

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO III SOLDAGEM

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG DEFEITOS EM SOLDAGEM E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Professor: Moisés Luiz Lagares Júnior

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Forças que governam a transferência metálica:

- Força gravitacional (F_g)
- Força associada à tensão superficial (F_γ)
- Força eletromagnética (F_{em})
- Força de arraste (F_a)
- Força de reação por vaporização (F_v)

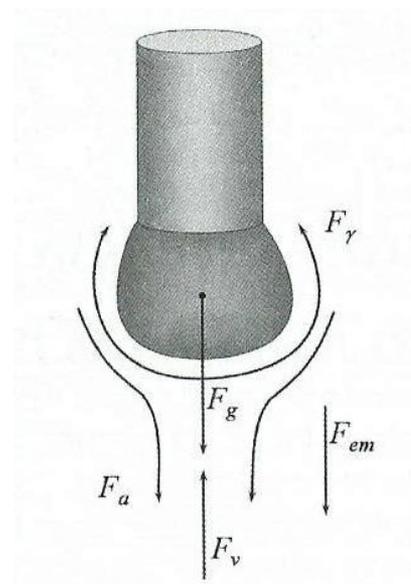
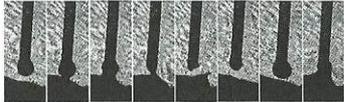
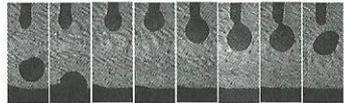
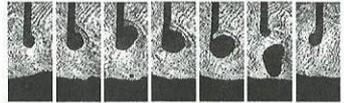
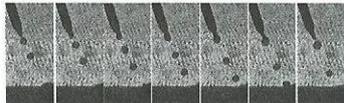
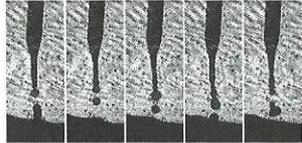
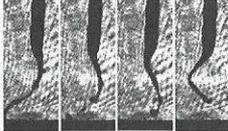


Figura 2.1 – Forças governantes da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG, onde F_γ representa a força devido à tensão superficial, F_g à gravidade, F_{em} ao efeito eletromagnético, F_a ao arraste pelo fluido e F_v à vaporização

Classe de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por curto-circuito	Por curto-circuito		Tensão superficial
Por vôo livre	Globular		Gravitacional
	Globular Repulsiva		Gravitacional e reação
	Goticular (ou Goticular projetada)		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Reações químicas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Mapa de Transferência Metálica:

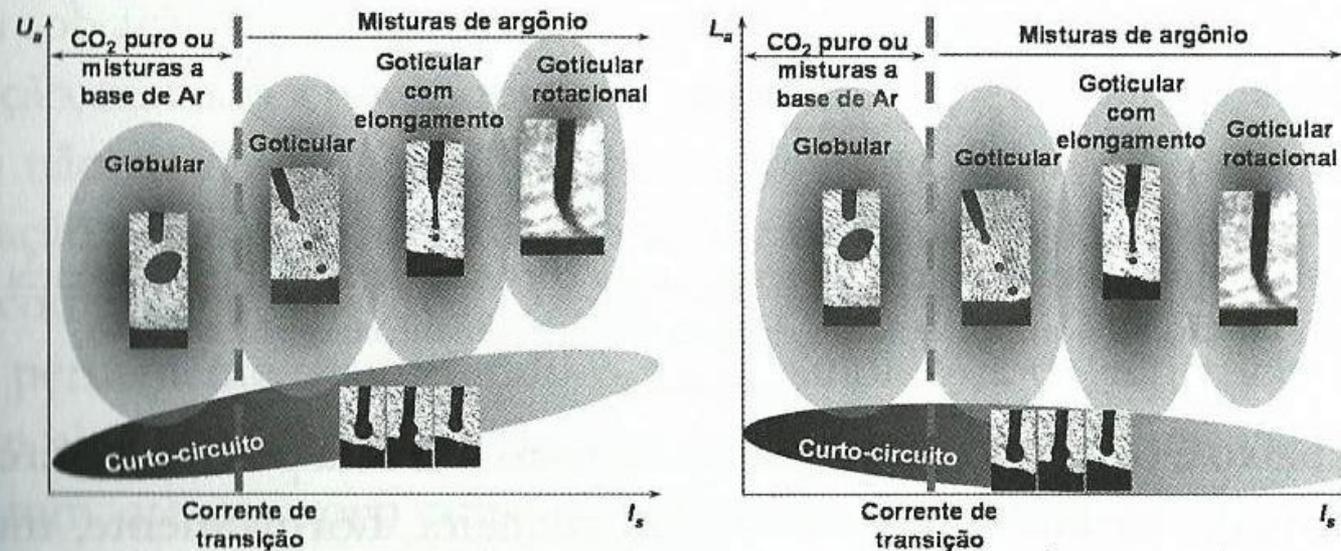


Figura 2.13 – Mapas esquemáticos e qualitativos dos campos de incidência dos modos principais de transferência metálica em MIG/MAG, em função da corrente e da tensão (à esquerda) e do comprimento de arco (à direita)

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Transferência por curto-circuito

- Baixas tensões e correntes de soldagem (arco curto e baixa força eletromagnética)
- Frequência de transferência: 20 a 200 gotas por segundo

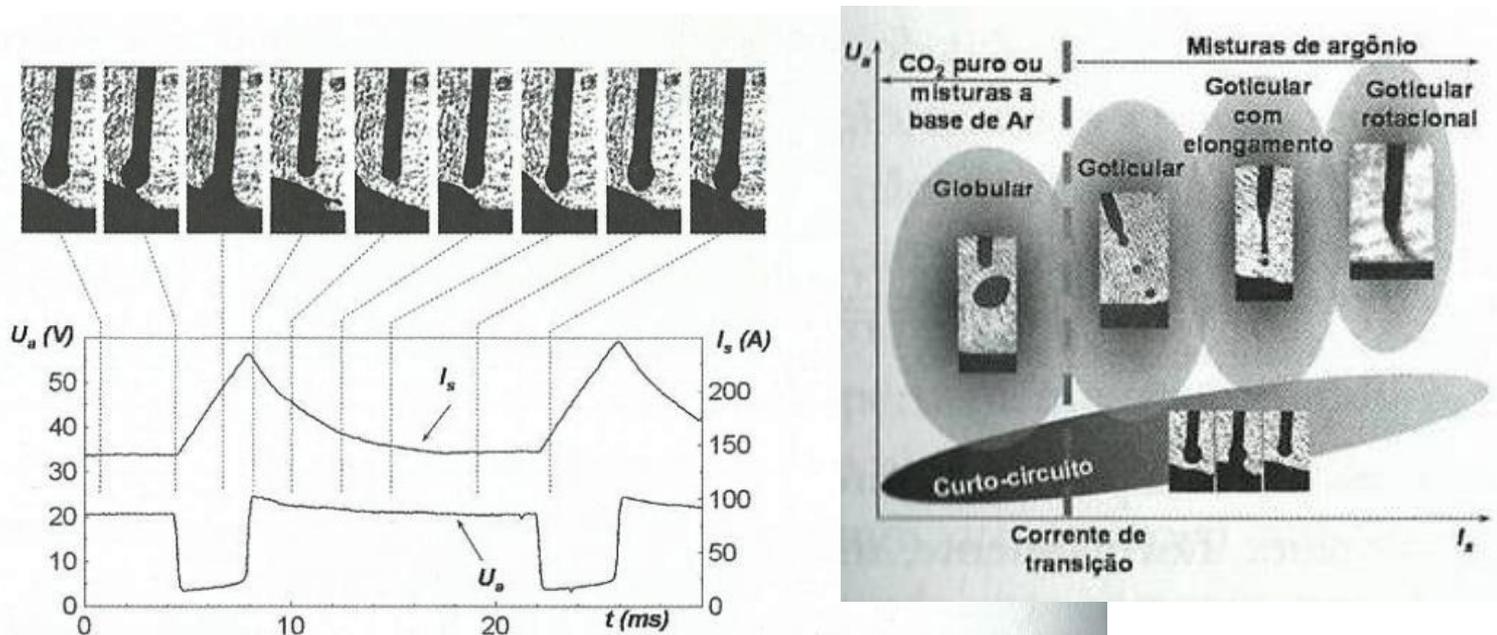


Figura 2.14 – Oscilogramas típicos de tensão e de corrente durante a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota em crescimento e destacamento Scotti e Ponomarev, Soldagem MIG/MAG, 2008

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Transferência por curto-circuito

- Alta geração de respingos
- Baixos valores de corrente e tensão e a tendência do arco apagar no CC (baixo calor transferido) torna este tipo adequado para chapas finas e soldagem fora de posição plana
- Alta controlabilidade do processo em função de poça de fusão pequena e arco curto
- Em chapas grossas pode ocorrer **Falta de Fusão e Mordedura**
- Dificuldade em alumínio devido alta condutividade térmica (poça resfria e solidifica rapidamente), dificultando a fusão do metal de base e aprisionando gases (**Porosidades**)

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Transferência globular

- Moderadas a altas tensões de arco e baixas correntes de soldagem (arcos longos para evitar curto circuito e força eletromagnética não significativa)
- Frequência de transferência: 1 a 10 gotas por segundo

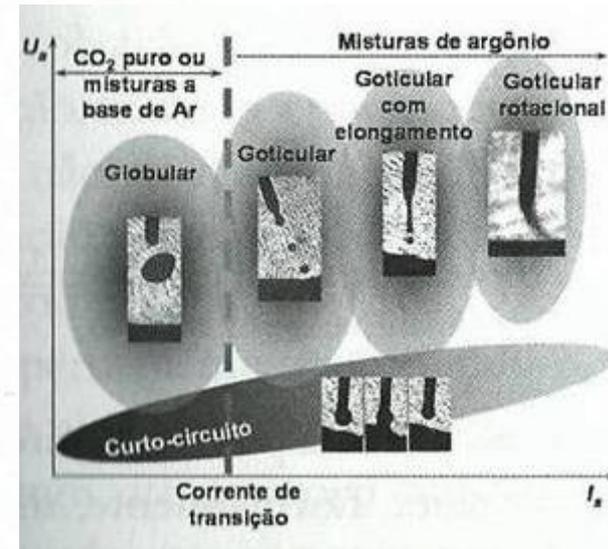
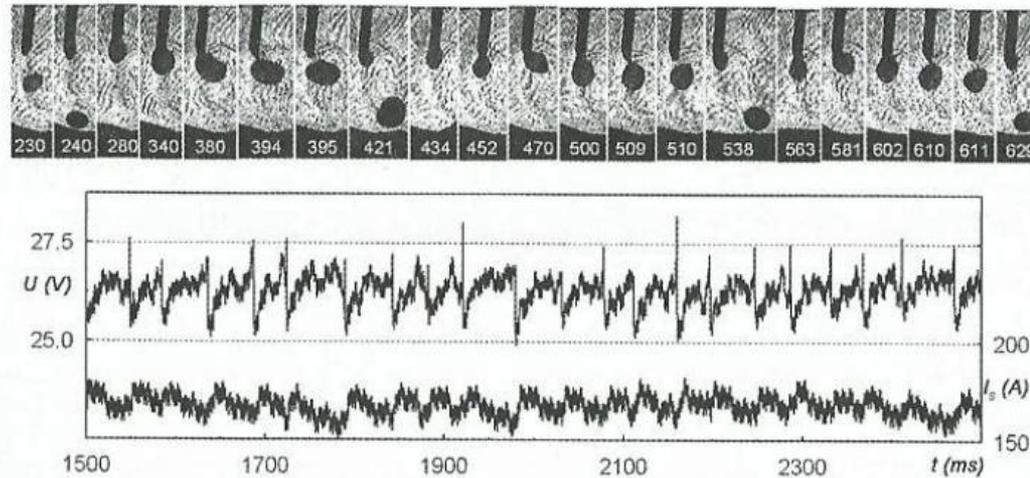


Figura 2.18 – Na vista superior, um exemplo da transferência metálica no modo globular, filmada a uma taxa de 2000 qps; na vista inferior, oscilogramas típicos deste tipo de transferência (gás de proteção Ar + 5%O₂; arame de aço carbono de 1,0 mm de diâmetro; $U_a = 28,0$ V; V_{alim} de 5,7 m/min; $I_s = 164,7$ A; V_s de 30 cm/min; DBCP de 18 mm)

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Transferência globular

- Transferência irregular de gotas grandes (maiores que o diâmetro do eletrodo)
- Limitada à posição plana (força gravitacional dominante)
- Aspecto irregular do cordão de solda

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Transferência goticular

- Transferência de pequenas gotas uniformes (diâmetro próximo do eletrodo), sequencial e em alta frequência (> 200 gotas por segundo)

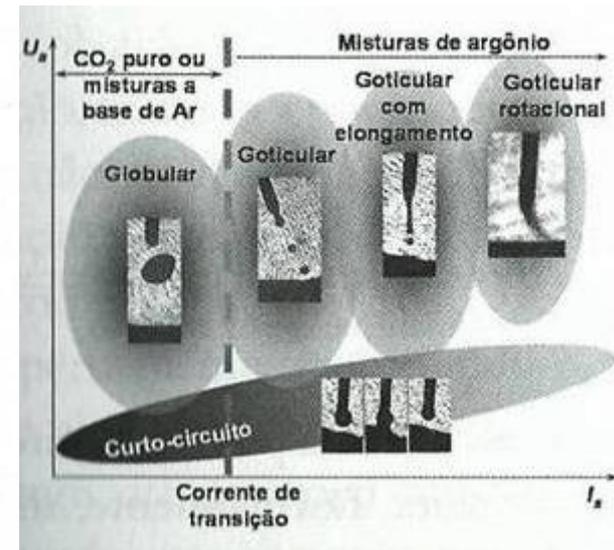
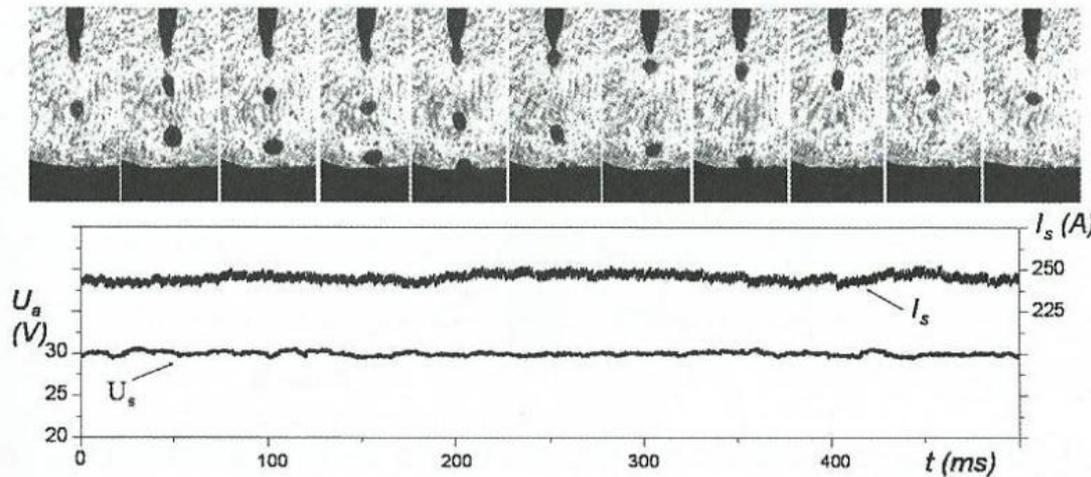


Figura 2.21 – Variações da tensão e da corrente de soldagem em condições da transferência goticular (Fonte eletrônica com CEF Tensão Constante; arame-eletrodo aço carbono de 1,2 mm de diâmetro; U_a de 30 V; V_{alim} de 6 m/min; V_s de 40 cm/min; DBCP de 18 mm; gás de proteção Ar+2%CO₂, frequência das imagens – 2000 quadros por segundo)

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Transferência goticular

- Ocorre em altas correntes (forças eletromagnéticas altas), polaridade positiva, tensões elevadas e atmosfera à base de Argônio
- A trajetória do vôo coincide com o eixo do eletrodo. Poderia ser empregada em qualquer posição
- Altas correntes (impondo alta energia) criam poças volumosas, dificultando soldagem fora de posição plana e chapas finas
- Aplicações principais: união e enchimento de chanfros em chapas grossas (acima de 3 mm), como é o caso de caldeirarias e construção naval
- Elevada estabilidade do arco, pouco ou nenhum respingo, bom molhamento e boa penetração de solda, bom aspecto superficial, soldagem em alta velocidade e alta taxa de deposição
- Corrente de soldagem acima da **Corrente de Transição - I_{tr}**

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Corrente de Transição

- Acima da I_{tr} , ocorre redução significativa e abrupta do tempo de formação da gota até o destacamento, com conseqüente aumento súbito da frequência de transferência
- Explicado pela mudança do fenômeno que governa a transferência (de Equilíbrio de Forças Estáticas para a Instabilidade Pinch)
- Como regra prática, quanto maior a resistividade elétrica, menor o ponto de fusão, menor o diâmetro e maior o comprimento energizado do eletrodo, menor é a I_{tr}
- Também depende do tipo de gás de proteção

MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA MIG/MAG

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

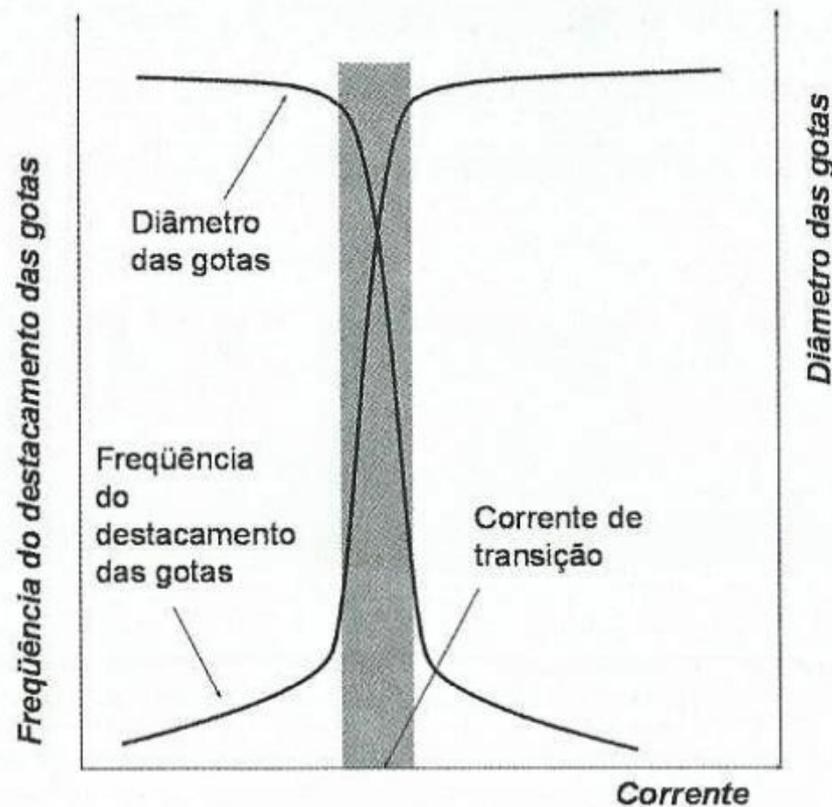


Figura 2.22 – Ilustração esquemática da alteração brusca do comportamento da transferência metálica, a qual caracteriza a corrente de transição

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- **Descontinuidade**: interrupção da estrutura típica de um material como falta de homogeneidade de características mecânicas, metalúrgicas ou físicas
- Uma descontinuidade não é necessariamente um defeito
- **Defeito**: é uma descontinuidade que, pela natureza ou acúmulo, torna um produto inadequado por não atingir os requisitos mínimos de qualidade
- Uma solda com defeito possui uma ou mais descontinuidades
- Existe um grande número de definições em uso para cada defeito
- De acordo com o sistema de classificação estabelecido pelo International Institute of Welding – **IIW** (Comissão V – Non-destructive Testing and Quality Assurance of Welded Products – doc IIS/11W-340-69), os defeitos são ordenados em seis grupos:

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

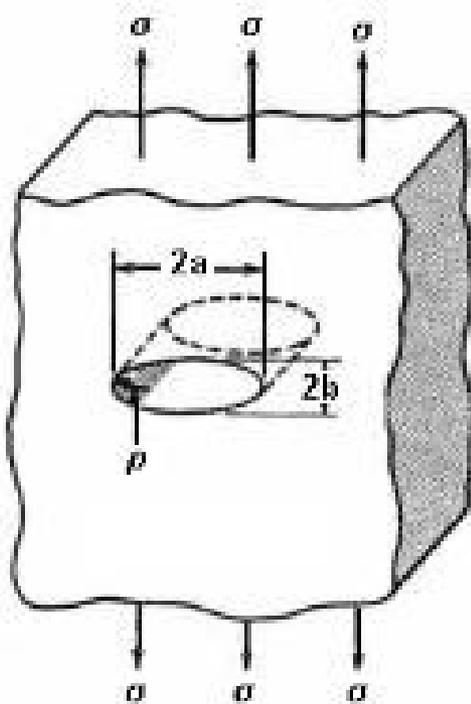
Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- Descontinuidade caracterizada por ter forma pontiaguda e alta razão entre comprimento e largura
- Um dos mais sérios defeitos devido a redução de resistência mecânica
- Agravada por carregamentos de impacto e baixas temperaturas
- Em geral, trincas indicam que o metal de solda (ou de base) apresenta baixa ductilidade e/ou alta restrição ao movimento. Contribuem: alta taxa de resfriamento, composição alta-liga, insuficiente calor imposto, preparação inadequada da junta e seleção incorreta do metal de adição

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



Mecânica da Fratura:

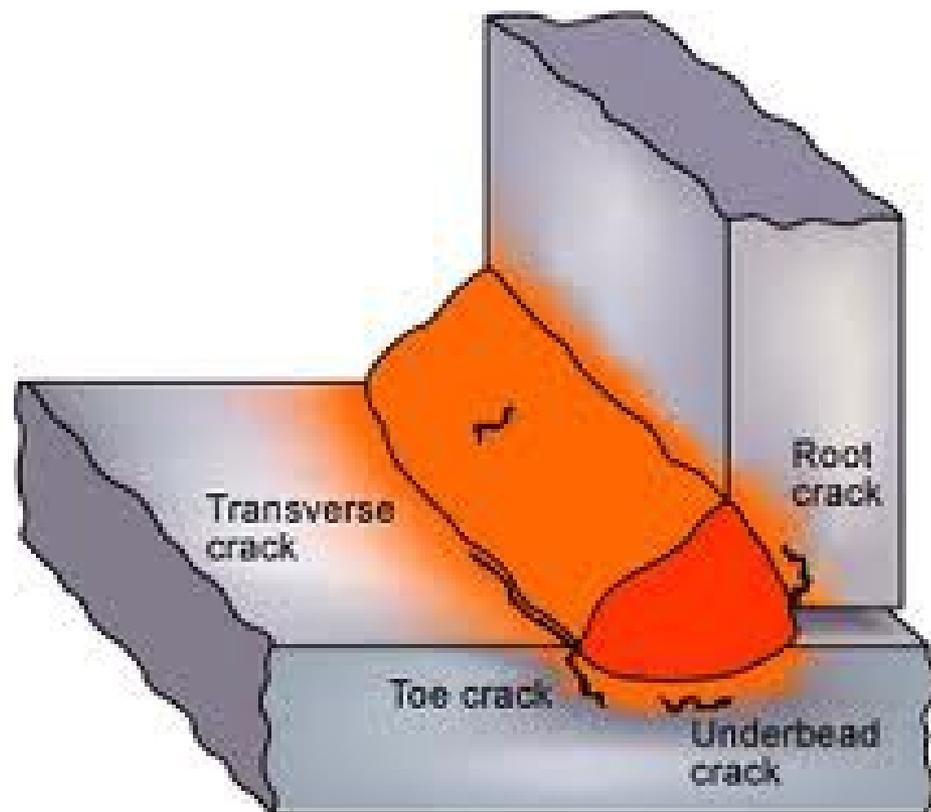
$$\sigma_m = 2\sigma_o(a/\rho_e)^{1/2}$$

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- Existem vários tipos de trincas
- Pode-se classificá-las como:
 - a) Trincas de **superfície**
 - b) Trincas **internas**



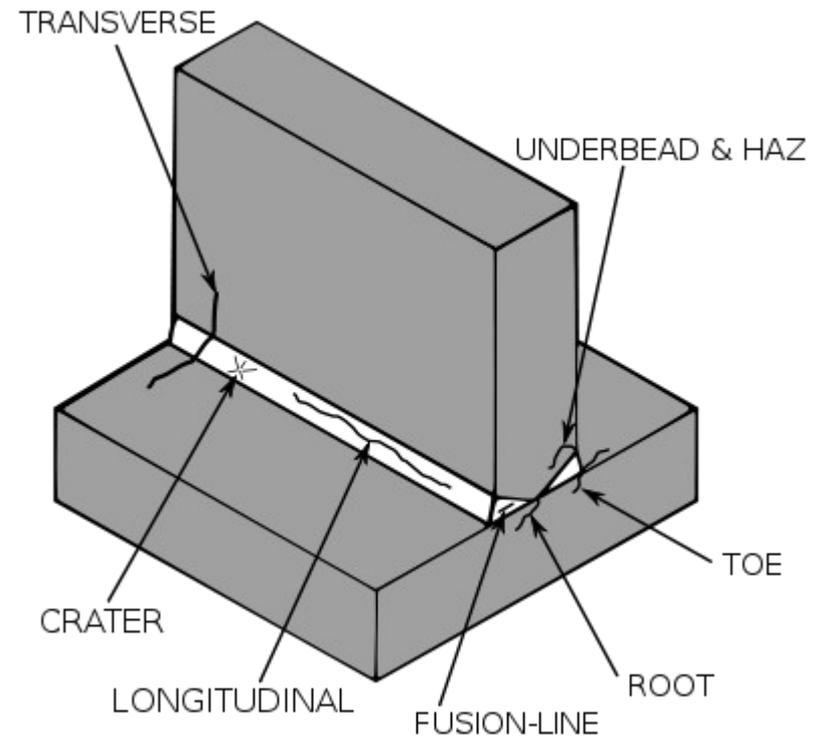
DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Tipos de **trinca de superfície**:

- Transversal
- Longitudinal
- Trinca de cratera
- Trinca na margem ou Toe Crack (normalmente vem à superfície)



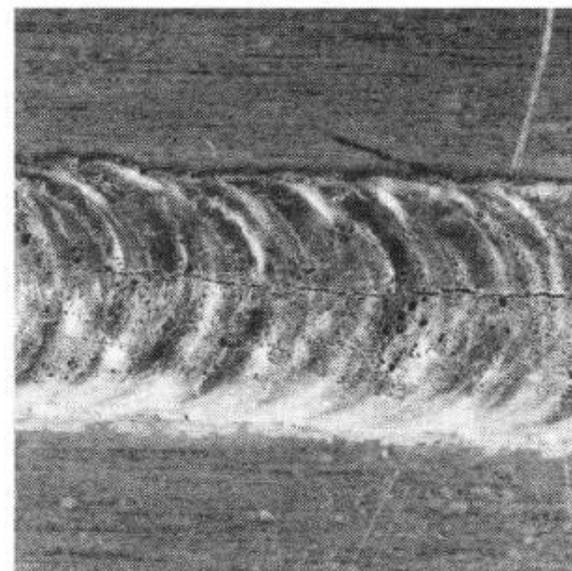
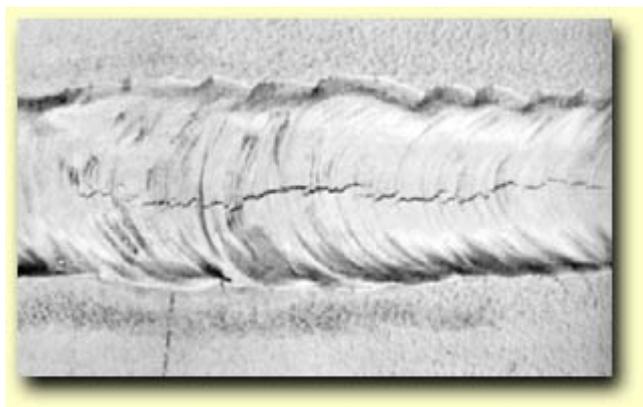
DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Trincas de superfície:

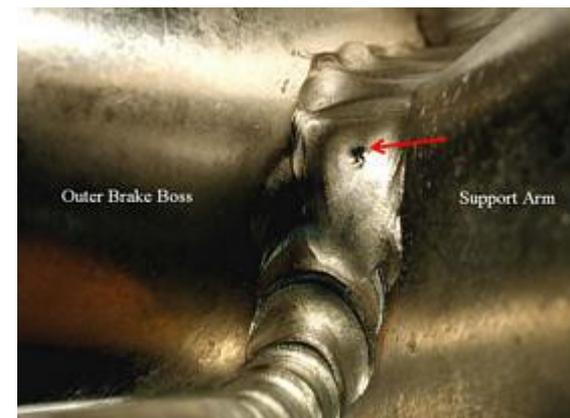
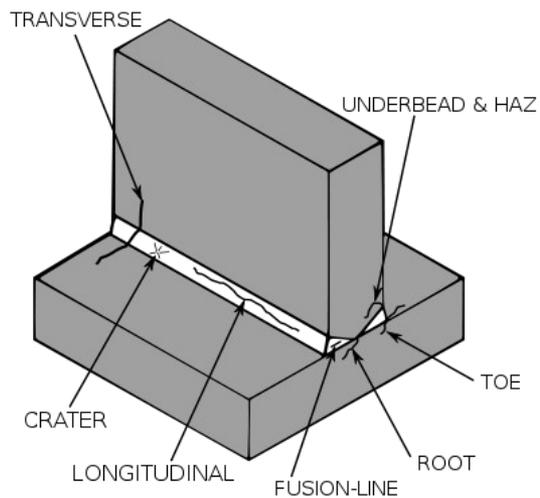
- Transversal
- Longitudinal



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



Trinca de superfície

- Trinca de cratera



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Trinca de superfície

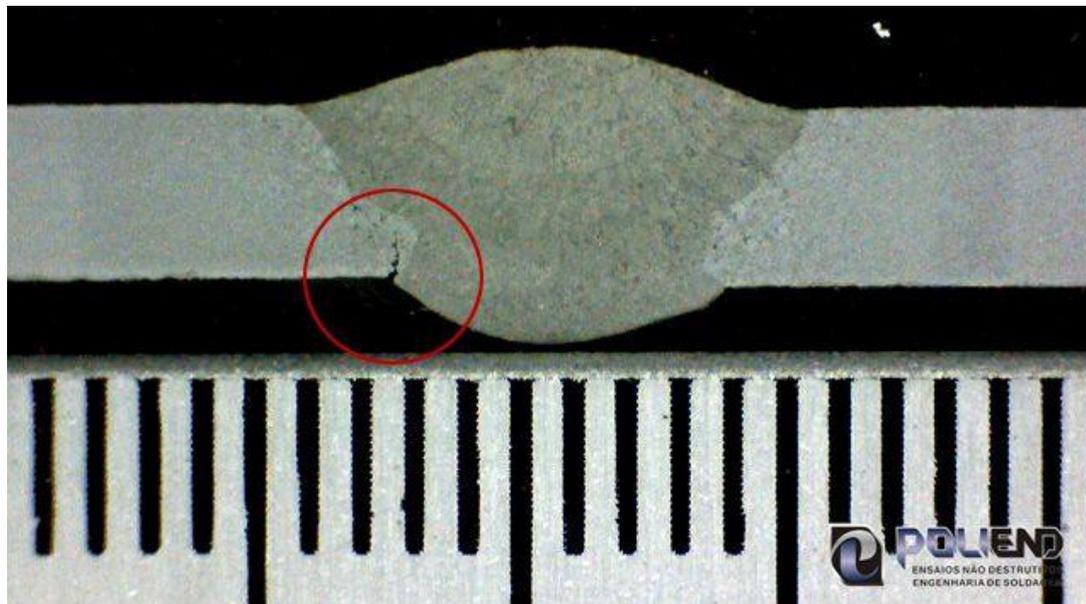
- Trinca de cratera



DEFEITOS EM SOLDAGEM

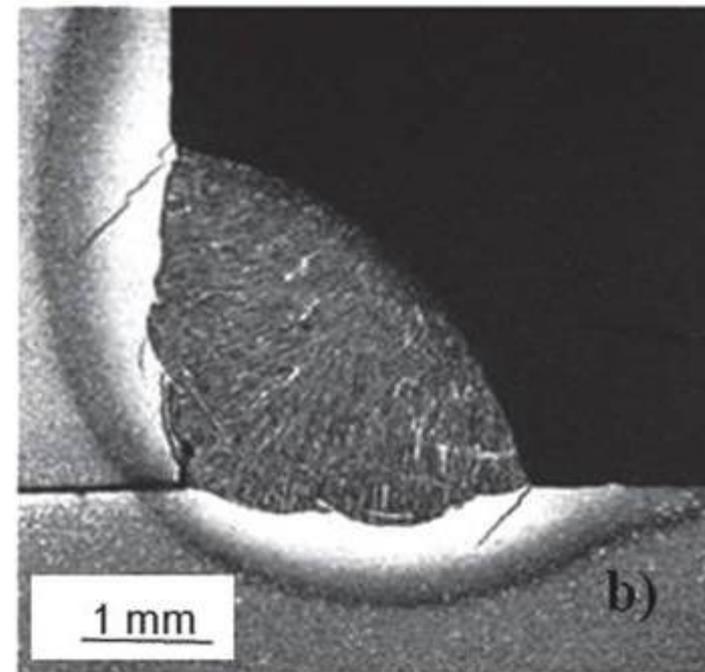
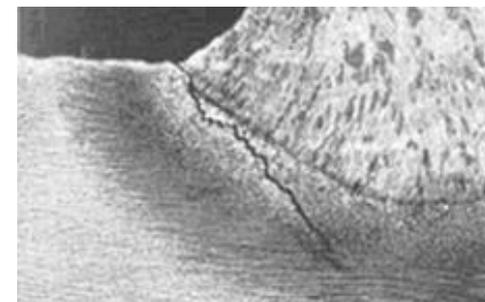
Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



Trinca de superfície

- *Toe Crack* (trinca na margem do cordão)

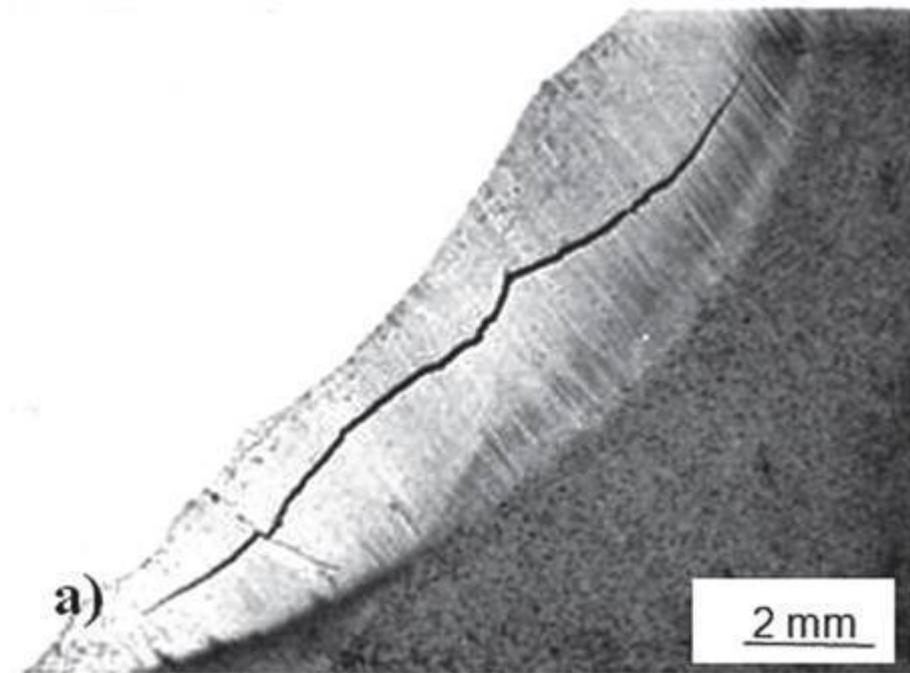
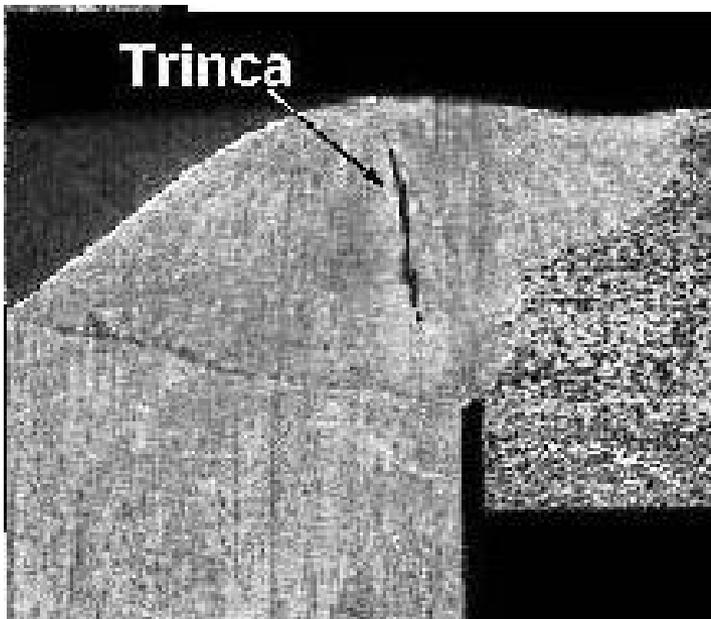


DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 100: Trincas

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- As **trincas internas** podem estar no cordão de solda ou na ZAC (underbead cracks)
- Pequenas trincas são também chamadas de microfissuras



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

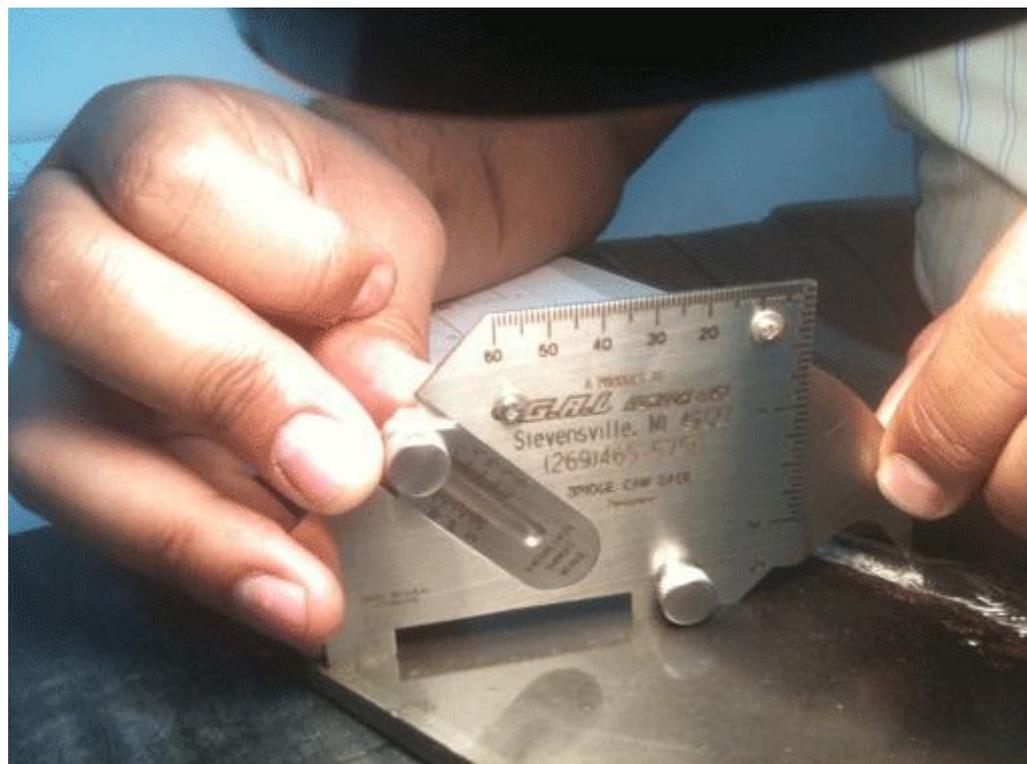
Inspeção de trincas:

- Trincas de superfície: Inspeção Visual, Líquido Penetrante
- Trincas internas: Exame Ultrassom, Raio X, Partícula Magnética

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

END – Ensaios Não Destrutivos: **Inspeção Visual**



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

END – Ensaios Não Destrutivos: **Líquido Penetrante**



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

END – Ensaio Não Destrutivo: **Ultrassom**



DEFEITOS EM SOLDAGEM

END – Ensaios Não Destrutivos:
Partícula Magnética



DEFEITOS EM SOLDAGEM

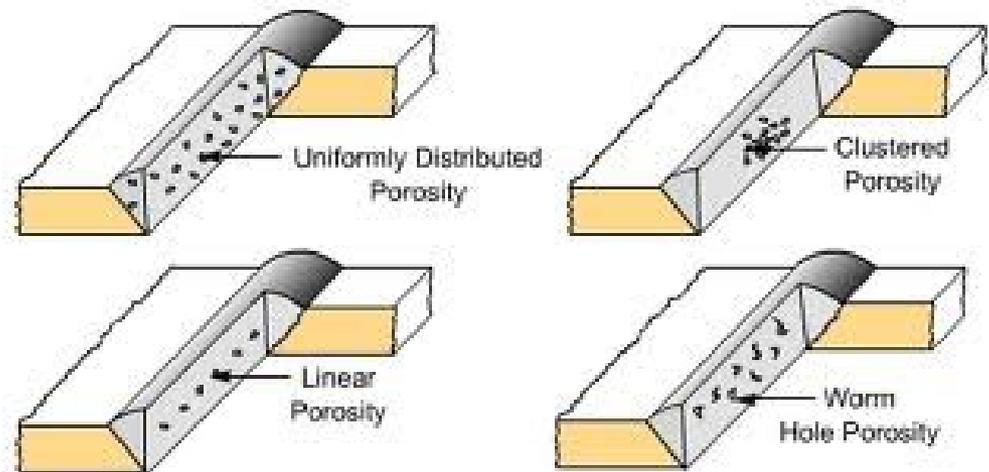
Série 200: Cavidades

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- O tipo mais comum de cavidade é a porosidade definida como a descontinuidade formada pelo aprisionamento de gás durante a solidificação
- Pode-se classificá-la como:

a) Porosidades de **superfície**

b) Porosidades **internas**



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 200: Cavidades

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Porosidades de **superfície**

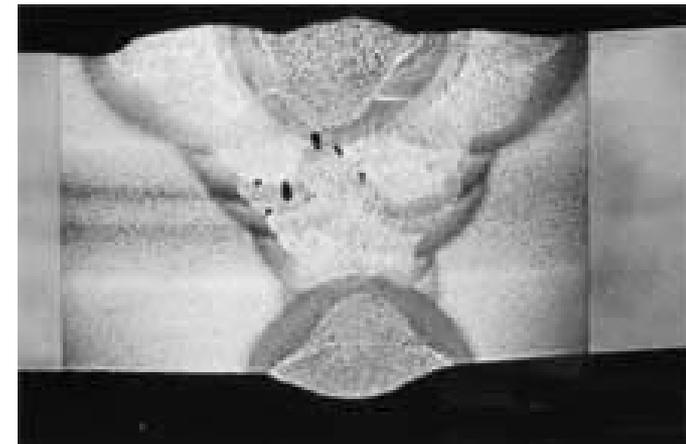
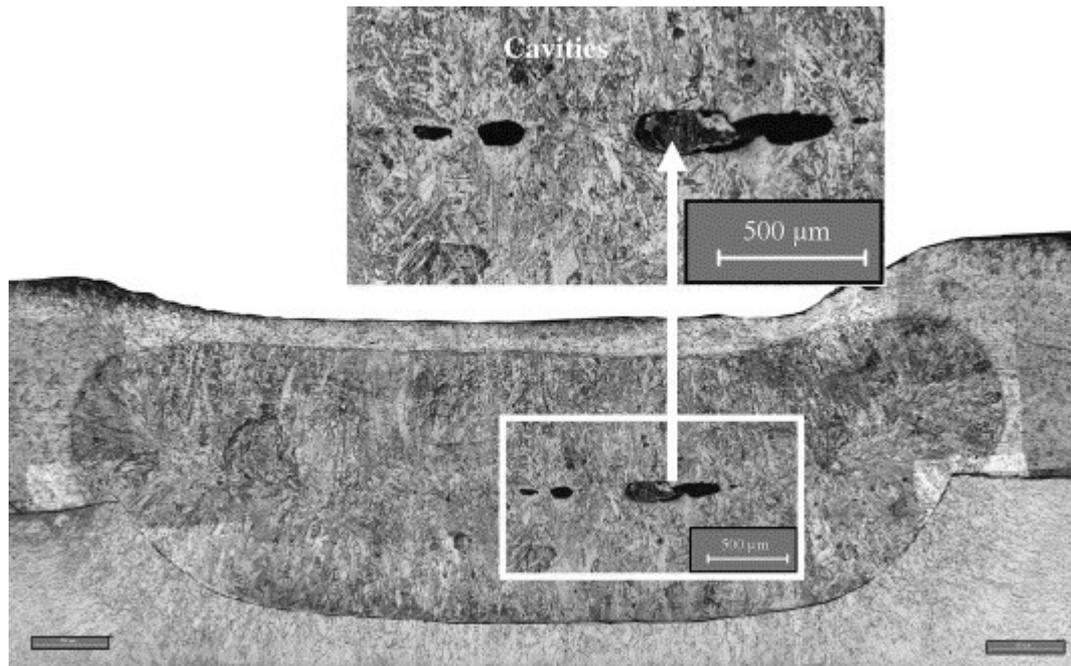


DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 200: Cavidades

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Porosidades **internas**

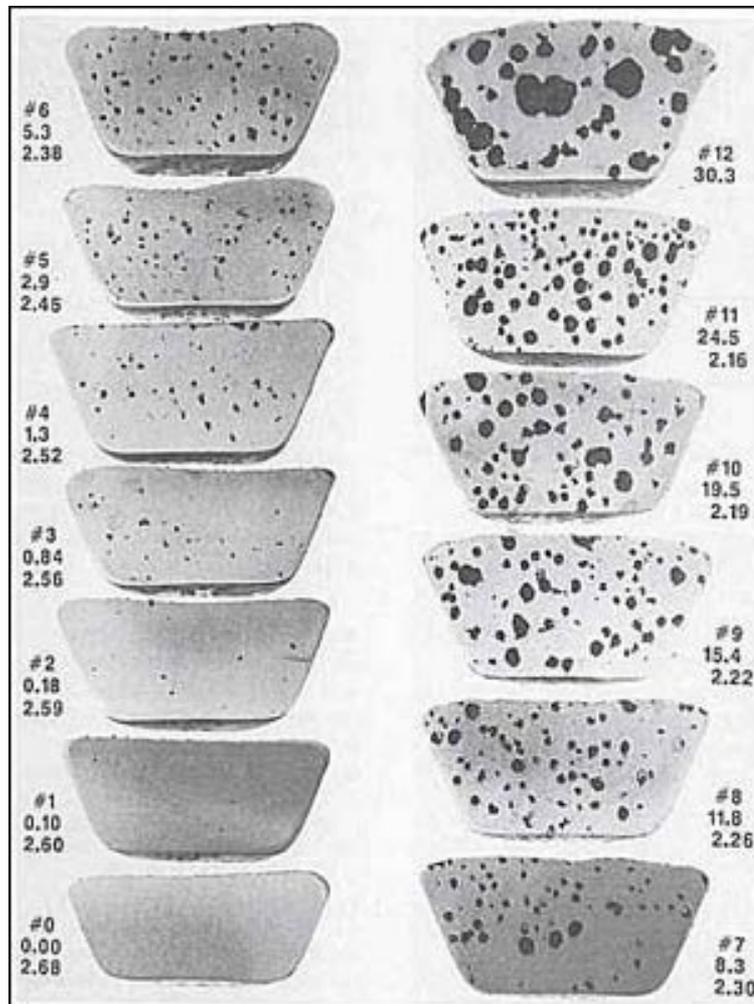


DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 200: Cavidades

*Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*Porosidades **internas**

- Carta de porosidade



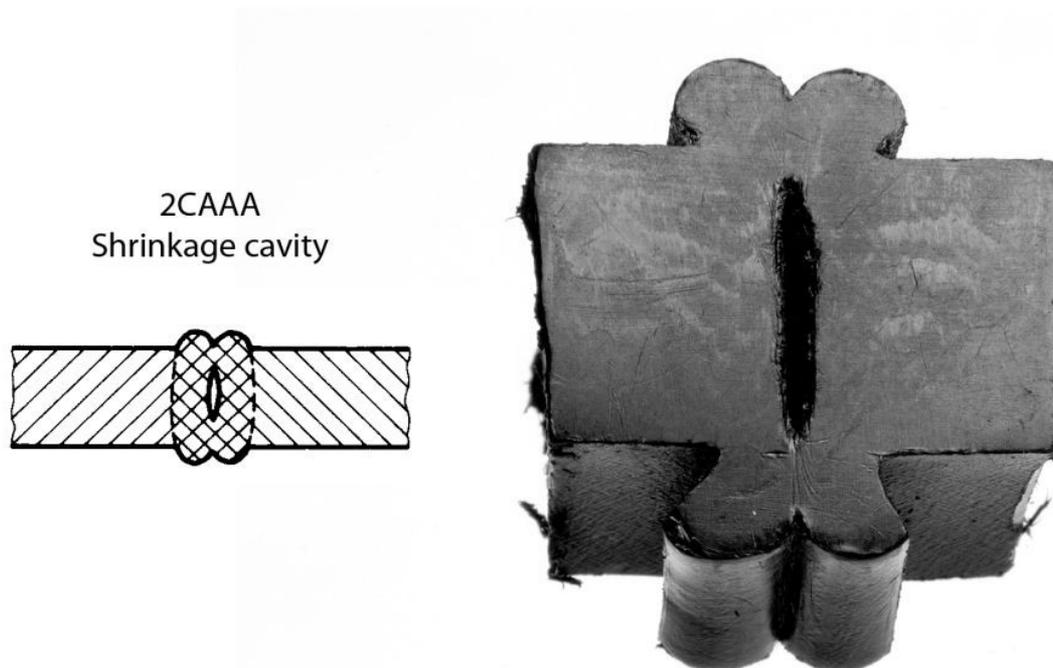
DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 200: Cavidades

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Porosidades **internas**

- Shrinkage cavity: Cavidade devido a contração na solidificação



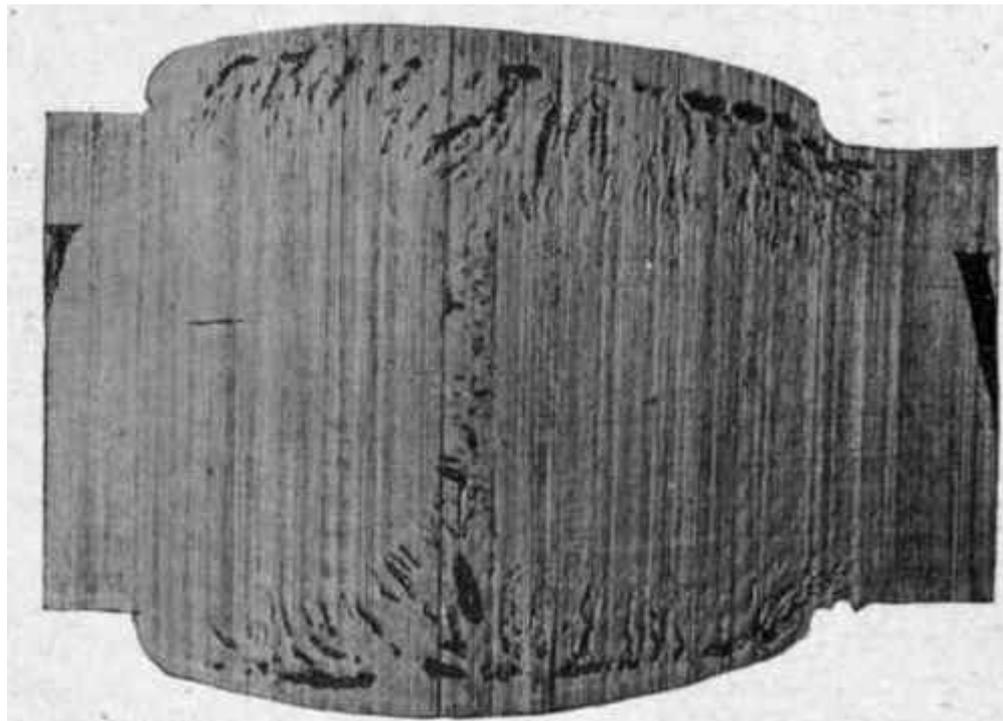
DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 200: Cavidades

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Porosidades **internas**

- Porosidade Vermiforme



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 300: Inclusões

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

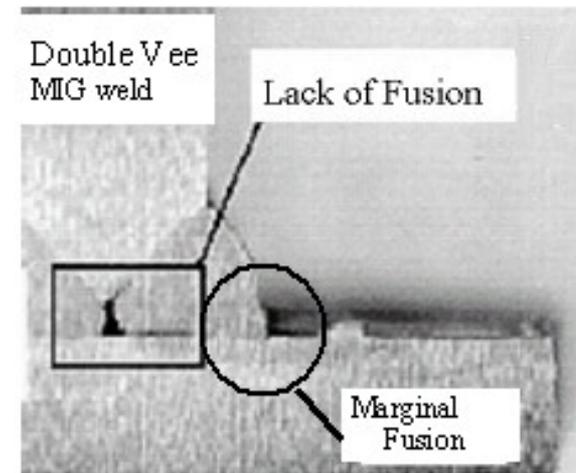
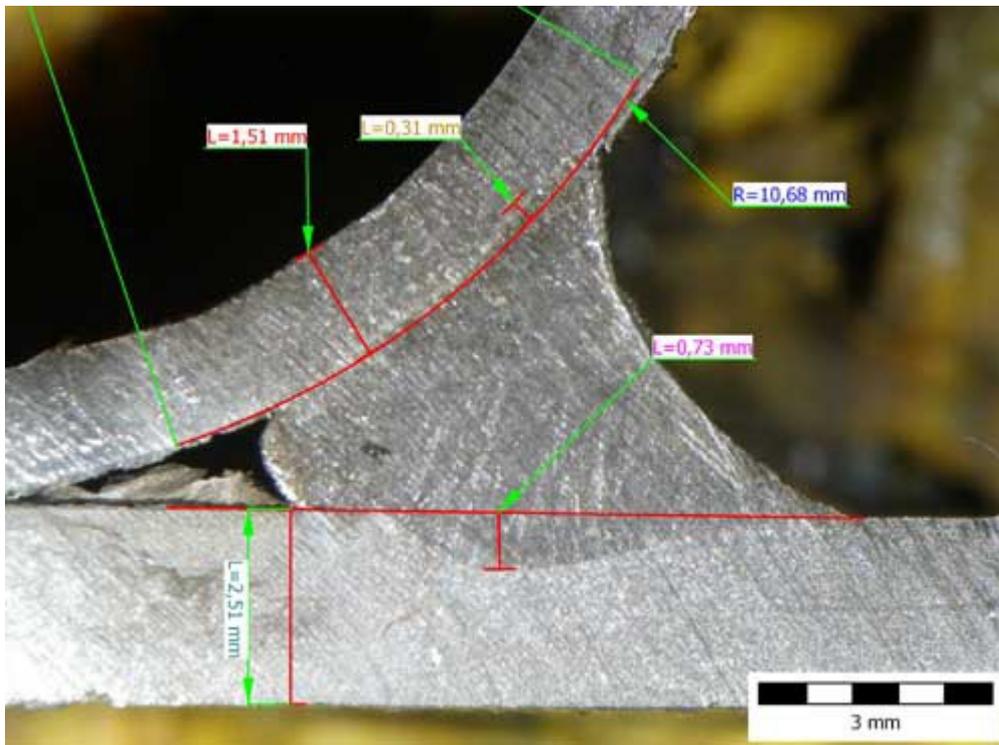
- Normalmente são defeitos internos
- Qualquer material estranho no depósito de metal de solda
- O mais comum defeito é a inclusão de escória, definido como o aprisionamento de material sólido não-metálico no cordão de solda
- Também pode ocorrer:
 - a) Inclusão de fluxo (SAW)
 - b) Inclusão de óxidos (soldagem de alumínio)
 - c) Inclusão de tungstênio (GTAW – teste radiográfico)

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 400: Falta de Fusão

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

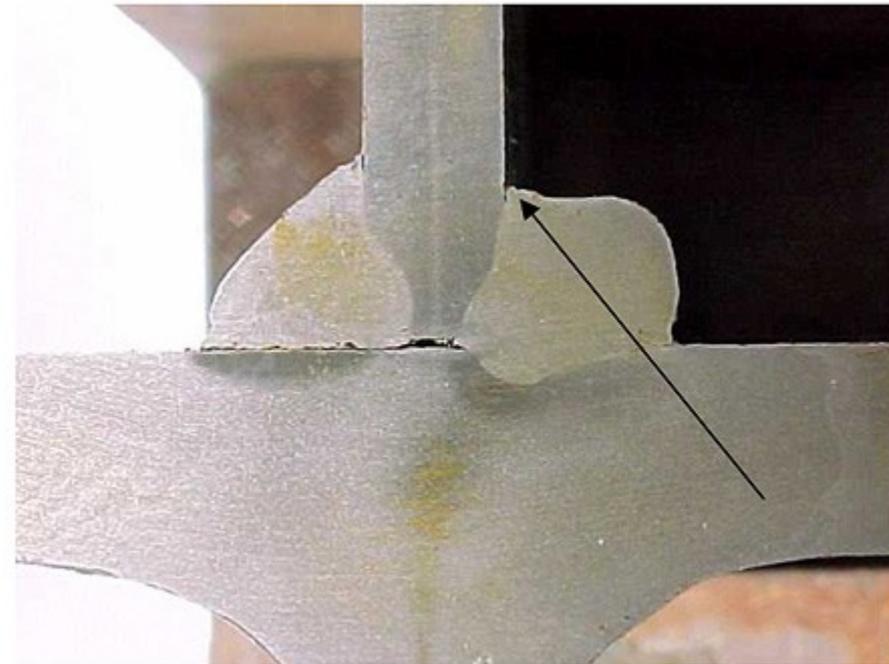
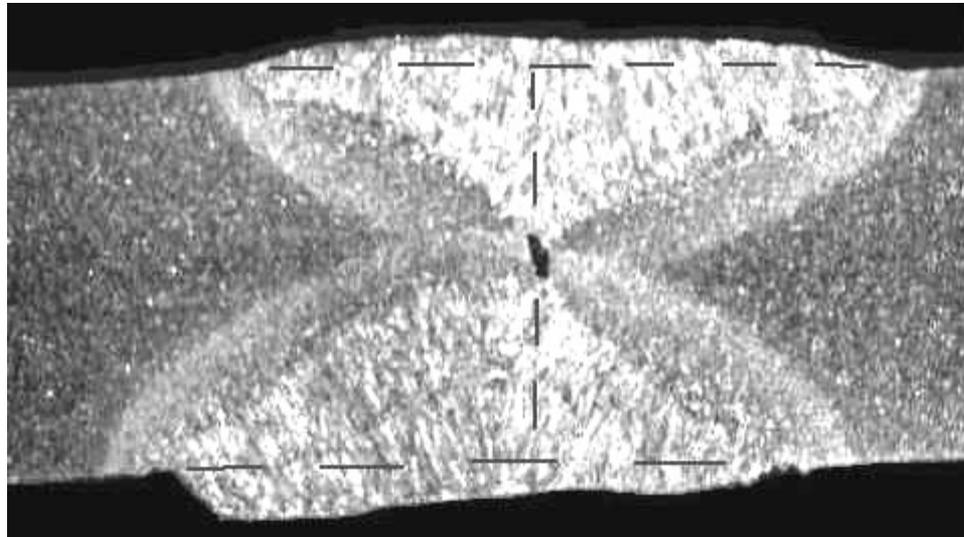
- Fusão incompleta, penetração incompleta, falta de penetração
- Séria redução de resistência estática e pontos de concentração de tensão



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 400: Falta de Fusão

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

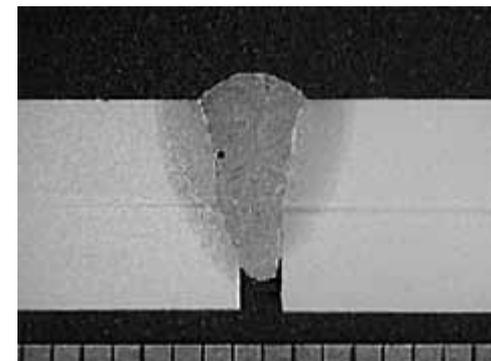


Overlap (Arrowed) and lack of fusion

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 400: Falta de Fusão

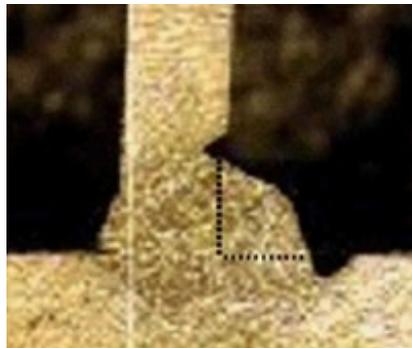
Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 500: Defeito de forma *Processos de Fabricação III - SOLDAGEM*

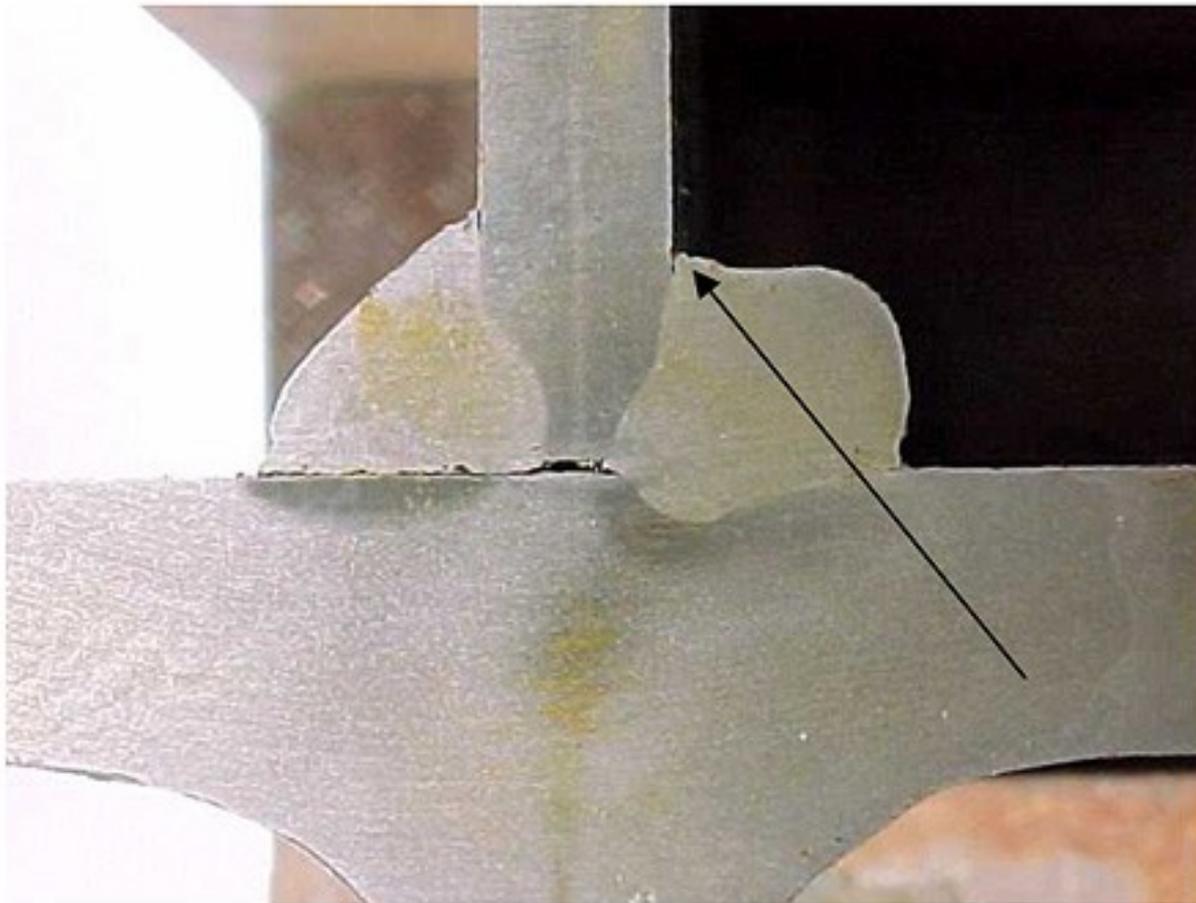
- Caracterizado pelo contorno impróprio do cordão, a mordedura é um dos exemplos



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 500: Defeito de forma

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

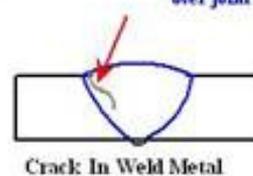
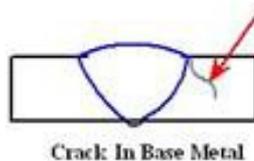
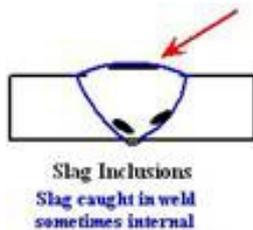
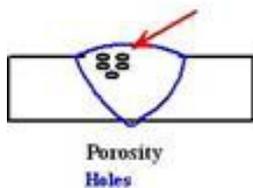
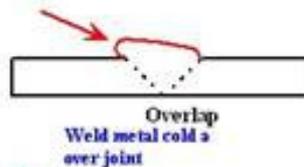
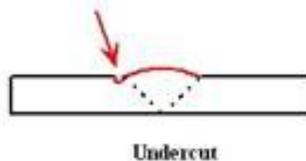
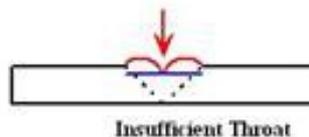
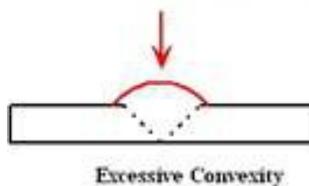
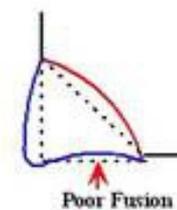
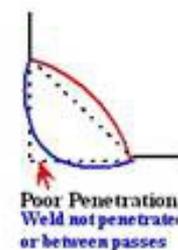
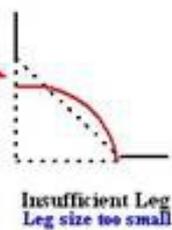
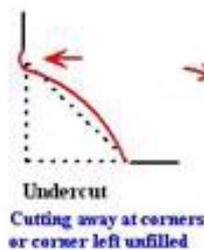
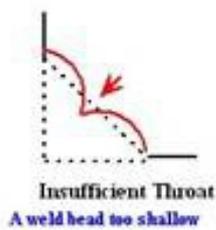
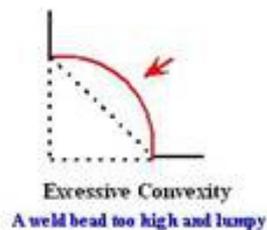
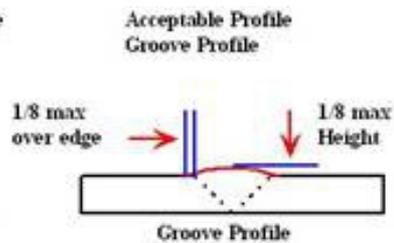
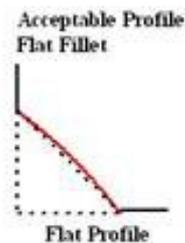
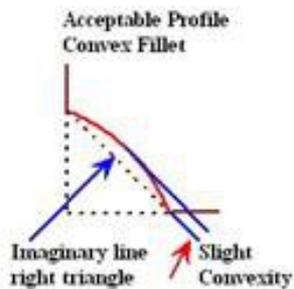


Overlap (Arrowed) and lack of fusion

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 500: Defeito de forma

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

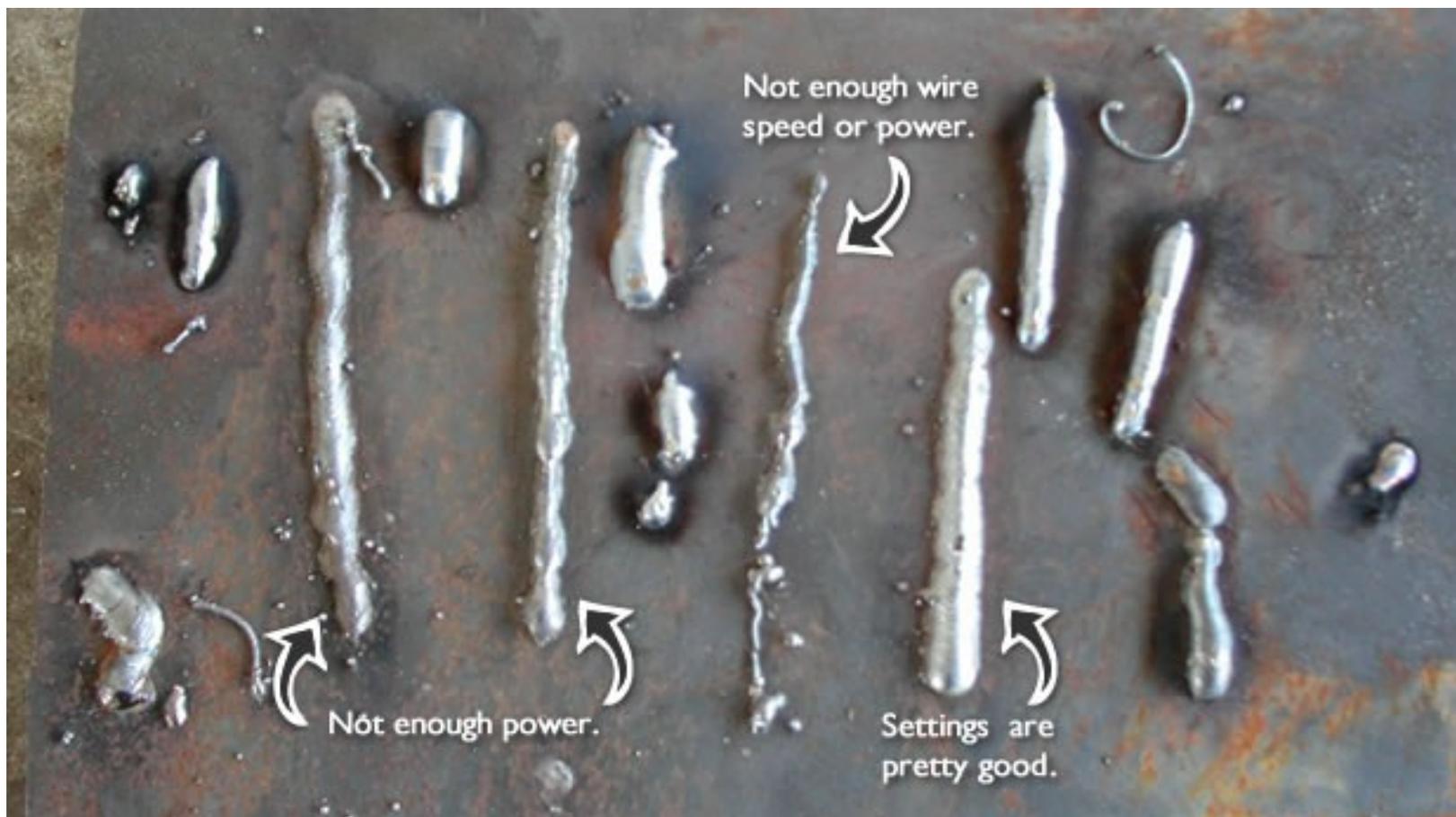


DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 600: **Miscelânea**

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- Aparência ruim

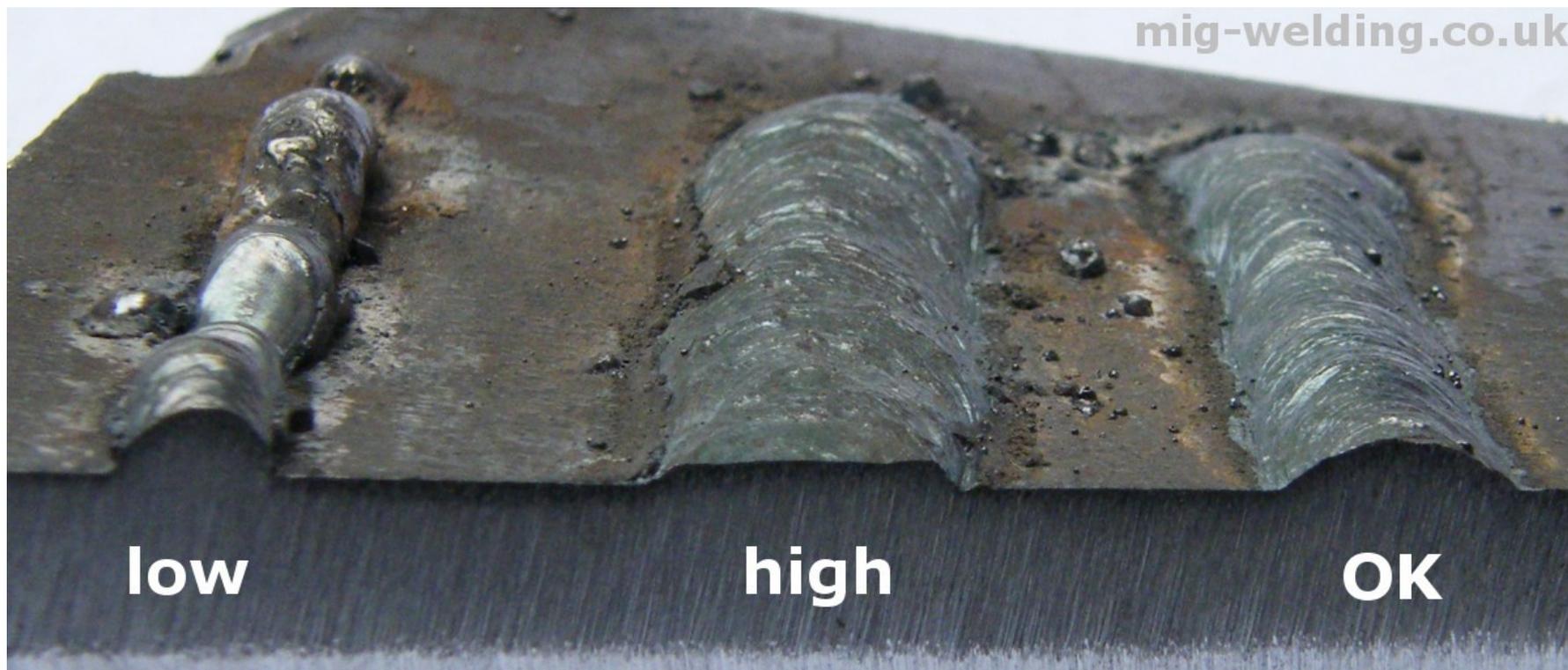


DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 600: **Miscelânea**

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- Aparência ruim

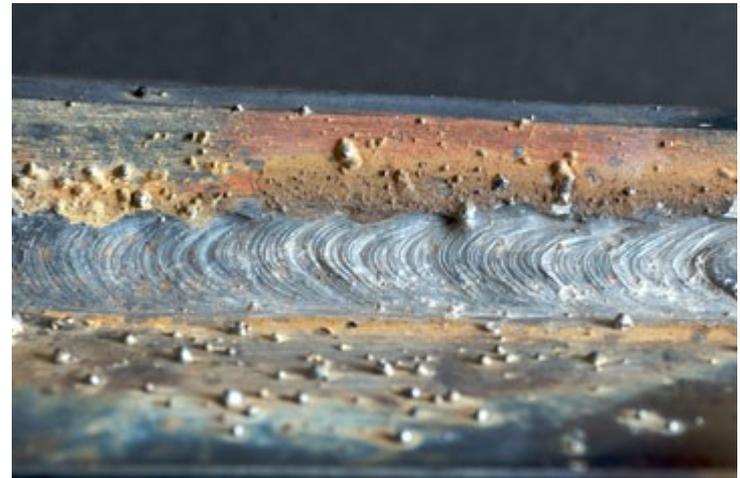


DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 600: **Miscelânea**

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- Excesso de Respingos



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Série 600: **Miscelânea**

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- Excesso de Respingos



DEFEITOS EM SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



DEFEITOS EM SOLDAGEM

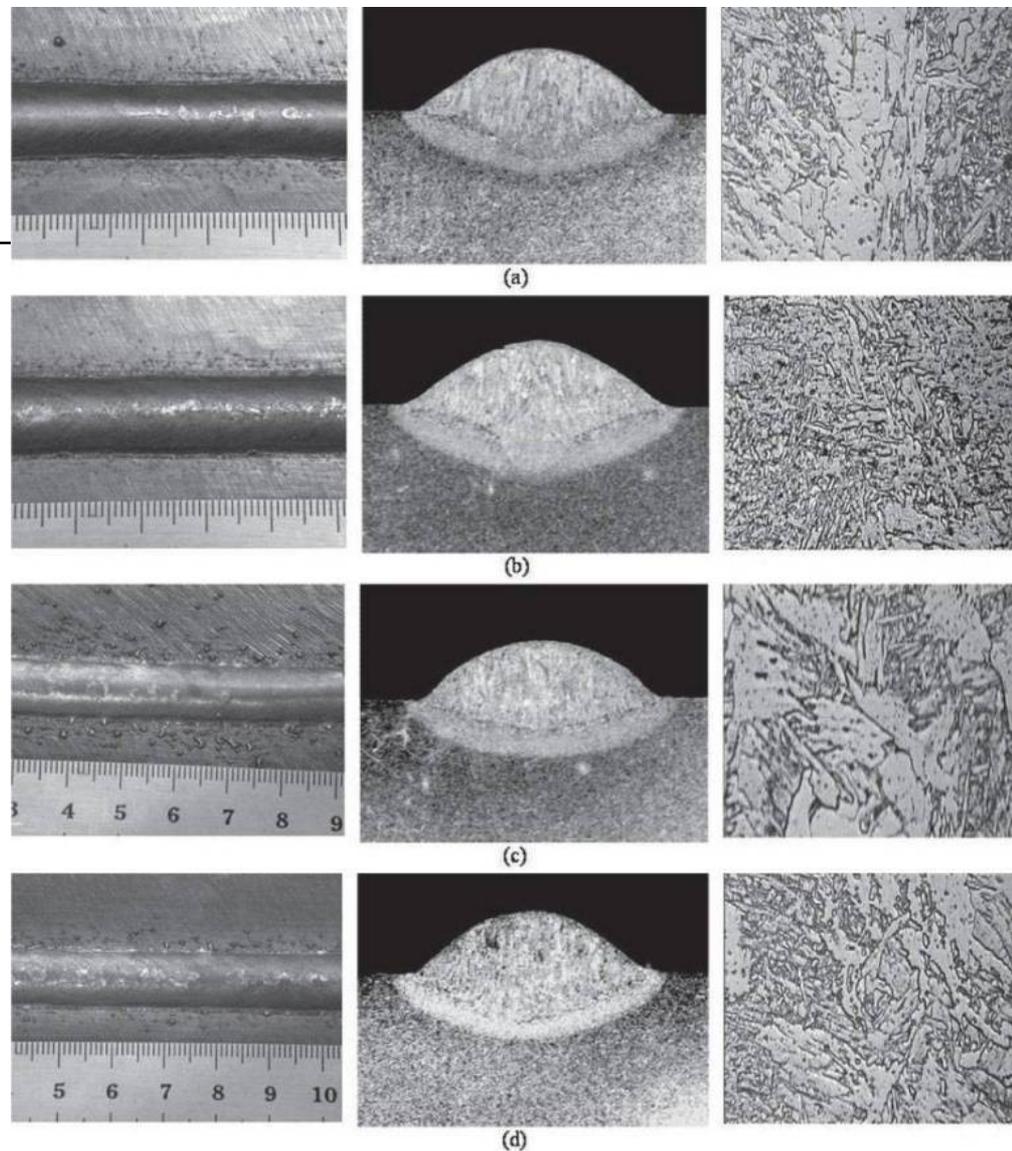


Figura 5. Cordões obtidos para as soldas do arame “metal cored” com 75%Ar-25%CO₂. Aspecto superficial (esquerda). Macrografia – Nital 10 % (centro). Micrografia – MO, aumento original 500 X, Nital 2 % (direita).

(a) Polaridade positiva, velocidade de alimentação nominal de 7 m/min.

(b) Polaridade positiva, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.

(c) Polaridade negativa, velocidade de alimentação nominal de 7 m/min.

(d) Polaridade negativa, velocidade de alimentação nominal de 9 m/min.

DEFEITOS EM SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

TABLE 21-1 GUIDE TO WELD QUALITY CONTROL TECHNIQUES

Examination Technique	Equipment	Defects Detected	Advantages	Disadvantages	Other Considerations
Visual: VT	Pocket magnifier, welding viewer, flashlight, weld gauge, scale	Weld preparation, fitup, cleanliness, roughness, spatter, undercuts, overlaps, weld contour and size; welding procedures	Easy to use; fast; inexpensive; usable at all stages of production	For surface conditions only; dependent on subjective opinion inspector	Most universally used examination method
Dye penetrant or fluorescent: DPT, FPT	Fluorescent or visible penetrating liquids and developers; ultraviolet light for the fluorescent type	Defects open to the surface only; good for leak detection	Detects very small, tight, surface imperfections, easy to apply and to interpret; inexpensive; use on magnetic or nonmagnetic materials	Time consuming in the various steps of the process; normally no permanent record	Often used on root pass of highly critical gas welds if material improperly cleaned; some indications may be misleading
Magnetic particle: MT	Iron particles, wet or dry, or fluorescent; special power source; ultraviolet light for the fluorescent type	Surface and near-surface discontinuities, cracks, etc.; porosity, slag	Indicates discontinuities not visible to naked eye; useful in checking edges prior to welding, also, repairs; no size restriction	Used on magnetic materials only; surface roughness may distort magnetic field; normally no permanent record	Examination should be from two perpendicular directions to catch discontinuities that may be parallel to one set of magnetic lines of force
Radiographic: RT	X-ray or gamma ray; source: film processing equipment, film viewing equipment, penetrameters	Most internal discontinuities and flaws; limited by direction of discontinuity	Provides permanent record; indicates both surface and internal flaws; applicable on all materials	Usually not suitable for fillet weld inspection; film exposure and processing critical; slow and expensive	Most popular technique for subsurface inspection; required by some codes and specifications
Ultrasonic: UT	Ultrasonic units and probes; reference and comparison patterns	Can locate all internal flaws located by other methods with the addition of exceptionally small flaws	Extremely sensitive; use restricted only by complex weldments; can be used on all materials	Demands highly developed interpretator skill	Required by some codes and specifications