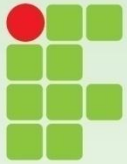


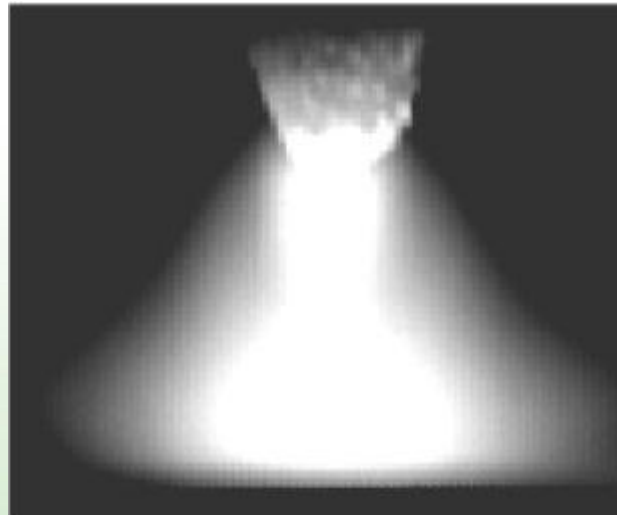
POR QUE ESTUDAR O ARCO ELÉTRICO?

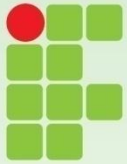
- É a fonte de calor, forma a poça de fusão e funde o eletrodo
- As forças geradas no arco são as principais responsáveis pela transferência do metal
- Projeto da fonte de potência é determinado pela necessidade de estabilizar o arco



Características Arco Elétrico

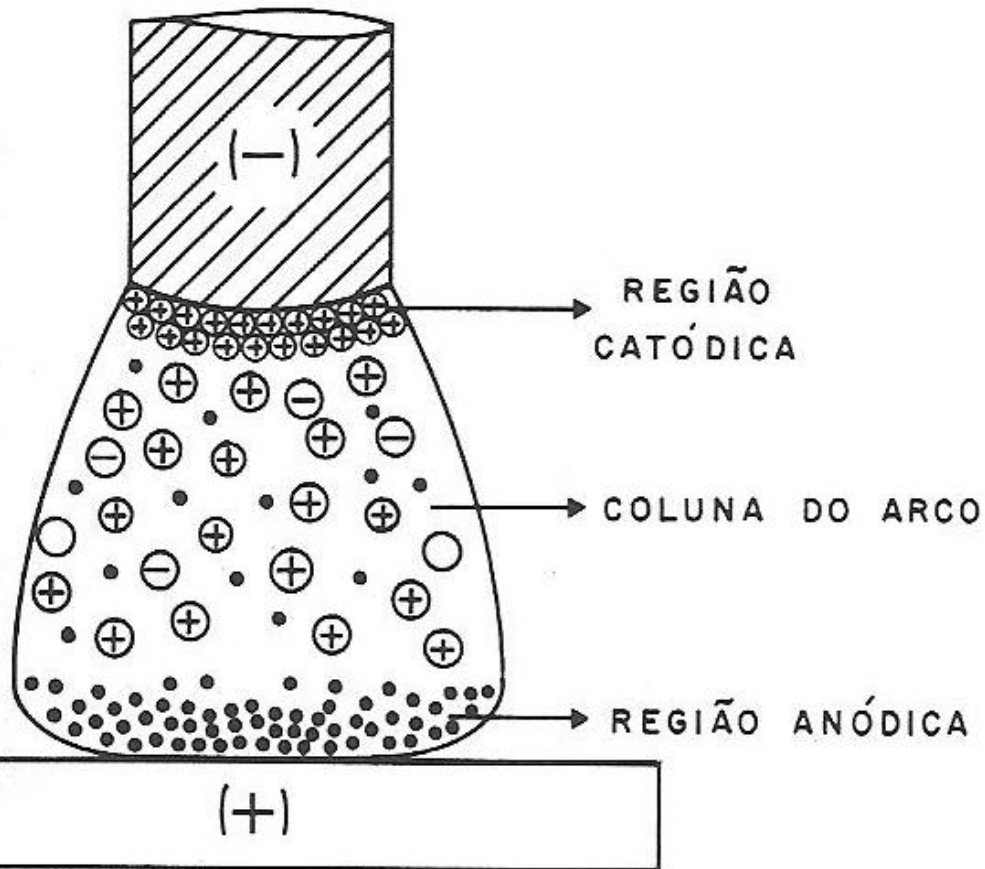
- O arco de soldagem opera entre um eletrodo plano, ou aproximadamente plano (peça) e outro cilíndrico (arame) com área muito menor que a do primeiro. Logo, sua forma geométrica é, em geral, ligeiramente cônica





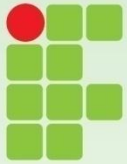
Características Arco Elétrico

- O arco elétrico pode ser dividido em 3 regiões:
 - Região catódica: Os elétrons são emitidos e acelerados para a região anódica através de campos elétricos, aquecendo-o e favorecendo a emissão de mais elétrons livres;
 - Coluna de plasma: Coluna do arco constituída por elétrons livres, íons (positivos e negativos) e uma pequena quantidade de átomos neutros;
 - Região anódica: Região bombardeada pelos elétrons emitidos pelo ânodo;

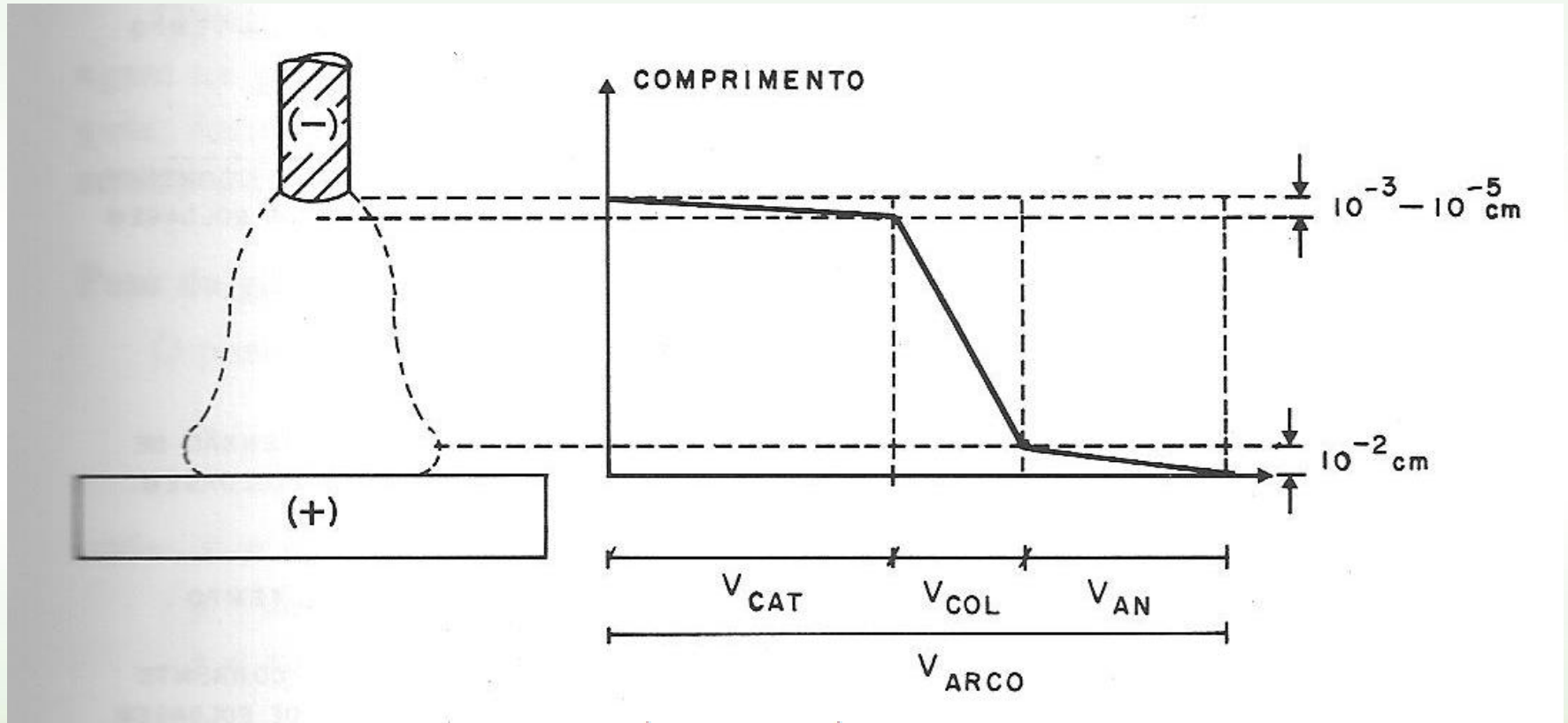


- ELETRONS
- \oplus ÍONS POSITIVOS
- \ominus ÍONS NEGATIVOS
- O ÁTOMOS NEUTROS

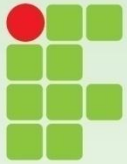
Figura 2.3 — Esquema em escala atômica dos fenômenos que ocorrem em um arco elétrico com eletrodo permanente⁽⁶⁾



Queda de Tensão no Arco Elétrico



$$U = (U_A + U_C) + E \cdot l_a$$

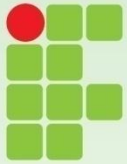


CÁTODO TERMOIÔNICO

- Materiais refratários (C ou W)
- Trabalham com densidade de corrente entre 1 a 100 A/mm^2
- Estático e estáveis

CÁTODO NÃO TERMOIÔNICO

- Vaporizam-se formando pontos catódicos instáveis
- Adicionar gás oxidante pode resolver o problema

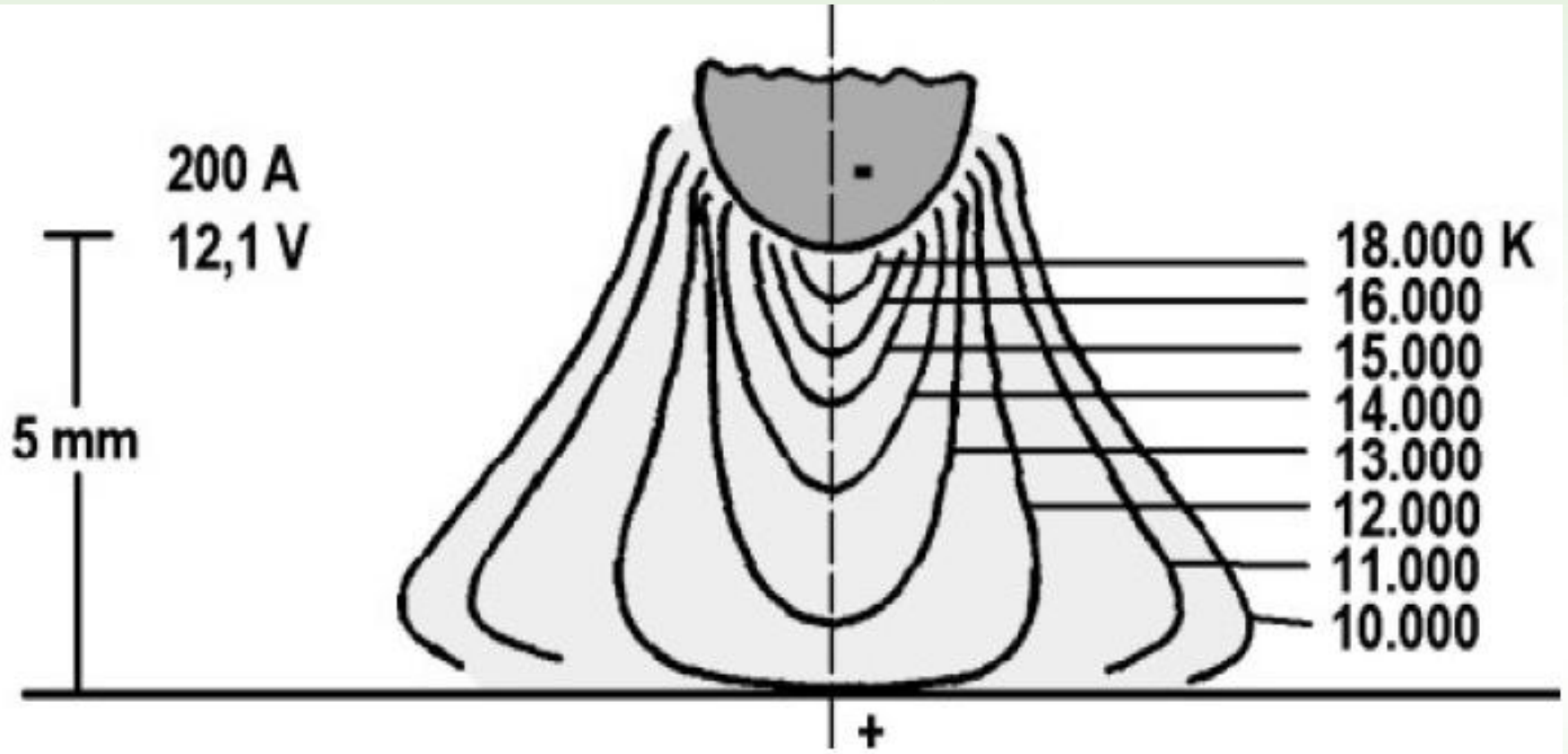
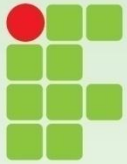


Características Térmicas do Arco Elétrico

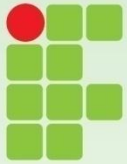
- Aproximadamente 100% eficiente na conversão de energia elétrica na energia térmica;

$$H_{IN} = UI = U_C I + U_A I + El_a I$$

$$Q = V \times I \times t$$



(Lancaster, 1986)



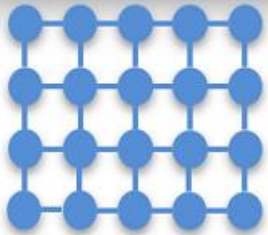
**INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA**



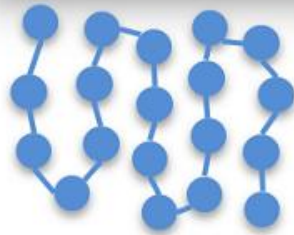
105
ANOS

**REDE FEDERAL
DE EDUCAÇÃO
PROFISSIONAL
E TECNOLÓGICA**
1909-2014

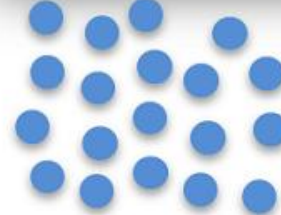
Solid



Liquid

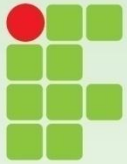


Gas



Plasma

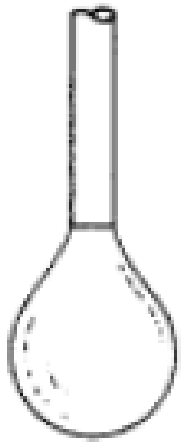




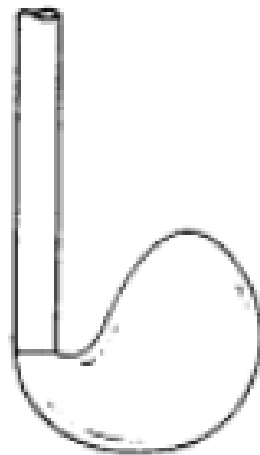
Transferência do Metal de Adição

- A forma pelo qual o metal fundido transfere-se do eletrodo para a poça de fusão influencia diversos aspectos operacionais da soldagem;
- Diversas formas de transferência podem ser observadas nos diferentes processos de soldagem;
- Um sistema de classificação proposto pelo IIW e baseado em aspectos fenomenológicos é apresentado na tabela a seguir.

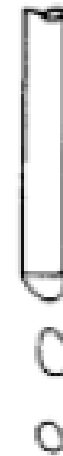
Tipo de Transferência	Exemplo de Processo de Soldagem
<p>1. Queda Livre (Free Flight Transfer):</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.1. Globular (Globular) <ul style="list-style-type: none"> 1.1.1. Globular (Drop) 1.1.2. Repelida (Repelled) 1.2. Goticular ou Aerossol (Spray) <ul style="list-style-type: none"> 1.2.1. Axial (Projected) 1.2.2. Com Alongamento (Streaming) 1.2.3. Rotacional (Rotating) 1.3. Explosiva (Explosive) 	<p>GMAW - baixa corrente GMAW com proteção de CO₂</p> <p>GMAW - corrente intermediária GMAW - corrente média GMAW - corrente elevada</p> <p>SMAW (eletrodos revestidos)</p>
<p>2. Por Contato (Bridging Transfer)</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.1. Curto-circuito (Short-circuiting) 2.2. Contínua (Without Interruption) 	<p>GMAW - arco "curto" GTAW com alimentação contínua</p>
<p>3. Protegida por Escória (Slag Protected Transfer):</p> <ul style="list-style-type: none"> 3.1. Guiada pela parede (Flux-Wall Guided) 3.2. Outros modos (Other modes) 	<p>SAW SMAW, FCAW, ESW, etc</p>



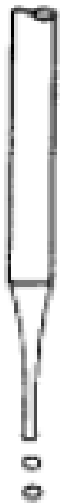
Globular



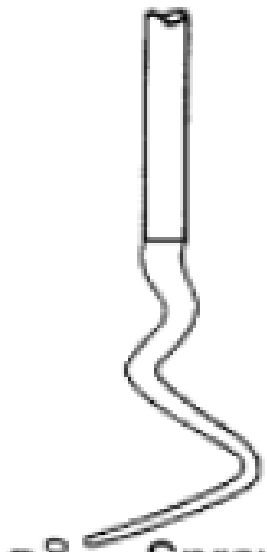
**Globular
Repelida**



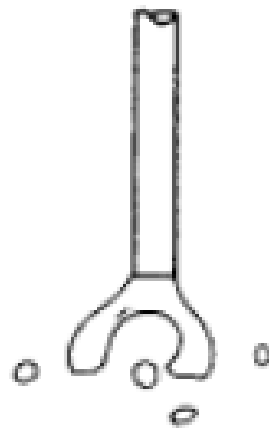
**Spray
Projetado**



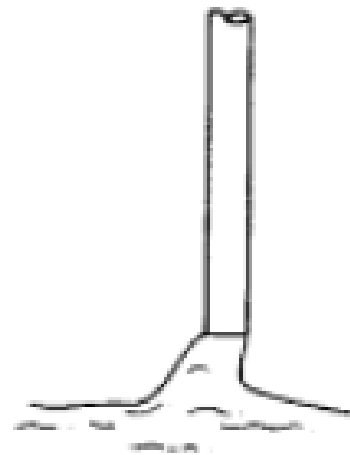
**Spray com
Alongamento**



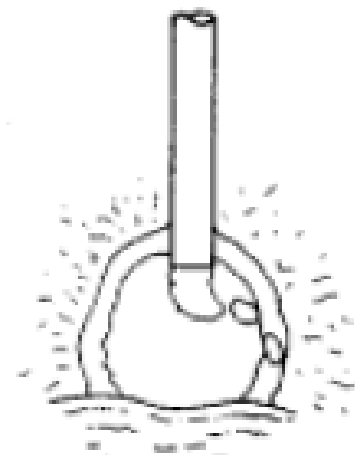
**Spray
Rotacional**



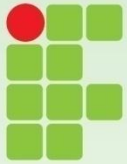
Explosiva



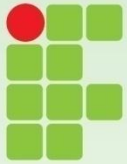
Curto-circuito



**Guiada por
Parede de Fluxo**

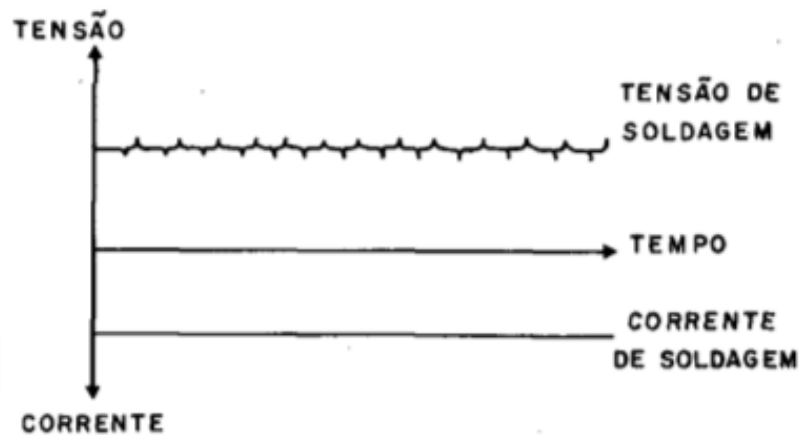
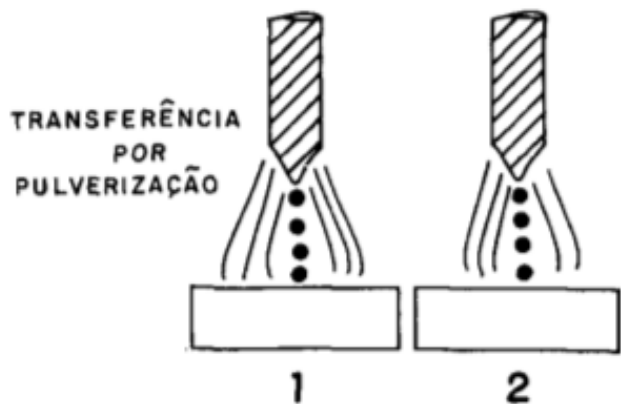
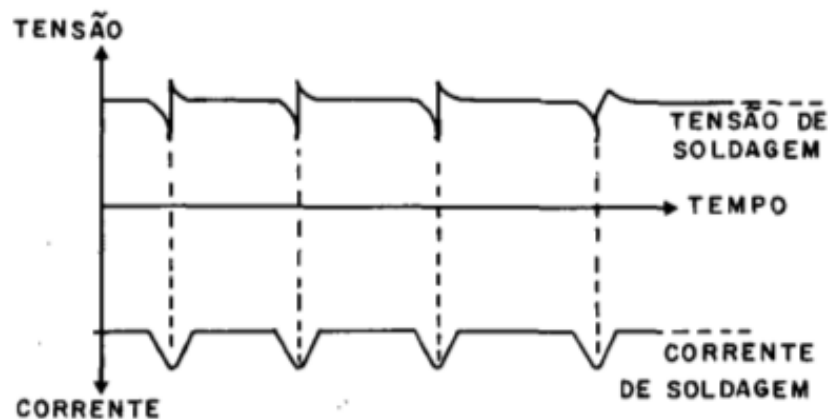
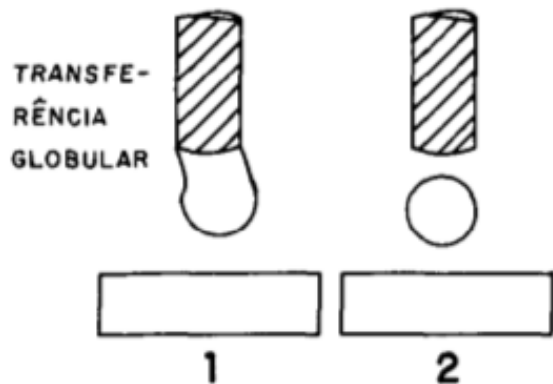
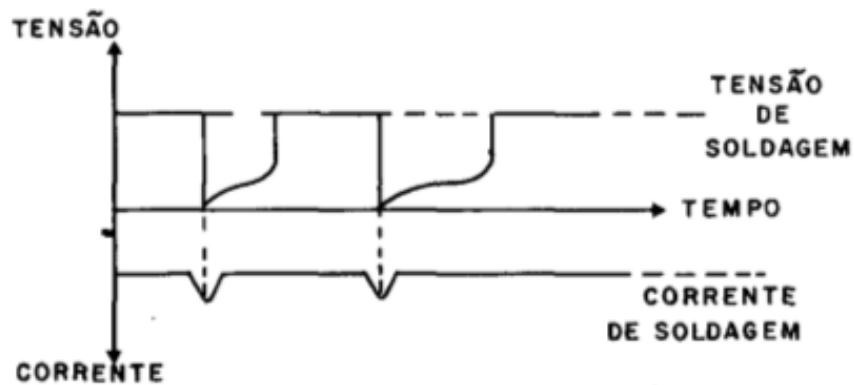
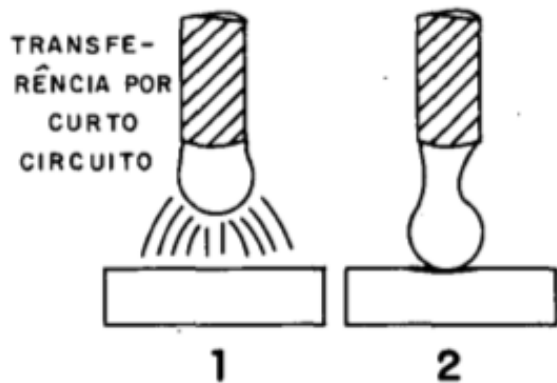


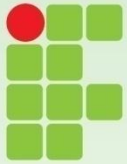
- Diversas técnicas podem ser utilizadas para o estudo da transferência de metal de adição, as mais comumente usadas agrupam-se em três categorias:
 - Métodos mecânicos
 - Métodos fotográficos
 - Medição de efeitos secundários



Tipos de Transferência Metálica

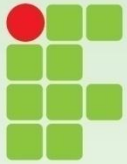
- Transferência globular: Transferido por glóbulos de dimensões equivalentes ao diâmetro do eletrodo;
- Transferência por pulverização: Metal é transferido por gotas de dimensões bem menores que o diâmetro do eletrodo nu;
- Transferência por curto circuito: Metal transferido por contato direto entre a ponta do eletrodo nu e a poça de fusão;
- Transferência por arco pulsado: Similar a transferência por pulverização, mas com uma gota por pulso;





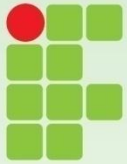
Transferência Metálica MIG/MAG

- Influenciada diretamente pela intensidade da corrente:
 - CTGA Transferência globular para transferência por pulverização axial;
 - CTAR Transferência por pulverização axial para pulverização rotacional;



Transferência Metálica MIG/MAG

- A corrente de transição por sua vez é influenciada por:
 - Composição do eletrodo: Baixa resistividade elétrica diminui CTGA e aumenta CTAR;
 - Geometria do eletrodo: Aumentando comprimento e/ou diminuindo diâmetro diminui CTGA e CTAR;
 - Ativação e polaridade: Eletrodos nus com CCPD não ocorre CTGA nem CTAR;
Ativação do arame diminui CTGA e CTAR (para eletrodo com diâmetro pequeno e comprimento grande);



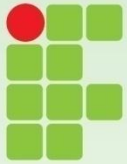
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA



REDE FEDERAL
DE EDUCAÇÃO
PROFISSIONAL
E TECNOLÓGICA
1909-2014

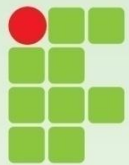
Transferência Metálica Eletrodo Revestido

- Influenciada por:
 - Revestimento do eletrodo: Aumento na fluidez da escória e/ou espessura do revestimento diminui tamanho da gota;
 - Corrente: Aumento na corrente diminui tamanho médio das gotas;
 - Posição de soldagem: Posição horizontal diminui tamanho médio das gotas;



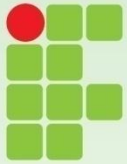
Transferência Metálica Arco Submerso

- Influenciado por:
 - Composição do eletrodo: Maior resistividade aumenta tamanho da gota;
 - Geometria do eletrodo: Maior comprimento do eletrodo nu diminui tamanho da gota;
 - Corrente da Soldagem: Aumento da corrente causa aumento na taxa de deposição e diminuição no tamanho da gota;



Transferência Metálica Arame Tubular

- Fluxo localizado no interior do arame que conduz a corrente até o arco, isso dificulta a fusão do mesmo, conseqüentemente a forma de transferência depende particularmente das características do fluxo;
- Arames com fluxo de pó metálico (“metal cored”) comportam-se de forma similar a arames sólidos;
- Arames rutílicos operam normalmente a altas correntes com transferência spray projetada não axial;
- Arames básicos operam normalmente com transferência globular não axial a correntes elevadas e curto circuito para correntes menores;
- Arames auto-protegidos predominam as transferências por curto circuito e globular repelida



Transferência Metálica Arame Tubular

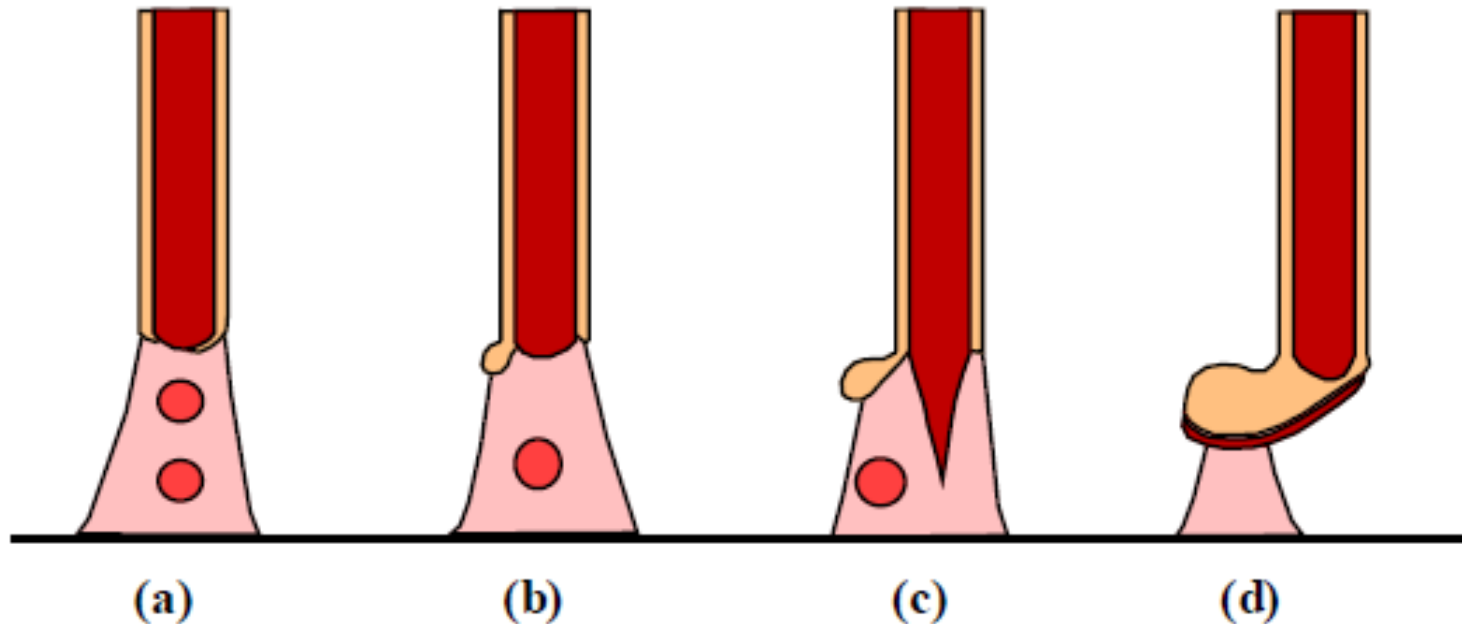
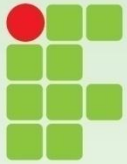
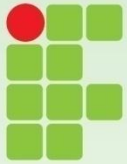


Figura 11.29 - Formas típicas de transferência na soldagem com arames tubulares. Arames: (a) "metal cored", (b) rutilico, (c) básico e (d) auto-protégido.



Forças Atuantes na Gota

- Peso: $P = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$
- Tensão superficial: $T = 2\pi r \alpha \psi(a/c)$
- Força eletromagnética (“Pinch effect”): $F = \frac{I^2}{200} \ln \frac{A_2}{A_1}$
- Força de arraste: Surge quando existe uma vazão de gás de proteção;
- Força de expansão gasosa: Na soldagem com eletrodos revestidos acredita-se que o carbono da alma reage com o oxigênio formando bolhas de CO que se expandem e causam microexplosões impelindo as gotas em direção a poça de fusão



- Considera-se que uma gota desprende-se do eletrodo quando o balanço das forças atuantes sobre a mesma resulte em uma componente que a afaste do eletrodo;

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v$$

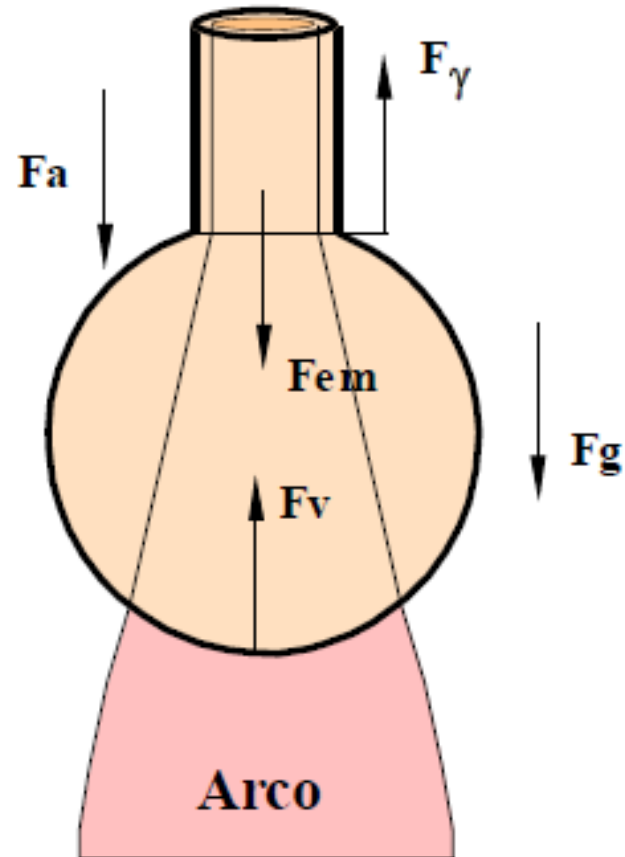
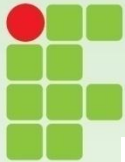
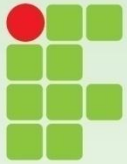
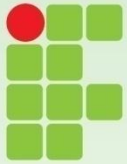


Figura 11.30 - Balanço de forças na ponta do eletrodo. F_g - força gravitacional, F_{em} - força eletromagnética, F_γ - força associada à tensão superficial, F_a - força de arraste e F_v - força de reação.

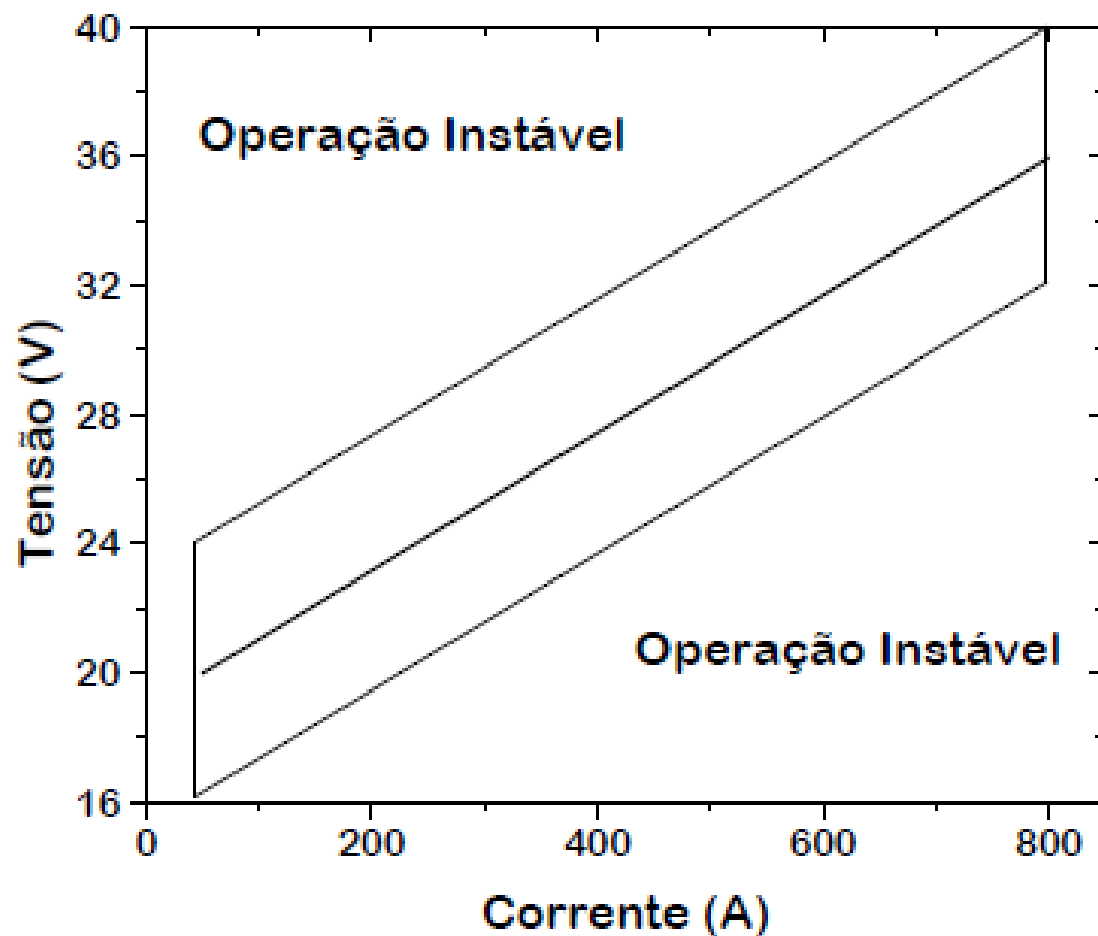


Variáveis da Soldagem a Arco

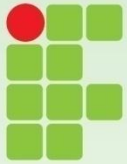
- Durante a soldagem um certo número de fatores podem influenciar o formato final do cordão de solda:
 - Nível de corrente;
 - Tipo de corrente;
 - Tensão de operação;
 - Comprimento do arco;
 - Velocidade de deslocamento;
 - Velocidade de alimentação do metal de adição;
 - Diâmetro do eletrodo;
 - Stickout;
 - Distância do ponto de tomada de corrente à peça;
 - Ângulo da tocha, ou eletrodo, em relação a peça;
 - Tipo de proteção



- A seleção das variáveis de soldagem para uma aplicação depende de inúmeros fatores:
 - Disponibilidade de equipamentos e materiais;
 - Considerações geométricas;
 - Considerações metalúrgicas;
 - Considerações econômicas;
 - Necessidade de garantir um nível adequado de estabilidade para o processo e/ou reduzir a chance de formação de descontinuidades no cordão de solda.

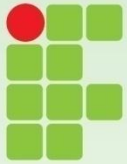


Relação entre a corrente e tensão na soldagem SAW com CC+ (esquemática).



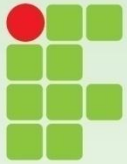
Variáveis de Soldagem e Seu efeito

- Jones (1978) divide as variáveis de um processo de soldagem a arco em quatro grupos básicos:
 - Variáveis pré-determinadas;
 - Variáveis de fundo;
 - Variáveis secundárias;
 - Variáveis primárias;



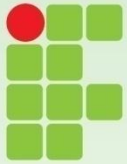
Variáveis pré determinadas

- Estabelecidos ainda em fase de projeto:
 - Tipo e espessura do metal de base;
 - Propriedades requeridas para o metal de solda e região afetada pelo calor;



Variáveis de fundo

- Decididas na fase inicial de produção, determinadas geralmente pela disponibilidade de equipamentos e de materiais;
 - Processo de soldagem;
 - Tipo de equipamento;
 - Técnica básica de soldagem;
 - Projeto da junta;
 - Tipo de eletrodo, fluxo, gás...
 - Diâmetro do eletrodo;

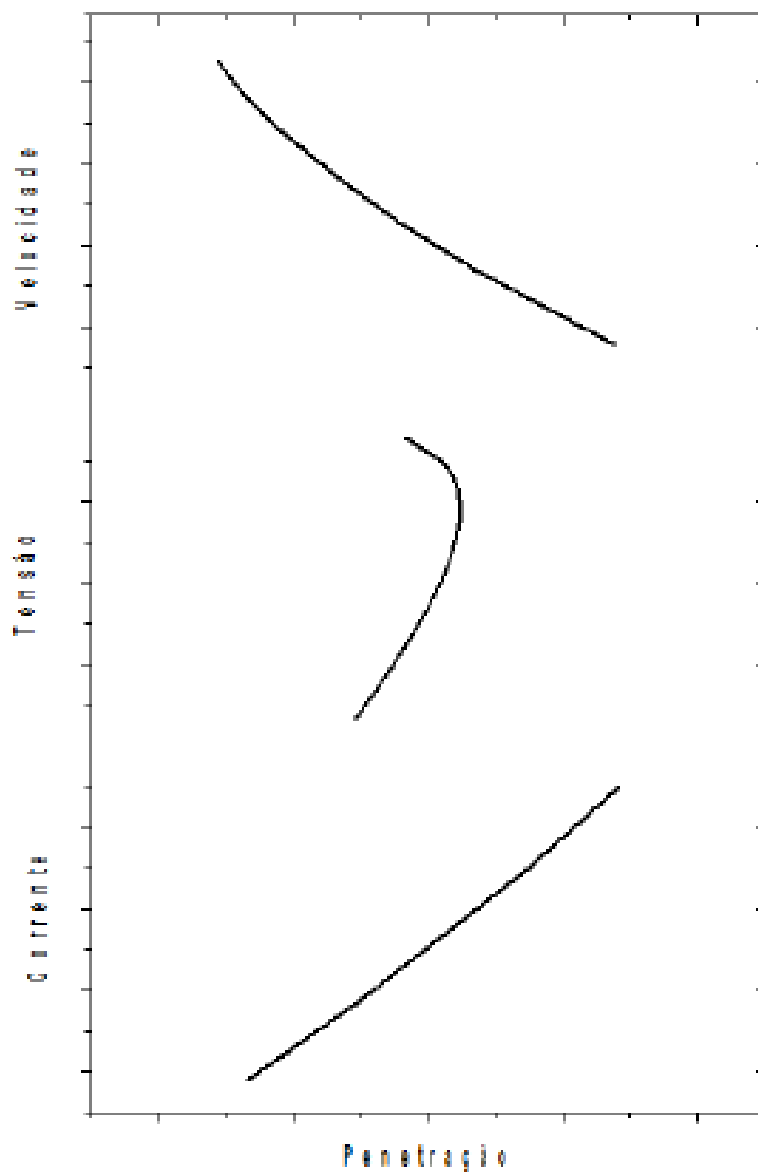


Variáveis Primárias

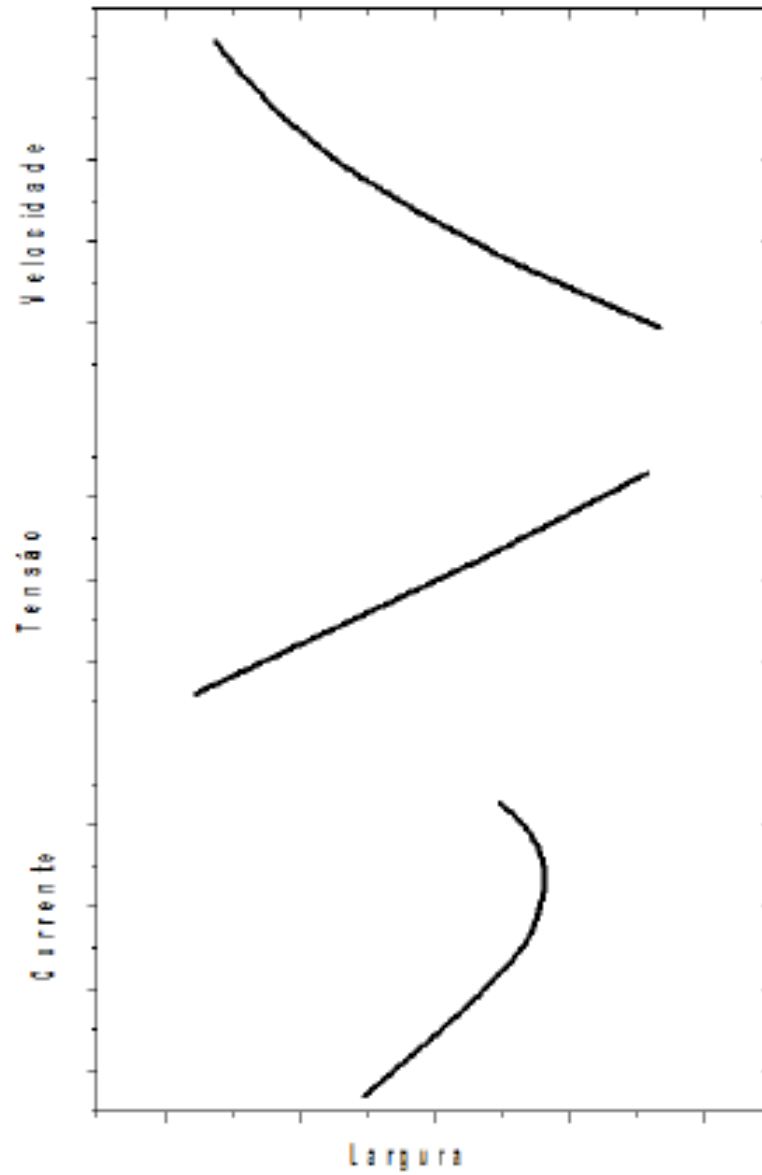
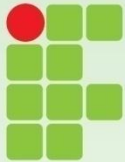
- Corrente (tipo e valor);
- Tensão;
- Velocidade de soldagem;

Variáveis Secundárias

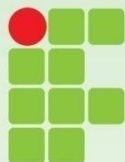
- Stickout do eletrodo (quando for o caso);
- Posicionamento do eletrodo em relação a peça



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



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



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

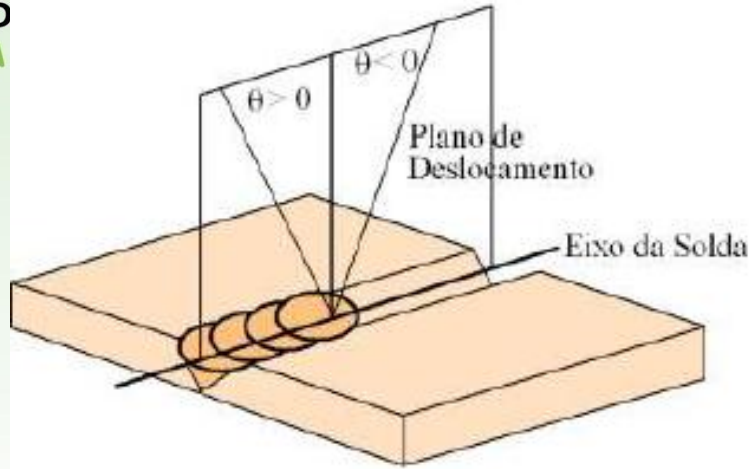
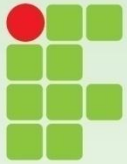
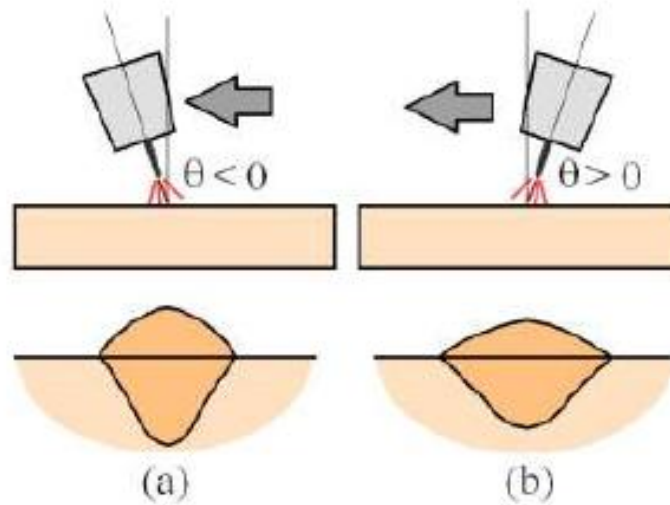


Figura 14.11 - Ângulo de deslocamento.



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

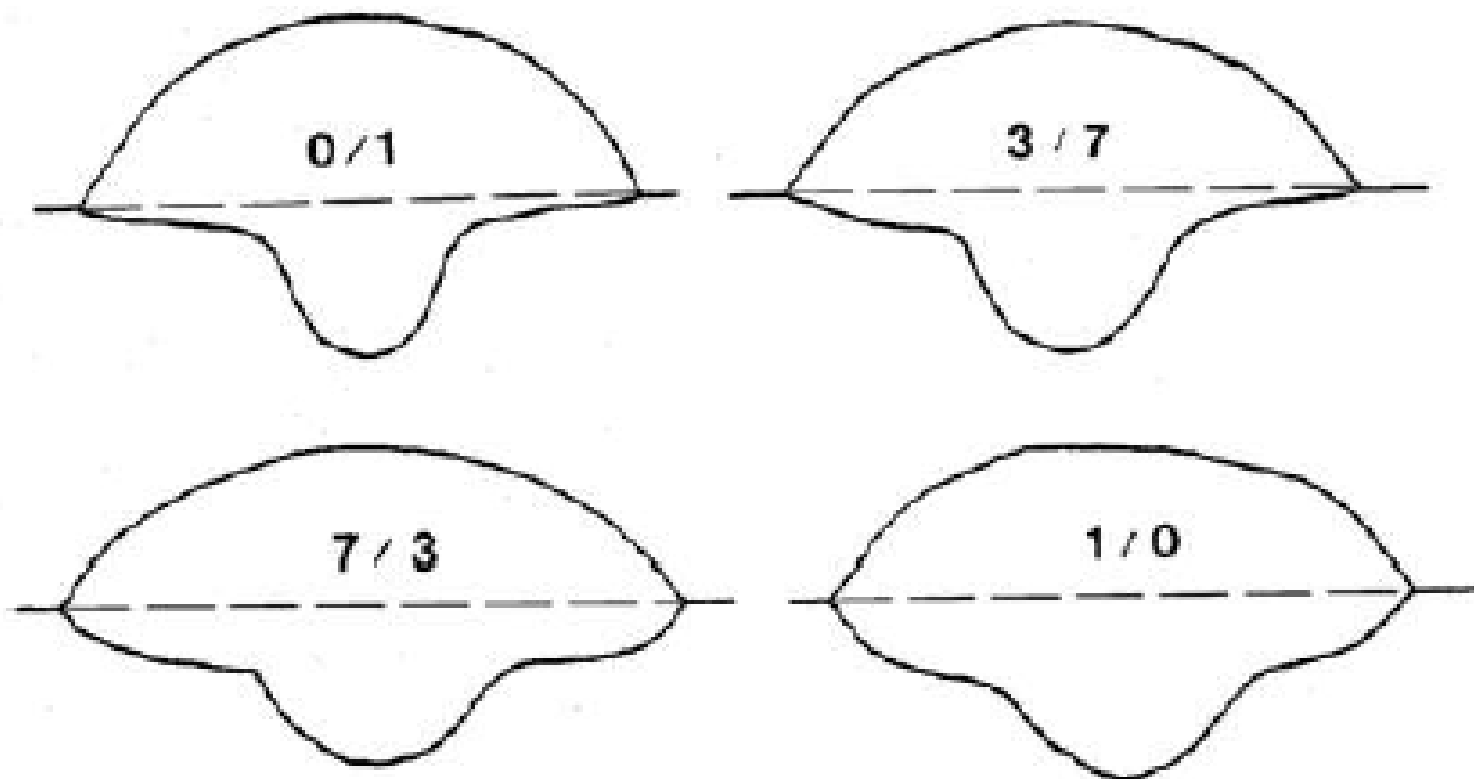
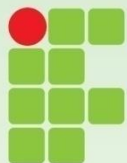


Figura 14.13 – Seções transversais de cordões de solda depositados sobre chapa de aço carbono com proteção de Ar-He-2%O₂ com diferentes razões He/Ar (Modenesi, 1990).