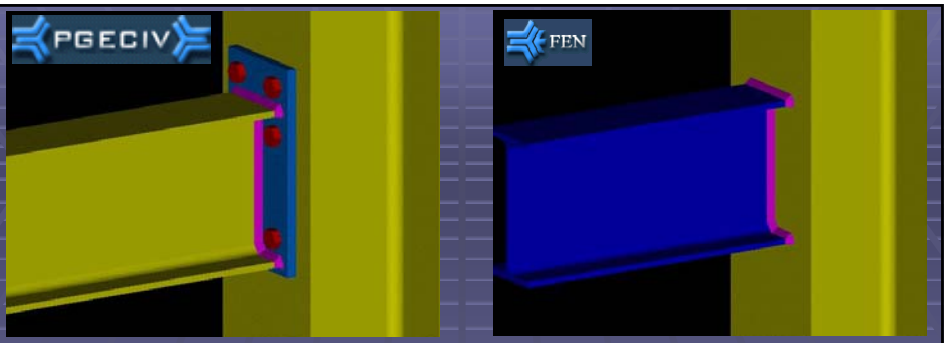


Ligações Soldadas

Primeira Parte

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

PGECIV - Mestrado Acadêmico

Faculdade de Engenharia – FEN/UERJ

Disciplina: Tópicos Especiais em Estruturas (Ligações em Aço e Mistas)

Professor: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

1

2

PGECIV FEN

1. Introdução

- A solda é um processo de ligação obtido através da fusão de camadas do material das partes a serem ligadas;
- Eletrodo ← Solda → Metal Base

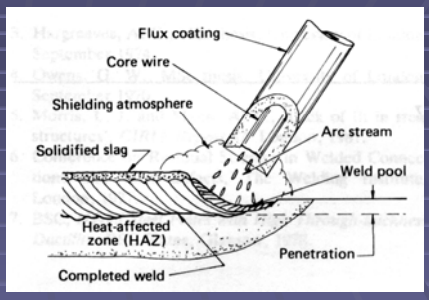
  Arco voltaico → energia térmica (calor)
- Energia térmica → derrete o metal base e a solda
- Move-se o eletrodo → desloca-se o arco → solidificação (depósito de eletrodo – g/min)
- Proteção do material liquefeito → prevenir oxidação
  - ✓ Gases inertes, material protetor (fluxo) → oxidação, camada superficial controla o formato da solda

3

PGECIV FEN

2. Tipos Principais de Soldas

- Solda por arco voltaico (MMA – "manual metal arc")
  - ✓ Processo mais comum de soldagem em estruturas de aço é a solda por arco voltaico
  - ✓ calor necessário para a fusão do material → formação de um arco voltaico entre um eletrodo e as partes a serem unidas, denominadas de metal base
  - ✓ eletrodo manual (ϕ 2,5 a 6 mm)
  - ✓ maior flexibilidade → solda em qualquer posição



Solda por arco voltaico

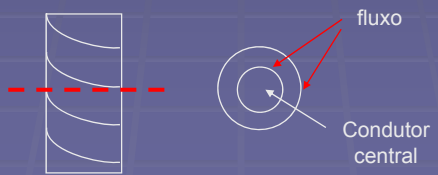
  - ✓ exige pouca preparação
  - ✓ qualidade da solda → habilidade do soldador
  - ✓ voltagem → 50 a 90 V (25 a 30 V em serviço) e Corrente → 50 a 400 amps

4

PGECIV FEN

2. Tipos Principais de Soldas

- Solda automática com eletrodo contínuo revestido
  - ✓ similar ao anterior
  - ✓ linhas de soldagem → eletrodo contínuo (carretel)
  - ✓ para impedir a quebra de fluxo (proteção), o eletrodo é revestido por um fio condutor em forma de espiral ("spin")

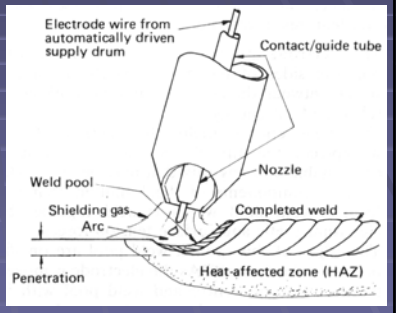


5

PGECIV FEN

2. Tipos Principais de Soldas

- Solda com proteção gasosa
  - ✓ MAG → "metal active gas"
  - ✓ MIG → "metal inert gas" (argônio ou hélio – metais não ferrosos)
  - ✓ proteção através de gas
  - ✓ controle automático do consumo de eletrodo, gás e corrente elétrica
  - ✓ ϕ do eletrodo → 0,75 a 2 mm
  - ✓ voltagem → 20 a 30 V
  - ✓ corrente → 50 a 200 amps.
  - ✓ elevada taxa de deposição – maior do que 150g/min



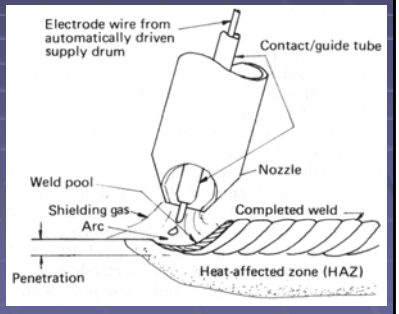
Solda com proteção gasosa

6

PGECIV FEN

2. Tipos Principais de Soldas

- Solda com proteção gasosa
  - ✓ Qualquer posição para soldagem
  - ✓ Baixa corrente → dip transfer
  - ✓ Alta corrente → spray transfer
  - ✓ Flux coated wire
    - Ligas antioxidantes estabilizadoras de arco

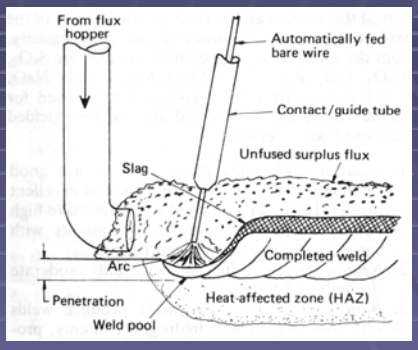


Solda com proteção gasosa

7

2. Tipos Principais de Soldas

- Solda com arco submerso
  - ✓ utilizado em processos automáticos de soldas efetuadas em fábrica
  - ✓ neste processo, a barra do eletrodo é um fio embebido em um material granular fusível que isola o material fundido da atmosfera
  - ✓ corrente elevada
  - ✓ Taxa de deposição elevada (300g/min) → 2 ou 3 eletrodos ao mesmo tempo



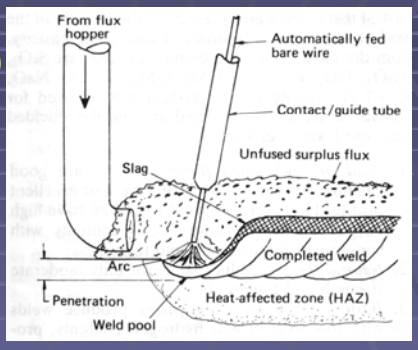
Solda com arco submerso

- ✓ ϕ do eletrodo → 2 a 5 mm
- ✓ Voltagem → 30 a 40 V
- ✓ Corrente → 1200 amps.
- ✓ Alta qualidade

8

2. Tipos Principais de Soldas

- Solda com arco submerso
  - ✓ Corrente alta → Maior profundidade de penetração nos metais base/solda
  - ✓ Desvantagens
    - Somente posições horizontal/ vertical plana → natureza granular do fluxo
    - Alta deposição
    - Gera metais de solda com baixa resistência → alta granulação → resfriamento muito lento → correção → tratamento térmico



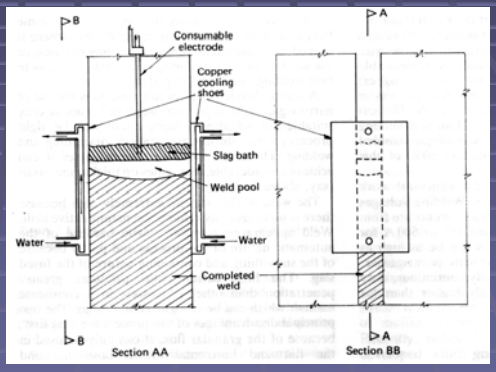
Solda com arco submerso

9

PGECIV FEN

2. Tipos Principais de Soldas

- Solda "Eletroslag"



✓ também utilizada em processos automáticos para ligação de chapas grossas

✓ processo de arco

✓ devido elevada temperatura, o resfriamento é muito lento

✓ Tratamento térmico

10

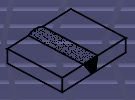
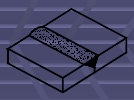
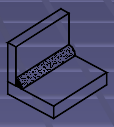
PGECIV FEN

3. Tipos de Proteção ("flux")

- Seção 2.3 – Owens
  - ✓ deve ser utilizado nos processos de solda por arco voltaico, com eletrodo contínuo revestido, arco submerso e "*eletroslag*"
  - ✓ a composição do material depende do processo de solda
    - formadores de gás
    - formadores de escória ("slag")
    - iniciadores e estabilizadores de arco → metálicos (níquel e ferro)
    - agentes de fluxo → diminuem as impurezas na solda e são constituídos basicamente de óxidos ou carbonatos
    - etc.

11

4. Preparação das Superfícies

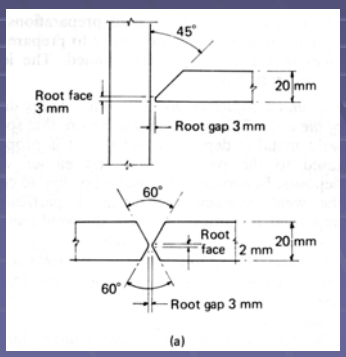




- Filete
  - ✓não necessitam de preparação
- Entalhe – preparação ideal
  - ✓acesso total ao longo da profundidade da solda
  - ✓minimiza o volume de material depositado
  - ✓minimiza os custos de preparação
  - ✓não leva a inclusões ou descontinuidades
  - ✓Permite acomodações da estrutura → 1 / 2 mm enrijecedor
  - ✓Não deve ser utilizada em estruturas "offshore"

12

4. Preparação das Superfícies

- Entalhe
  - ✓ ponto crítico → primeiro passo (preparação da raiz da solda)
  - ✓ root gap → razoável de forma a não permitir a penetração da solda para o outro lado
  - ✓root face → suficientemente profundo para impedir vazamento e garantir que não ocorra penetração parcial

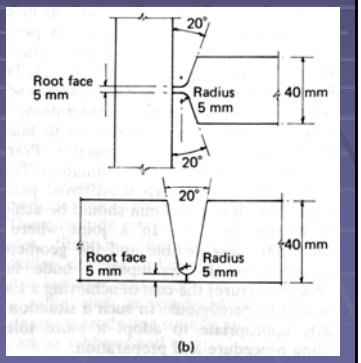


chapas finas

13

4. Preparação das Superfícies

- Entalhe
  - ✓ root gap e root face → processo de solda utilizado
  - ✓ chapas mais grossas → maior tempo de preparação mas menor consumo de eletrodo → preparação em J
  - ✓ chapas finas → preparação reta ou biselada
  - ✓ preparação simples ou dupla
    - acesso a solda
    - rotação da estrutura
    - espessura da placa / controle de distorção



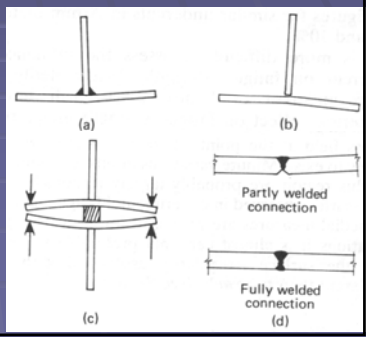
chapas grossas

14

5. Controle de Distorção

- ✓ solidificação → contração → distorção → σ residuais de tração acompanhadas de plastificação
- ✓ encurtamento longitudinal → flambagem local
- ✓ ligações → chapas rígidas que não flambam com facilidade

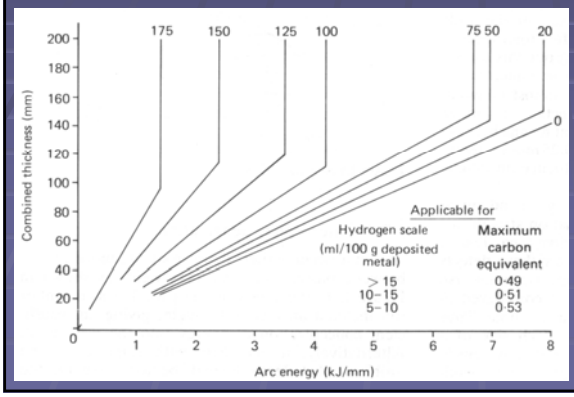
- ✓ encurtamento transversal
  - angulares e para fora do plano (a)
  - contra distorção → aquecimento local p/ indução (b)
  - restrição a distorção → flexão elástica (c)
  - compensação → distorção com sentidos contrários (d)



15

6. Pré-aquecimento

- ✓ velocidade de resfriamento → fratura na região afetada termicamente
- ✓ pré-aquecimento reduz a velocidade de resfriamento

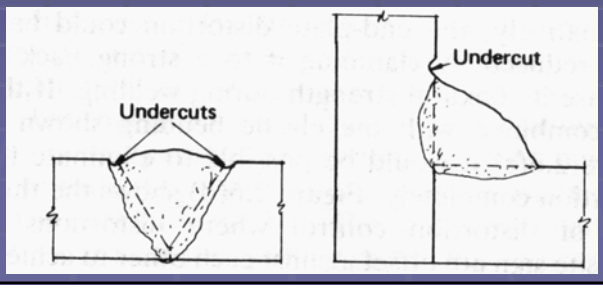


- ✓ temperatura de pré-aquecimento
  - espessura da placa
  - energia do arco
  - composição química dos metais
- ✓ "cold cracking" → fratura frágil

16

7. Principais defeitos de Solda

- "Undercut" → muito metal base é absorvido pela região da solda
  - ✓ correntes muito altas → turbulência de solda líquida
  - ✓ passos únicos muito largos → perde-se a orientação da linha média da solda

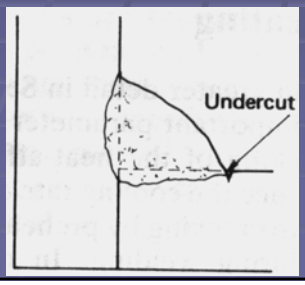


17

PGECIV FEN

7. Principais defeitos de Solda

- "Undercut" → muito metal base é absorvido pela região da solda
  - ✓ falta de aquecimento do metal base
  - ✓ difíceis de detectar → profundidade menor que 0,25 mm que influenciam a resistência à fadiga



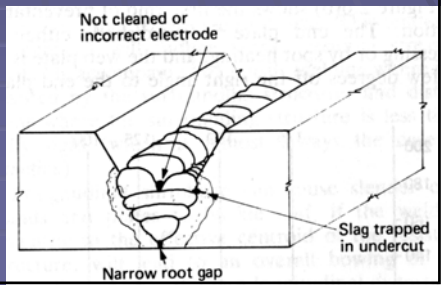
- ✓ perda de área efetiva na solda
- ✓ placa com 10 mm com defeitos "undercut" de 0,5 mm de cada lado → perda de até 10% na resistência à tração e até 19% na resistência à flexão
- ✓ Fadiga
  - Melhor desbastar (Lixadeira)
  - Pior ressoldar

18

PGECIV FEN

7. Principais defeitos de Solda

- Inclusões "Slag" → partículas não metálicas provenientes do fluxo que se misturam à solda líquida
  - ✓ também diminuem a resistência
  - ✓ muitos passos ou limpeza mal executada
  - ✓ eletrodo incorreto
  - ✓ perda da raiz da solda → proximidade com o "root gap"

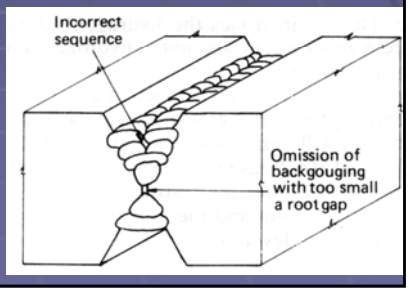


19

PGECIV FEN

7. Principais defeitos de Solda

- Penetração Incompleta (parcial)
  - ✓ baixa corrente
  - ✓ ângulo de inclinação do eletrodo elevado → insuficiente concentração de energia
  - ✓ eletrodo muito grande para o tamanho da junta
  - ✓ seqüência de soldagem errada
  - ✓ pequena abertura de raiz
  - ✓ solda pelo lado oposto
  - ✓ pouco provável de acontecer na solda com arco submerso
    - correntes elevadas

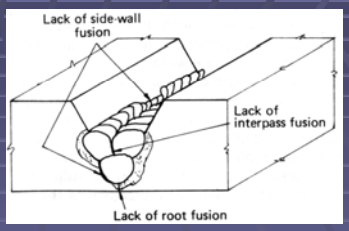


20

PGECIV FEN

7. Principais defeitos de Solda

- Fusão Incompleta
  - ✓ falta de penetração leve
    - rebarbas ou limpeza mal feita
  - ✓ um passo não se liga ao outro

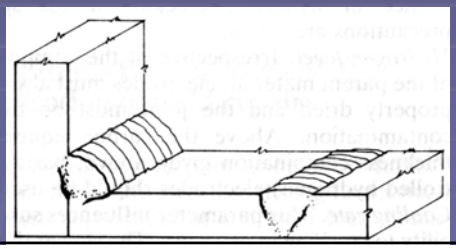


- Porosidade
  - ✓ pequenas cavidades no metal da solda → aprisionamento de gás na solda líquida
  - ✓ solubilidade do gás ↓ temperatura ↓
  - ✓ lixadeira → liberar gases retidos → nova solda

21

7. Principais defeitos de Solda

- Fratura Frágil (zona termicamente afetada)
  - ✓ a fratura pode se desenvolver anos depois da solda ser executada
  - ✓ perda de ductilidade (composição química) → endurecimento
  - ✓ presença de hidrogênio → umidade / hidrocarbonos



22

7. Principais defeitos de Solda

- Fratura Frágil (zona termicamente afetada)
  - ✓ Estabilidade ↓ Temperatura ↓
  - ✓ perda de ductilidade (composição química) → endurecimento
  - ✓ presença do gás → frágil → fissuras
- Eliminação da fratura frágil
  - ✓ A) Controle da Composição Química % C Equivalente
    - Se % CE ≥ 0,41% e espessura da placa t ≥ 30mm → Fratura frágil
    - %CE = %C + %Mn / 6 + (%Ni + %C) / 15 + (%Cr + %Mo + %V) / 5
  - ✓ Nível de Hidrogênio
    - Eletrodos secos (forno)
    - Para níveis maiores de %CE > 0.41% e t ≥ 30mm → Eletrodos especiais (hidrogênio controlado)

23

PGECIV FEN

7. Principais defeitos de Solda

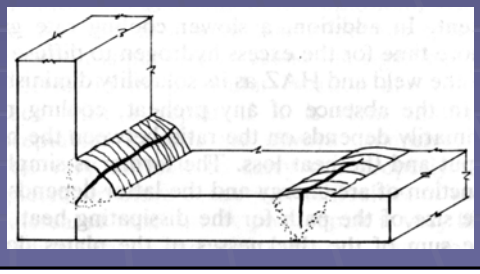
- Eliminação da fratura frágil
  - ✓Taxa de resfriamento
    - Sem preaquecimento depende da razão calor fornecido (energia do arco) / calor dissipado (tipo de passe)
    - Menor a taxa → H se dissipa mais rápido e facilmente
  - ✓Restrição
    - Maior restrição → mais tensões residuais → maior tendência de produzir fratura

24

PGECIV FEN

7. Principais defeitos de Solda

- Solidificação do Metal Base
  - ✓ fratura longitudinal no centro da solda logo após a solidificação
  - ✓ o último ponto a se resfriar → contração → fratura
  - ✓ impurezas formam um micro filme ao longo dos grãos → fratura preferencial
  - ✓ passos menores
  - ✓ menos corrente
  - ✓ eletrodos com alta concentração de manganês (ponto de fusão maior do sulfato de manganês)

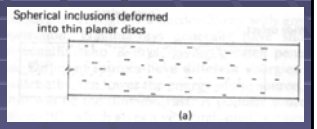


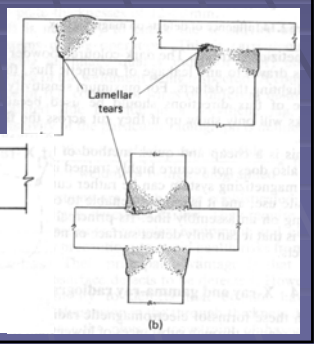
25

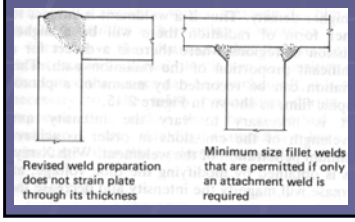
PGECIV FEN

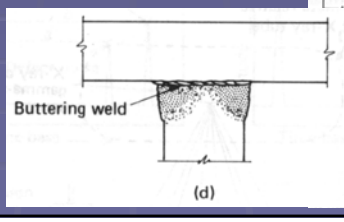
7. Principais defeitos de Solda

- Fratura Lamelar
  - ✓ causada por defeitos provocados na laminação do perfil conjugados com deformações provocadas por encurtamento após efetuada a solda
  - ✓ Impurezas alongadas
  - ✓ Metal da junta → Grande ductilidade
  - ✓ Fratura interna
  - ✓ Aços especiais









26

PGECIV FEN

8. Inspeção

- Inspeção visual
  - ✓ qualidade de preparação / execução da solda
  - ✓ fratura de passo na raiz
  - ✓ alinhamento dos passos / multipasso
  - ✓ limpeza após cada passo
  - ✓ "undercut", porosidade e perfil da superfície da chapa soldada
  - ✓ configuração final da solda

27

8. Inspeção

- Líquidos penetrantes → Fraturas superficiais
- Partículas magnéticas → Variação no fluxo magnético

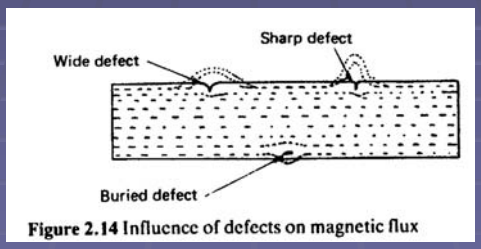


Figure 2.14 Influence of defects on magnetic flux

28

8. Inspeção

- Raio X e Ultrasom

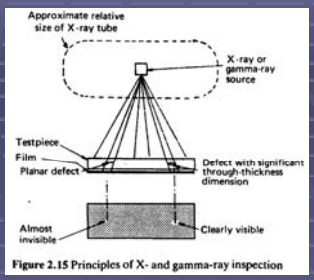


Figure 2.15 Principles of X- and gamma-ray inspection

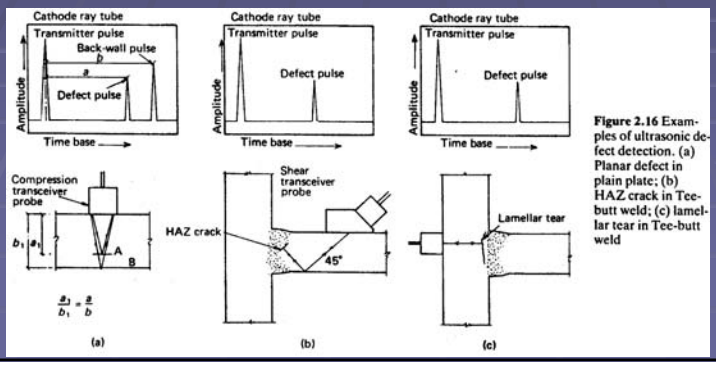


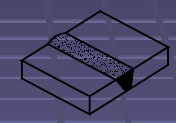
Figure 2.16 Examples of ultrasonic defect detection. (a) Planar defect in plain plate; (b) HAZ crack in Tee-butt weld; (c) lamellar tear in Tee-butt weld

29

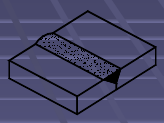
PGECIV FEN

9. Tipos Principais de Soldas

- Solda de entalhe (butt welds)

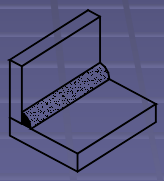


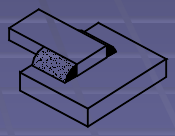
penetração total



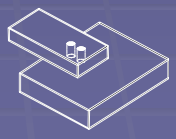
penetração parcial

- Solda de filete (fillet welds)





- Solda de bujão (tampão) (plugg welds)



30

PGECIV FEN

10. Resistência do Metal de Solda (f_w)

Metal da solda	f_w (X_u)(MPa)
E60XX F6X-EXXX E6XT-X	415
E70XX F7X-EXXX ER705-X E7XT-X	485

31

11. Nomenclatura de Soldagem

SÍMBOLOS DE SOLDA ELÉTRICA

SOLDAS DE ENTALHE									
Rebordo	Filete	Enchimento	Reta	V simples	Bisel simples	U simples	J simples	Filetes convexos	
								duplo	simples

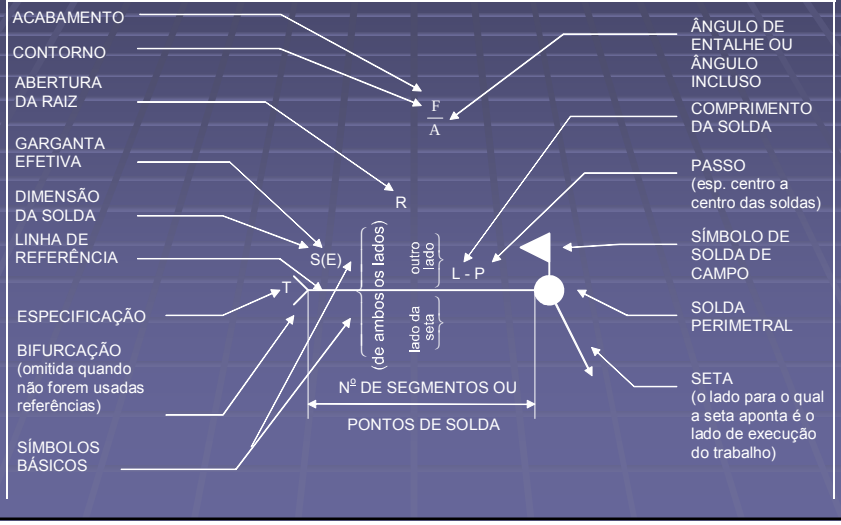
SÍMBOLOS COMPLEMENTARES

Solda perimetral	Solda de campo	Contorno	
		Esmerilhado	Convexo

32

11. Nomenclatura de Soldagem

LOCALIZAÇÃO DOS SÍMBOLOS



33

11. Nomenclatura de Soldagem

Notas:

A dimensão, o símbolo da solda, comprimento e passo da solda são sempre fornecidos nesta ordem sobre a linha de referência da esquerda para a direita.

A dimensão da perna nas soldas *deve estar sempre à esquerda do símbolo.*

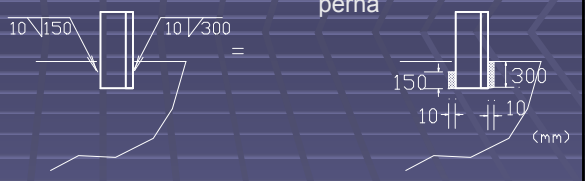
As soldas de ambos os lados e do mesmo tipo têm as mesmas dimensões, exceto onde anotado. Dimensão e espaçamento de soldas de filete devem ser mostrados junto aos símbolos (lado da seta e outro lado) da solda.

A bifurcação da seta é usada para especificações de montagem, processos de soldagem ou outras referências.

34

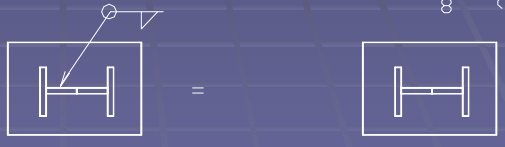
12. Exemplos

solda de filete com 10mm de garganta e 150 e 300mm de comprimento, respectivamente



solda de filete com 8mm de garganta e 150 e 300mm de comprimento, respectivamente

solda de filete perimetral (não foi indicada a espessura da garganta)

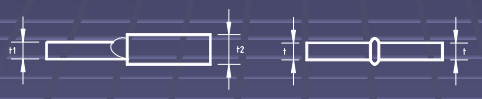


solda de entalhe com "gap root" de 3 mm e ângulo de inclinação de 45°

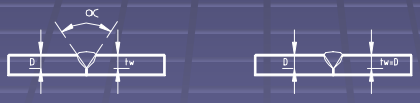
35

PGECIV FEN

12. Exemplos



(a) Entalhe com penetração total



(b) Entalhe com penetração parcial

$45^o \leq \alpha \leq 60^o$

$\alpha > 60^o$

$t_w = D - 3$ mm

$t_w = D$

tw = 0,707 D

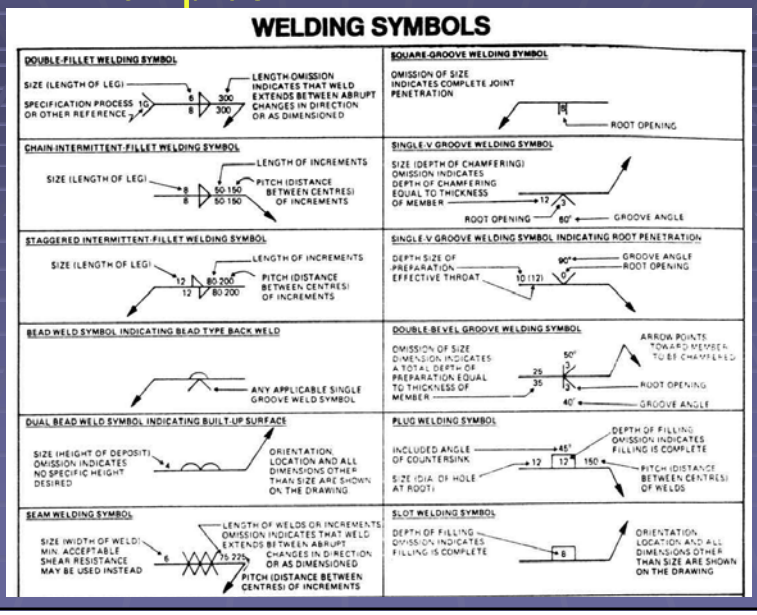
$$t_w = \frac{D_1 D_2}{\sqrt{D_1^2 + D_2^2}}$$

(c) Filete

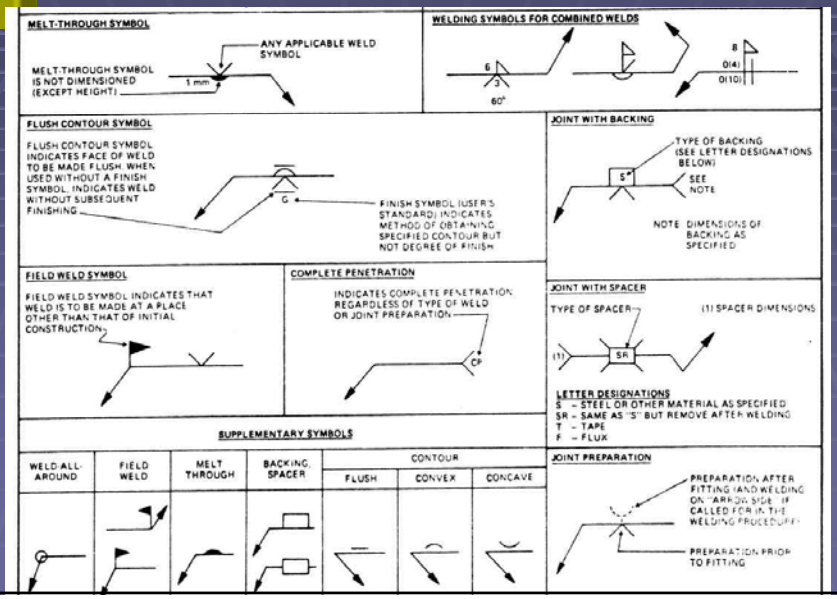
36

PGECIV FEN

12. Exemplos



12. Exemplos


MELT-THROUGH SYMBOL
ANY APPLICABLE WELD SYMBOL
MELT-THROUGH SYMBOL IS NOT DIMENSIONED (EXCEPT HEIGHT)
1 mm
WELDING SYMBOLS FOR COMBINED WELDS
6
3
60°
8
0(4)
0(10)
FLUSH CONTOUR SYMBOL
FLUSH CONTOUR SYMBOL INDICATES FACE OF WELD TO BE MADE FLUSH WHEN USED WITHOUT A FINISH SYMBOL. INDICATES WELD WITHOUT SUBSEQUENT FINISHING
G
FINISH SYMBOL (USE F.S. STANDARD) INDICATES METHOD OF OBTAINING SPECIFIED CONTOUR BUT NOT DEGREE OF FINISH
JOINT WITH BACKING
TYPE OF BACKING (SEE LETTER DESIGNATIONS BELOW)
S
SEE NOTE
NOTE: DIMENSIONS OF BACKING AS SPECIFIED
FIELD WELD SYMBOL
FIELD WELD SYMBOL INDICATES THAT WELD IS TO BE MADE AT A PLACE OTHER THAN THAT OF INITIAL CONSTRUCTION
COMPLETE PENETRATION
INDICATES COMPLETE PENETRATION REGARDLESS OF TYPE OF WELD OR JOINT PREPARATION
CP
JOINT WITH SPACER
TYPE OF SPACER
(1) SPACER DIMENSIONS
(1)
SR
LETTER DESIGNATIONS
S - STEEL OR OTHER MATERIAL AS SPECIFIED
SR - SAME AS "S" BUT REMOVE AFTER WELDING
T - TAPE
F - FLUX
SUPPLEMENTARY SYMBOLS
WELD-ALL-AROUND
FIELD WELD
MELT THROUGH
BACKING, SPACER
CONTOUR
FLUSH
CONVEX
CONCAVE
JOINT PREPARATION
PREPARATION AFTER FITTING (AND WELDING ON "ARROW SIDE" IF CALLED FOR IN THE WELDING PROCEDURE)
PREPARATION PRIOR TO FITTING