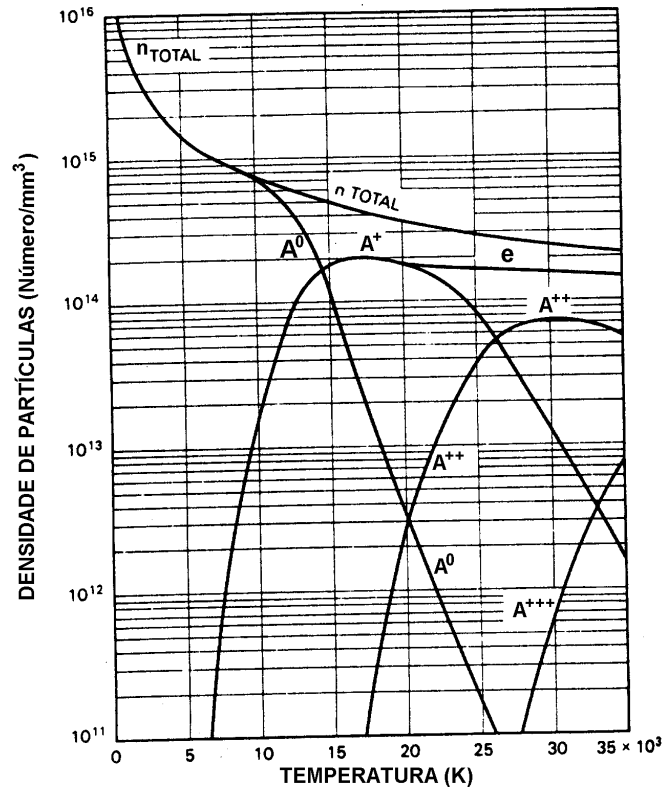


Figura 8.1 - Composição do plasma de argônio em função da temperatura.

Uma característica importante do arco elétrico na 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).

Uma 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 constituintes do arco é suficiente 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.

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 6.500K na soldagem com eletrodos revestidos e atingem até 10.000 a 30.000K na soldagem GTAW, GMAW e plasma. A figura 8.2 ilustra a distribuição de temperatura no arco GTAW.

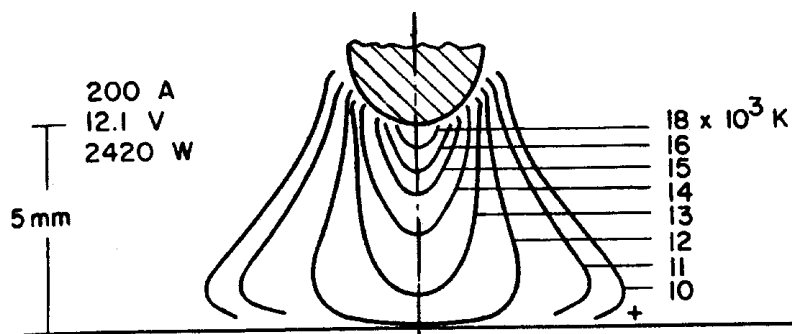


Figura 8.2 - Isotermas no arco GTAW em argônio.

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, existe uma pressão (**P**) resultante da interação entre a corrente (**I**) e o campo magnético (**B**) induzido pela mesma em torno do condutor (figura 8.3):

$$P = P_a + \frac{\mu_0 \cdot I J}{4\pi} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (9)$$

onde **P_a** é a pressão atmosférica, **μ₀** ($4\pi \cdot 10^{-7}$ henry/m) é a permeabilidade magnética **J** é a densidade da corrente ($I / \pi R^2$) e **R** é o raio do condutor.

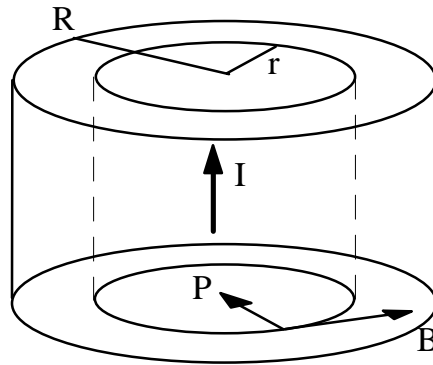


Figura 8.3 - Campo magnético no interior de um condutor cilíndrico. B – indução magnética.

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

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

Jato de Plasma: 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. Esta forma faz com que a densidade de corrente (J) da região próxima do eletrodo seja maior e, desta forma, a pressão de origem magnética (equação 9) fica maior junto eletrodo, causando a aceleração dos gases nesta região em direção à peça.

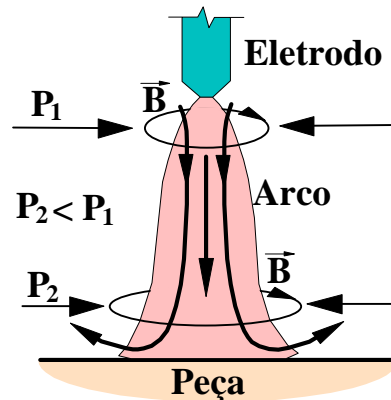


Figura 8.4 - Representação esquemática da formação do jato de plasma.

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, a força magnética passa a possuir uma componente transversal que tende a empurrar lateralmente o arco (como se este estivesse sendo soprado). Este efeito, sopro magnético, dificulta a soldagem e aumenta 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 e uma distribuição assimétrica de material ferromagnético em torno do arco. Este efeitos ocorrem, quando a corrente passa do arco para a peça e muda bruscamente de direção (figura 8.5), na soldagem junto da borda de peças de aço (material ferromagnético) ou na soldagem de peças de aço com espessuras diferentes. O sopro magnético pode ser minimizado por medidas como:

- Inclinarm o eletrodo para o lado que se dirige o arco,
- Reduzir 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.

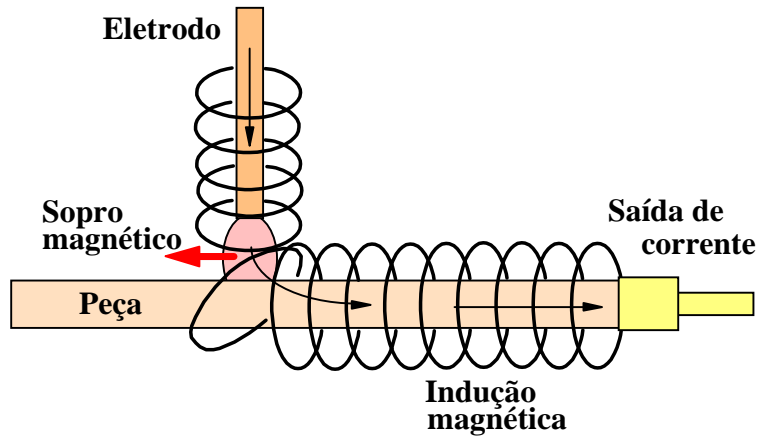


Figura 8.5 – Sopro magnético causado por mudança brusca na direção da corrente.

9. Transferência de Metal de Adição:

9.1. 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 9.1.

Tabela V - 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. Aerossol (Spray)	
1.2.1. Projetado (Projected)	GMAW - corrente intermediária
1.2.2. Em Fluxo (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

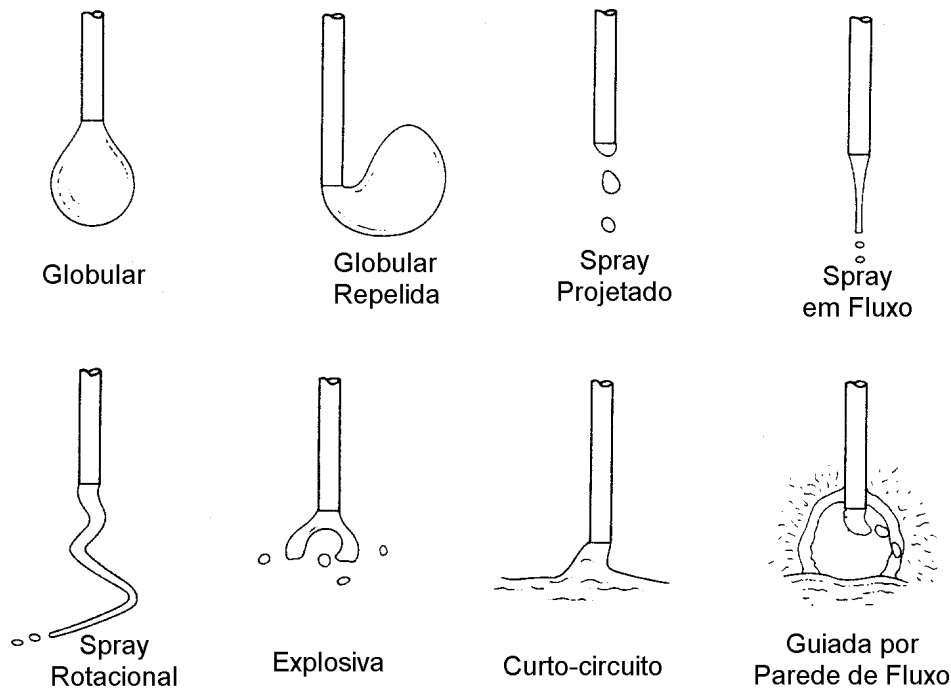


Figura 9.1 - Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW.

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.

9.2. 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" ou Aerossol. Formas derivadas destas são citadas na literatura, por exemplo, a transferência globular repulsiva e diferentes formas da transferência spray (tabela V).

A figura 9.2 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.

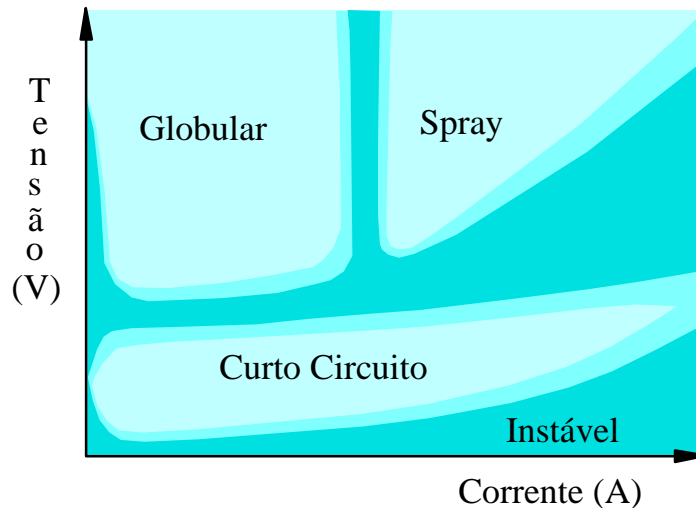


Figura 9.2 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW com um gás de proteção a base de argônio (esquemático).

- **Transferência por Curto Circuito:**

A transferência por curto circuito ocorre na soldagem com um pequeno comprimento do arco (baixa tensão) e, em geral, 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 9.3 ilustra o processo acima, juntamente as variações de corrente e tensão típicas deste 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.

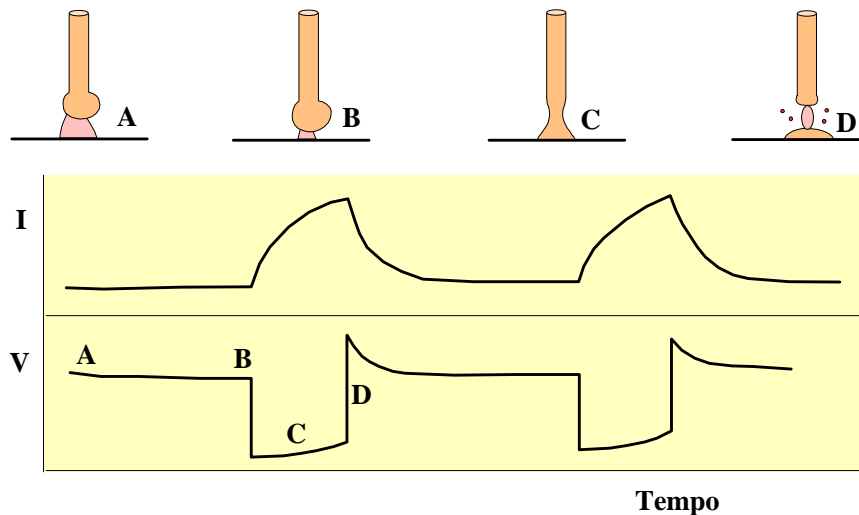


Figura 9.3 - Transferência por curto circuito

Cerca de 20 a 200 curtos ocorrem por segundo neste tipo de transferência. 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. As máquinas para soldagem GMAW possuem um controle (“indutância”) que é ajustado para controlar a velocidade de elevação da corrente e, assim, otimizar a ruptura do material ao final do 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 9.4 mostra um oscilograma de corrente e tensão associada com a transferência por curto circuitos (comparar com a figura 9.3).

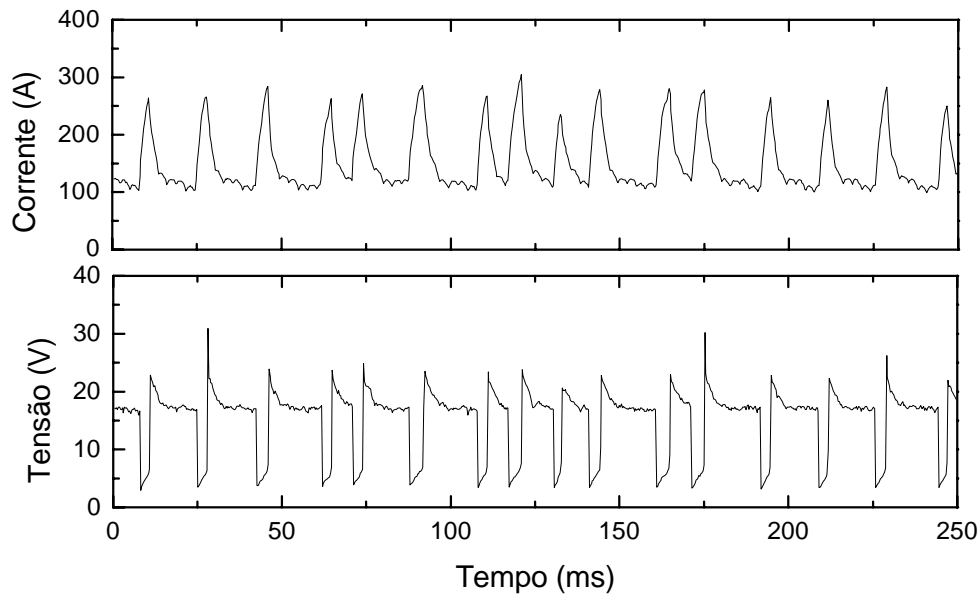


Figura 9.4 - Oscilograma da transferência por curto circuitos para um arame de aço inoxidável (AWS E308) de 1,0 mm de diâmetro. Gás: Ar-2%O₂.

- **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 causa a sua separação do arame e a transferência para a poça de fusão ocorre por ação da gravidade. 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 9.5.

Na soldagem GMAW com eletrodo negativo ou com proteção de CO_2 , 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 repelida** (ou **repulsiva**) e está associada com forças de reação pela geração de vapores ou do plasma em uma pequena região da gota (figura 9.6). 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.

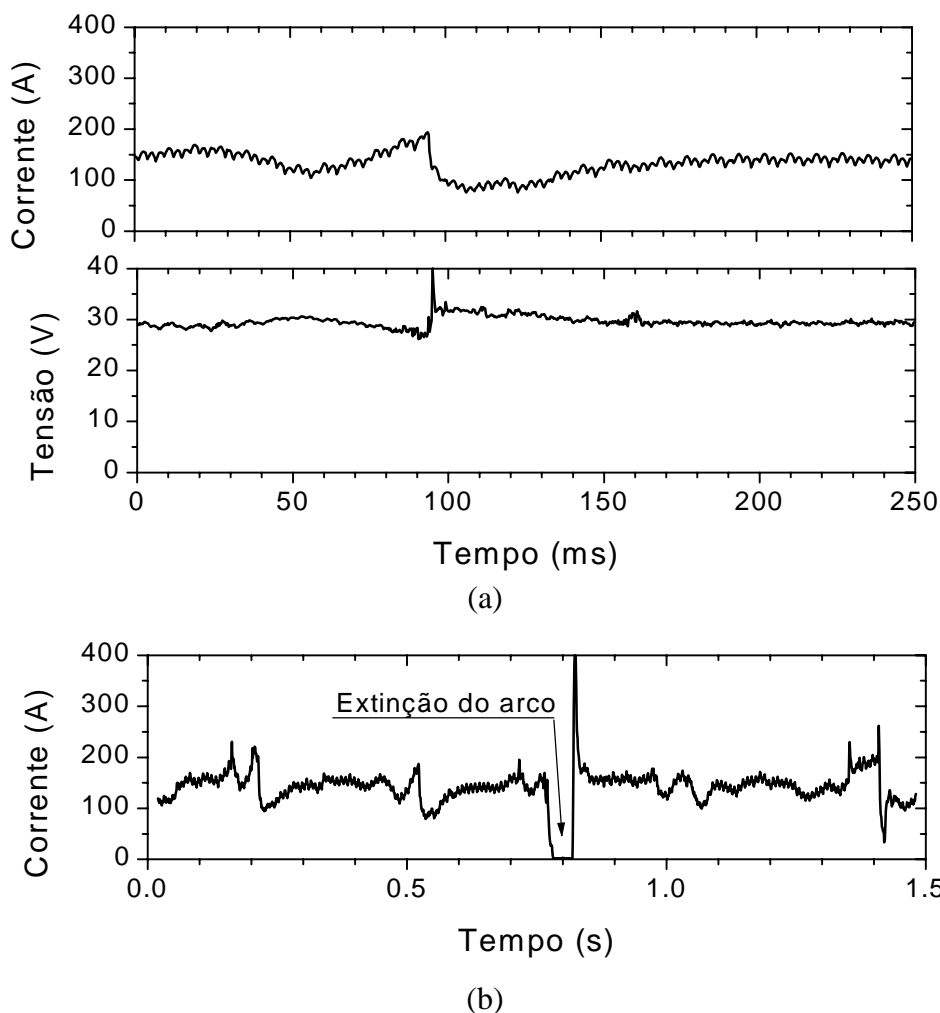


Figura 9.6 - Oscilograma de corrente de um processo com transferência globular em: (a) 250ms e (b) 1,5s. Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro. Gás: CO_2 .

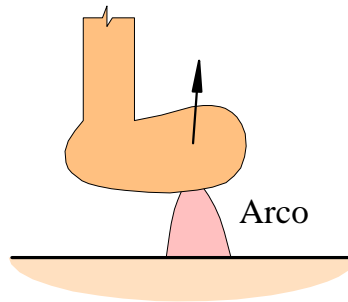


Figura 9.5 - Transferência globular repulsiva.

- **Transferência Spray:**

Observa-se que, quando a mistura de proteção é rica em argônio e o eletrodo está ligado ao 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**), contudo, ocorre uma rápida redução do diâmetro das gotas ao mesmo tempo que o arco, que antes atingia 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 de 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.

A transferência spray é característica da soldagem GMAW com proteção rica em argônio e com o eletrodo positivo. Na soldagem dos aços, adições de CO_2 ao gás de proteção aumentam I_c até que, acima de cerca de 30% de CO_2 , esta forma de transferência não é mais observada. Adições de O_2 ao argônio reduzem I_c até cerca de

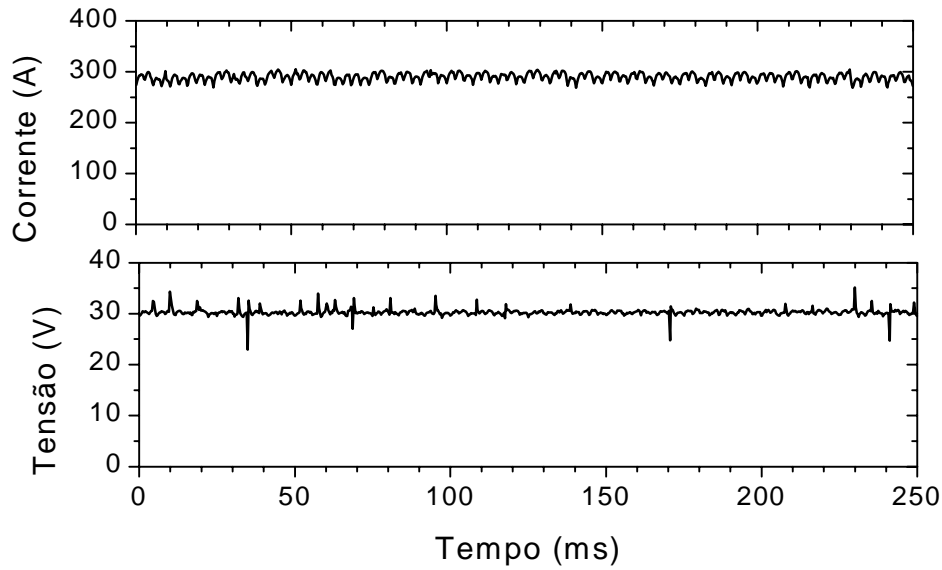
5% de O₂ quando, então, I_C passa a aumentar. Adições de nitrogênio e hélio também dificultam a transferência spray. Para teores de até 75% de He, a transferência spray ainda ocorre na soldagem de aço com misturas ternárias Ar-He-2%O₂ (Modenesi, 1990), não ocorrendo, contudo, para uma mistura He-2%O₂. Oscilogramas típicos da transferência spray no processo GMAW são mostrados na figura 9.7.

Tabela VI - Corrente de transição para arames de aço e alumínio com diferentes diâmetros.

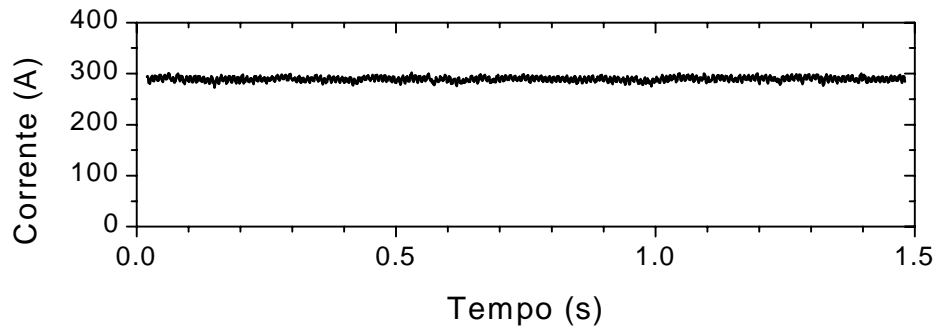
Diâmetro Do arame (mm)	Corrente de Transição (A)		
	Aço carbono (Ar+2%O ₂)	Aço Inoxidável (Ar+2%O ₂)	Alumínio (Ar)
0,8	160		90
1,0	185	170	100
1,2	220	225	120
1,6	275	285	170

- **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.



(a)



(b)

Figura 9.7 - 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.

No início da década de 60, pesquisadores do The Welding Institute (Inglaterra) mostraram que é possível obter transferência do tipo spray com o uso de uma corrente variável cujo valor médio era inferior a I_c mas que passava por picos acima de I_c (Needham, 1965). A figura 9.8 ilustra a corrente pulsada e mostra os parâmetros que a definem. Com base nestes, pode-se definir a corrente média de soldagem como:

$$I_M = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (10)$$

e o parâmetro de destacamento (D) como:

$$D = I_p^2 t_p \quad (11)$$

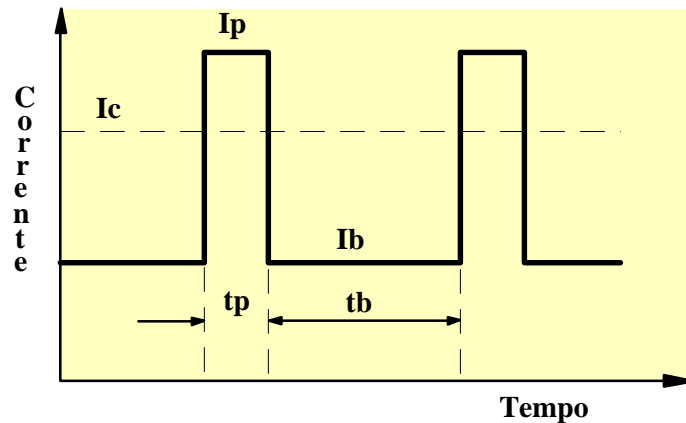


Figura 9.8 - (a) Representação esquemática da pulsação de corrente: I_p - corrente de pico, I_b - corrente de base, t_p - tempo de pico e t_b - tempo de base.

Este último parâmetro (D) define condições para a obtenção de uma transferência spray adequada para uma corrente média inferior a I_C e depende da composição e diâmetro do eletrodo e do gás de proteção. Para arames de aço carbono de 1,2mm de diâmetro, por exemplo, condições ótimas para a transferências pulsada ocorrem para $D \approx 500A^2s$.

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 regulagem. 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, inclusive inferiores à corrente de transição, 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.

9.3. Outros Processos de Soldagem:

- **Eletrodos Revestidos:** Basicamente as mesmas formas de transferência discutidas anteriormente ocorrem neste processo. Contudo, o processo é mais complicado pela presença do fluxo e a densidade de corrente usada é, em geral, menor. O tipo de fluxo do eletrodo controla a sua forma de transferência (a) afetando a composição e propriedades físicas do metal fundido (tensão superficial, por exemplo), (b) determinando em grande parte as características do arco elétrico e (c) criando, em alguns tipos de eletrodo, uma cavidade que ajuda a direcionar o metal de adição para a poça de fusão (figura 9.9). 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.

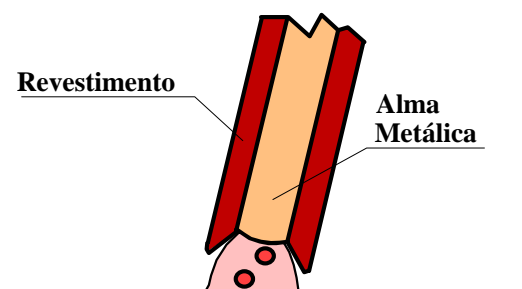


Figura 9.9 - Cavidade formada em eletrodos com revestimentos refratários.

- **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, a composição do fluxo influencia 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 9.10 (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 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.

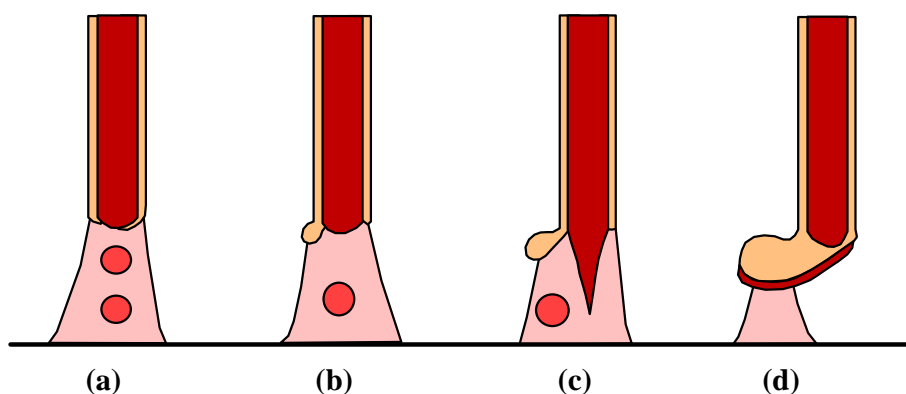


Figura 9.10 - Formas típicas de transferência na soldagem com arames tubulares. Arames: (a) "metal cored", (b) rutílico, (c) básico e (d) auto-protegido.

9.4. 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 9.11):

- 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).

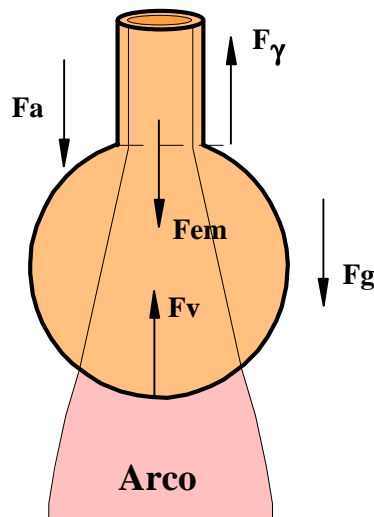


Figura 9.11 - Balanço de forças na ponta do eletrodo. F_g - força gravitacional, F_{em} - força eletromagnética, F_γ - força de tensão superficial, F_a - força de arraste e F_v - força de reação.

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 9.11, o destacamento da gota ocorrerá quando:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \quad (12)$$

10. Velocidade de Fusão de Arame:

Na soldagem a arco com eletrodo consumível, este é fundido a uma velocidade que deve ser, para o processo funcionar de forma adequada, igual à velocidade com que ele é alimentado. Nos processos GMAW, FCAW e SAW, um estado estacionário é atingido no qual o comprimento do eletrodo ("stickout") é mantido relativamente constante, enquanto, no processo SMAW, o stickout varia continuamente com o consumo do eletrodo. A **velocidade de fusão** de arame controla a quantidade de metal 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 por resistência elétrica) ao longo do eletrodo. Considerando estes dois efeitos pode-se mostrar que a velocidade de fusão do arame pode ser representada, para os processos GMAW, FCAW e SAW, pela equação:

$$w = \alpha i + \beta si^2 \quad (13)$$

onde w é a velocidade de fusão, α e β são, respectivamente, coeficientes ligados ao aquecimento do eletrodo pelo arco e por efeito Joule, s é o comprimento do eletrodo ("stickout") e i é a corrente. A tabela VII mostra valores de α e β obtidos experimentalmente para arames de aço carbono. A figura 10.1 mostra a curvas típicas de w para o processo GMAW com arames de diferentes materiais e bitolas.

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

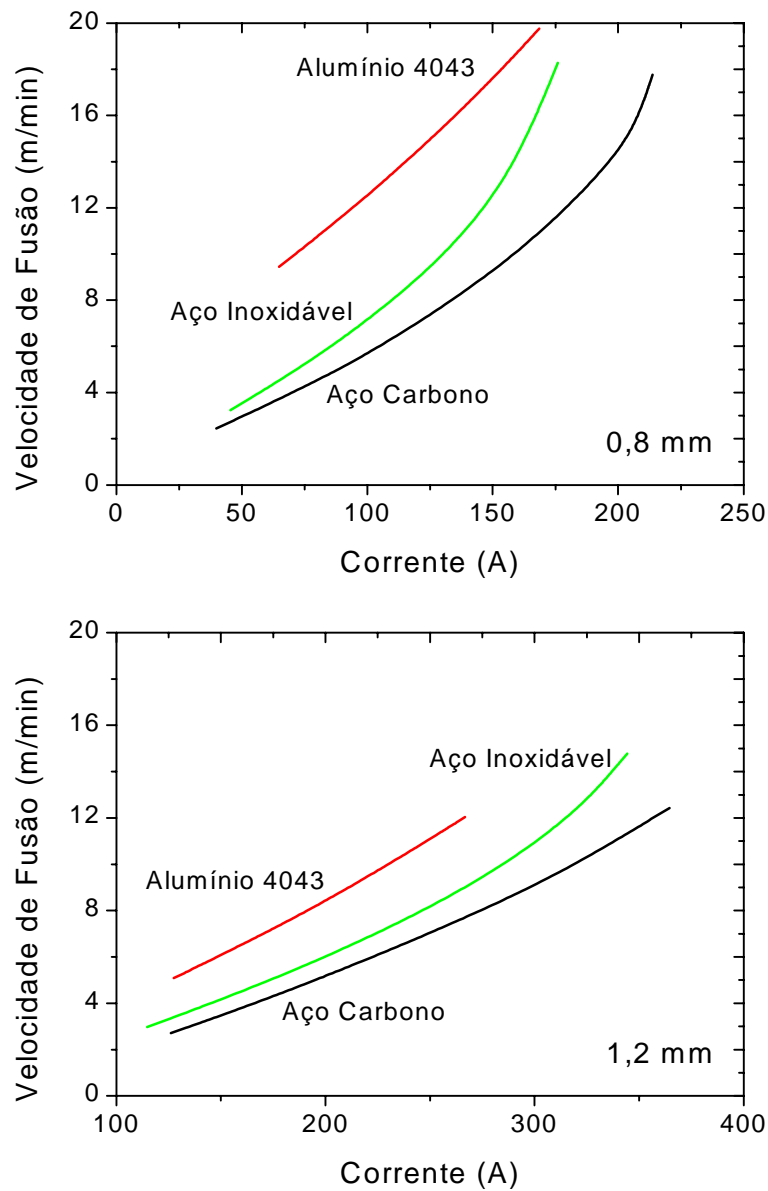


Figura 10.1 – Curvas de velocidade de fusão para arames de 0,8 e 1,2mm.

A velocidade de fusão pode ser alternativamente expressa 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:

$$w_m = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \rho w \quad (14)$$

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

$$z_m = \varphi w_m \quad (15)$$

onde φ é a eficiência de deposição.

A figura 10.2 mostra intervalos típicos da taxa de deposição para alguns processos de soldagem. Diferentes técnicas podem ser usadas para aumentar estes intervalos. 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”).

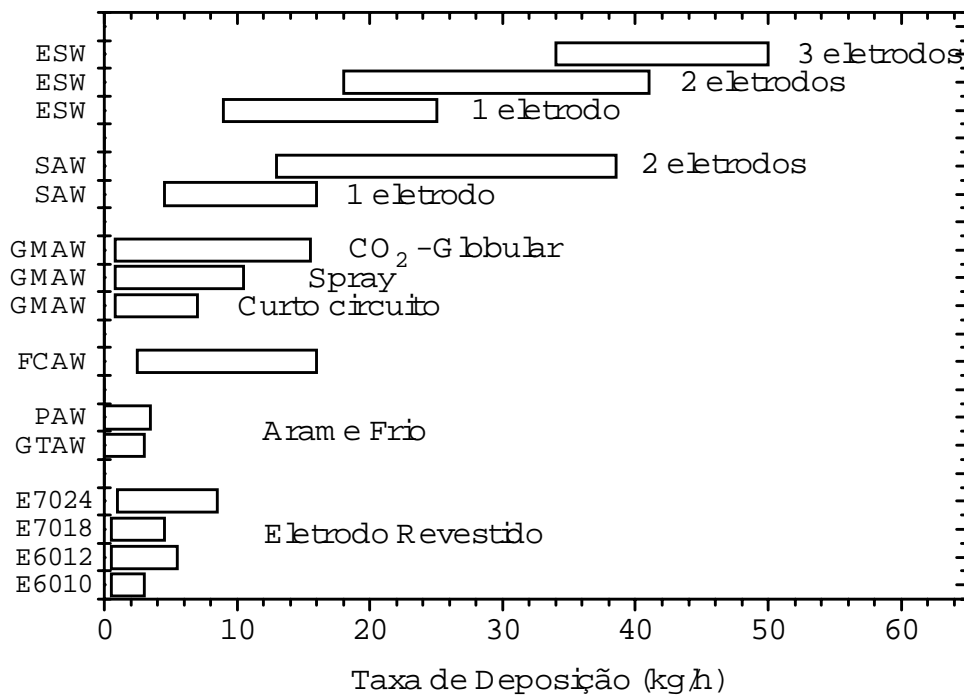


Figura 10.2 - Taxas de deposição comuns de alguns processos de soldagem (Cary, 1994).

11. Variáveis da Soldagem a Arco

11.1. 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. Por outro lado, na soldagem mecanizada, a capacidade de realizar este tipo de ajuste é muito mais limitada. Além disso, em ambos os casos, diversos outros fatores, como o tipo de eletrodo, o seu diâmetro, tipo/polaridade da corrente, precisam ser selecionados antes da soldagem.

Esta seção discute as principais variáveis de um processo de soldagem e a sua influência no formato 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 11.1),
- Velocidade de deslocamento,
- Velocidade de alimentação de metal de adição,
- Composição e diâmetro do eletrodo,
- Comprimento do eletrodo (“stickout”), figura 11.1,
- Distância do ponto de tomada de corrente à peça (figura 11.1),

- 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 aspectos mais gerais do processo como a sequência de deposição de passes (figura 11.2) e a de soldagem que 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 descontinuidades (mordeduras, inclusões de escória, falta de fusão, etc.) no cordão.

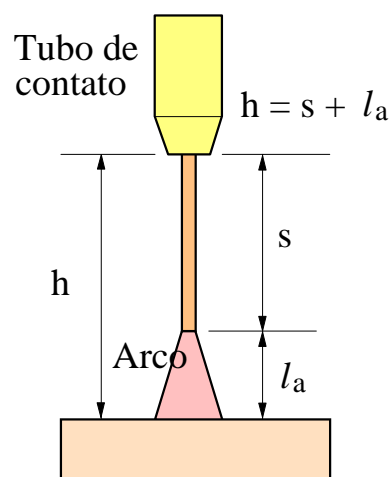
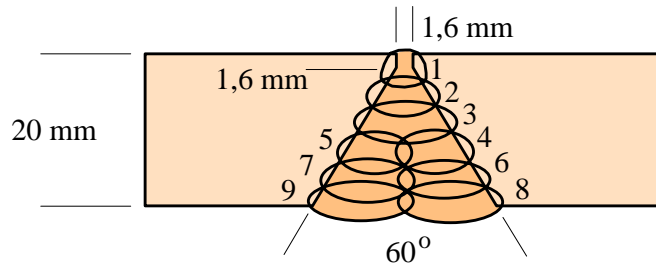


Figura 11.1 - Distância do ponto de tomada de corrente à peça (h), “stickout” (s) e comprimento de arco (l_a)



Processo: SMAW		
Posição: Sobre-cabeça		
Passo	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 11.2 - 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 pela inter-relação entre as 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 em que a operação é estável depende do nível de corrente de soldagem (figura 11.3). 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 para uma dada aplicação pode ser difícil e diferentes soluções podem existir. Em geral, as condições de soldagem são selecionadas de forma empírica, com base na experiência prática, e auxiliada com testes prévios. Em 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 sistema de especificação e qualificação de procedimentos de soldagem.

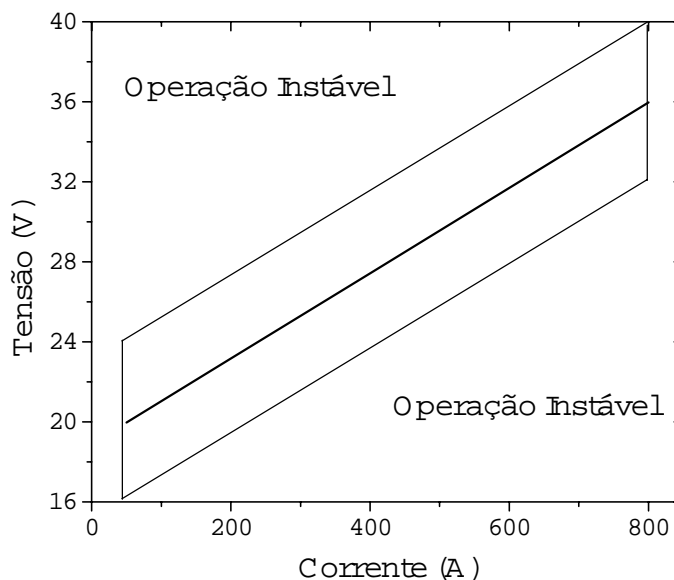


Figura 11.3 - Relação entre a corrente e tensão na soldagem SAW com CC+ (esquemática).

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 \geq 50A CC+ ou -	2,5	60 - 100
		3,2	80 - 150
		4,0	105 - 205
E7018 Básico	CA \geq 70A CC+	5,0	155 - 300
		2,5	65 - 105
		3,2	110 - 150
		4,0	140 - 195
		5,0	185 - 270

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

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:

$$H_{IN} = VI = V_C I + V_A I + E l_a I$$

A figura 11.4 mostra um modelo simplificado 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. O calor gerado na coluna do arco se difunde principalmente na direção radial para o ambiente. Assim, a potência específica (P_{esp}) do arco pode ser definida como:

$$P_{esp} = \frac{Q_{RQ}}{A_0} \quad (16)$$

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.

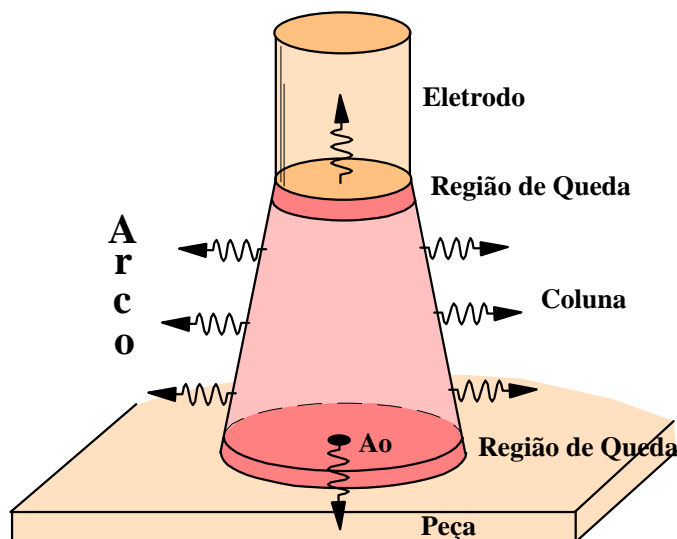


Figura 11.4 - Representação simplificada das direções dominantes de fluxo de calor nas diferentes regiões do arco

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 ($Q_V = V_C I$) menos a energia necessária para a emissão dos elétrons ($Q_\phi = \phi I$, onde ϕ é a função de 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:

$$Q_C = -Q_T + Q_V - Q_\phi \quad (17)$$

ou

$$Q_C \approx I \left(-\frac{3kT}{2e} + V_C - \phi \right) \quad (18)$$

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:

$$Q_A = Q_T + Q_V + Q_\phi \quad (19)$$

isto é:

$$Q_A \approx I \left(\frac{3kT}{2e} + V_A + \phi \right) \quad (20)$$

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):

$$Q_r = El_a \cdot I \quad (21)$$

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 11.4). 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 11.5). 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.

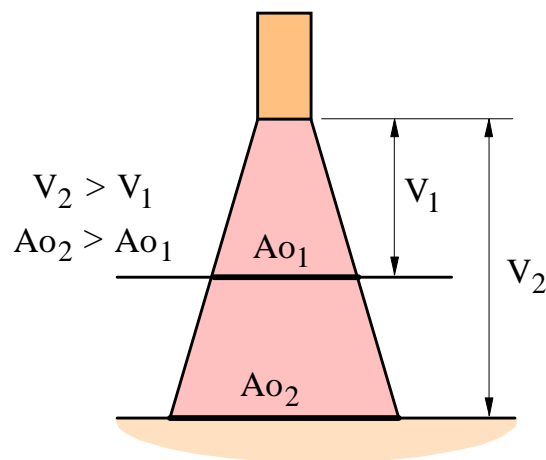


Figura 11.5 - Relação entre a tensão do arco e a largura e área do contato do arco com a peça.

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, $V_C \approx 14\text{V}$), 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 11.6).

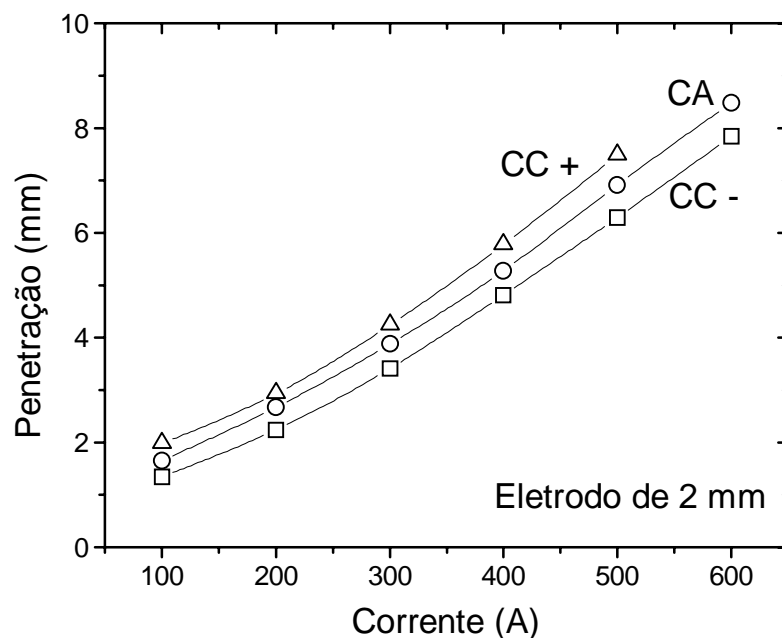


Figura 11.6 - Exemplo do efeito do tipo e nível da corrente na penetração da solda (processo SAW).

Na soldagem GTAW, operando com CC-, a emissão de elétrons no eletrodo de tungstênio ocorre por efeito termiônico ($V_C \approx 6 \text{ V}$). 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

11.3. 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 11.6, 11.7, 11.8 e 11.9 ilustram, qualitativamente, a influência da corrente, tensão e velocidade de soldagem na penetração, largura e altura do reforço (figura 11.10) 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. 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 (figura 11.10). 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 (a área depositada, A_d , permanece 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 11.7 e 11.8. A influência no reforço do cordão, ou melhor na área depositada (A_d , figura 11.10), 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:

$$A_d = \varphi \frac{A_w \cdot f}{v} \quad (22)$$

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.

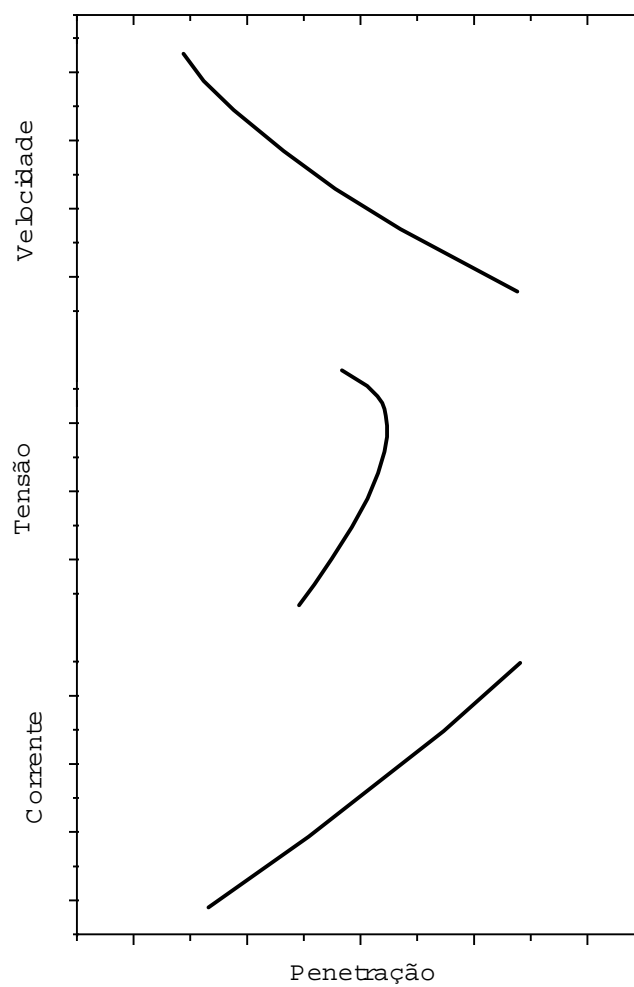


Figura 11.7 - Relação entre a penetração e as variáveis primárias de soldagem (esquemática).

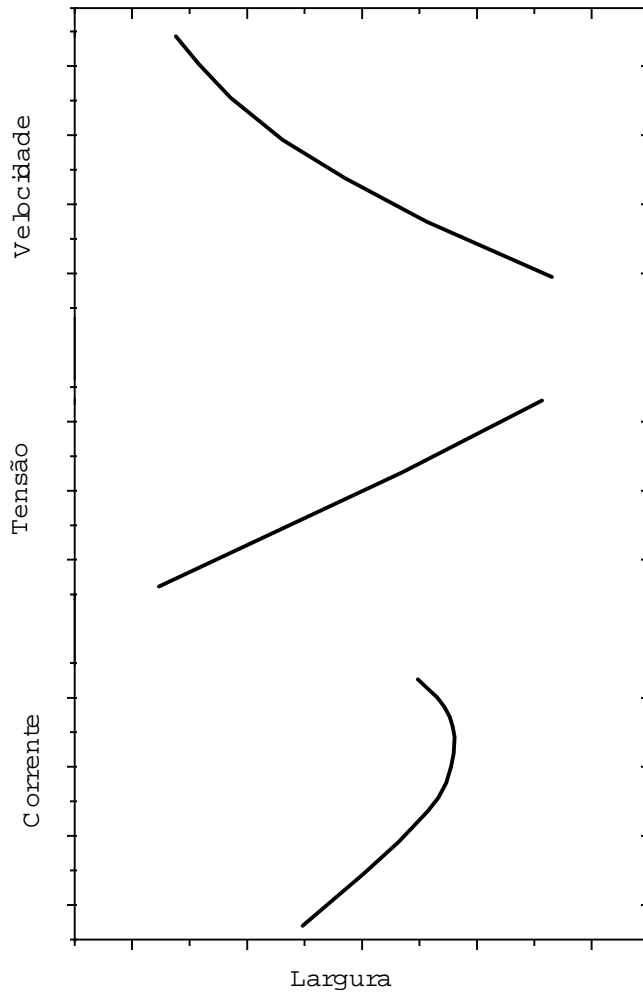


Figura 11.8 - Relação entre a largura e as variáveis primárias de soldagem (esquemática).

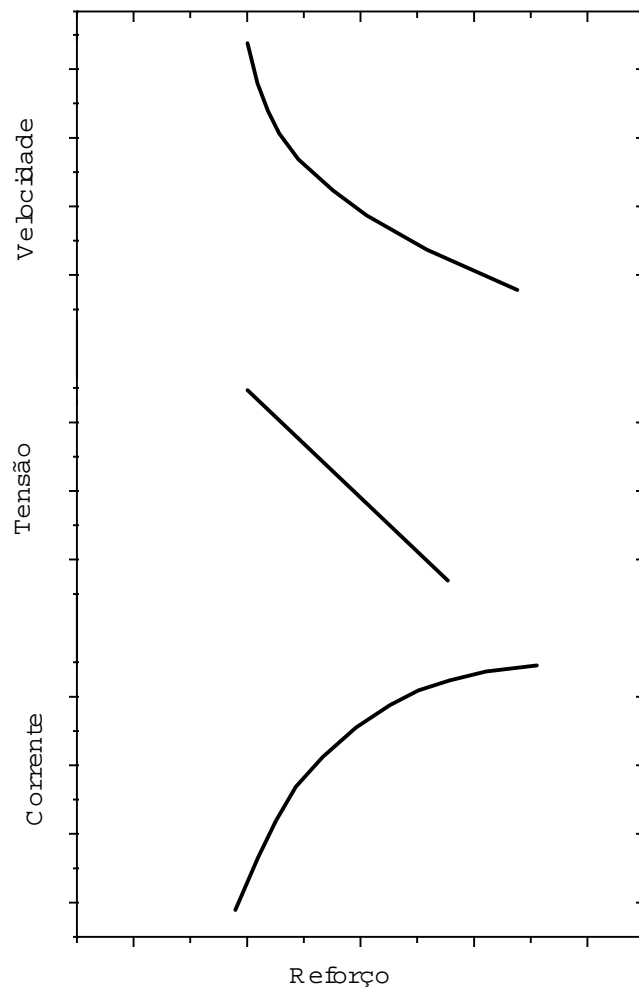


Figura 11.9 - Relação entre o reforço do cordão e as variáveis primárias (esquemática).

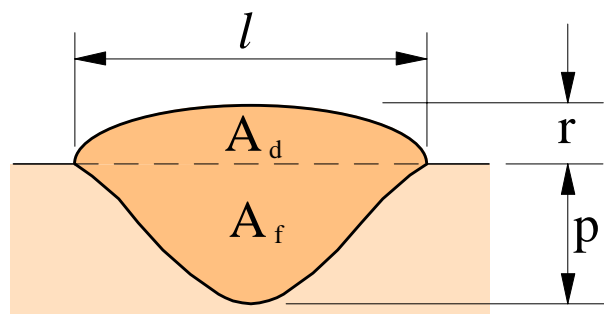


Figura 11.10 - Características geométricas de um cordão de solda: p - penetração, r - reforço, l - largura, A_d - área depositada, A_f - área fundida.

O plano de deslocamento é o plano que contém o eixo da solda e a normal à face desta. O ângulo formado entre essa normal e a projeção do eletrodo no plano de deslocamento é o ângulo de deslocamento (figura 11.11). De acordo com esse ângulo, processo será feito “puxando” ($\theta < 0$) ou “empurrando” ($\theta > 0$) a poça de fusão, o que influencia o formato final do cordão, tendendo o cordão feito puxando-se o arco a ser mais estreito e a apresentar uma maior penetração (figura 11.12).

Como já mencionado, diversos outros fatores afetam o formato e outras características do cordão de soldagem. As considerações apresentadas acima são apenas uma pequena introdução a este importante aspecto da soldagem.

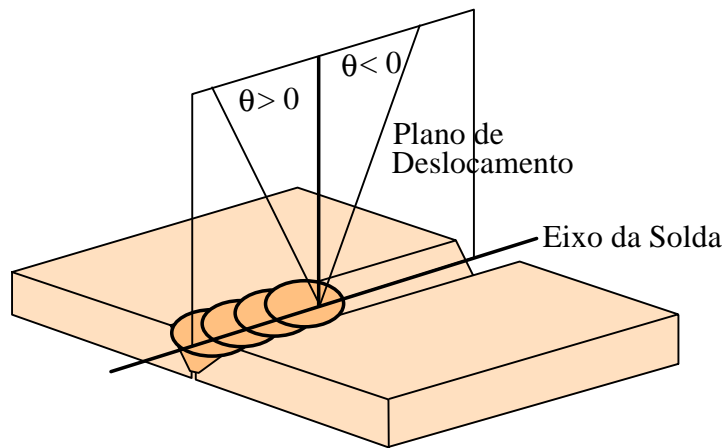


Figura 11.11 - Ângulo de deslocamento.

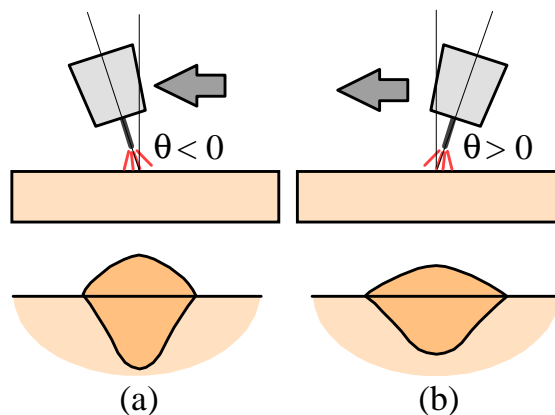


Figura 11.12 - Efeito do ângulo de deslocamento no formato do cordão (esquemático).

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.