



**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO III
SOLDAGEM**



**FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA E
CUSTOS DE SOLDAGEM**

Professor: Moisés Luiz Lagares Júnior

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

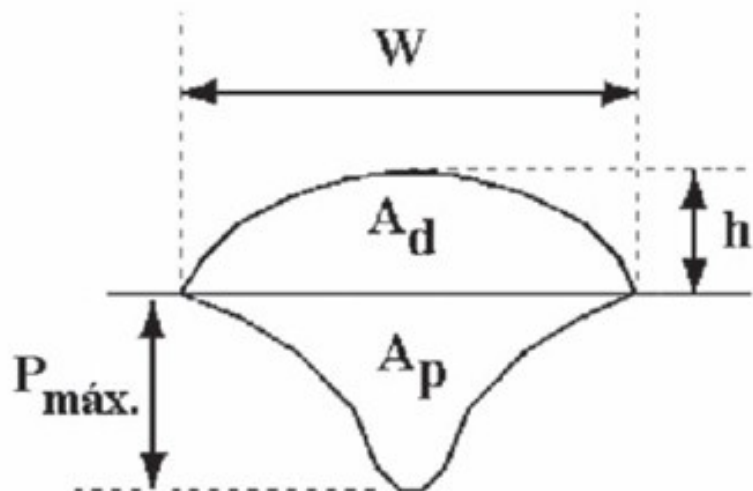


Figura 2. Representação esquemática das características geométricas do cordão. W – largura, h – reforço, P_{\max} – penetração máxima, A_d – área depositada e A_p – área de penetração.

Normalmente o cordão de solda é caracterizado pela penetração linear e área penetrada do metal fundido no metal de base e pela largura e reforço do cordão

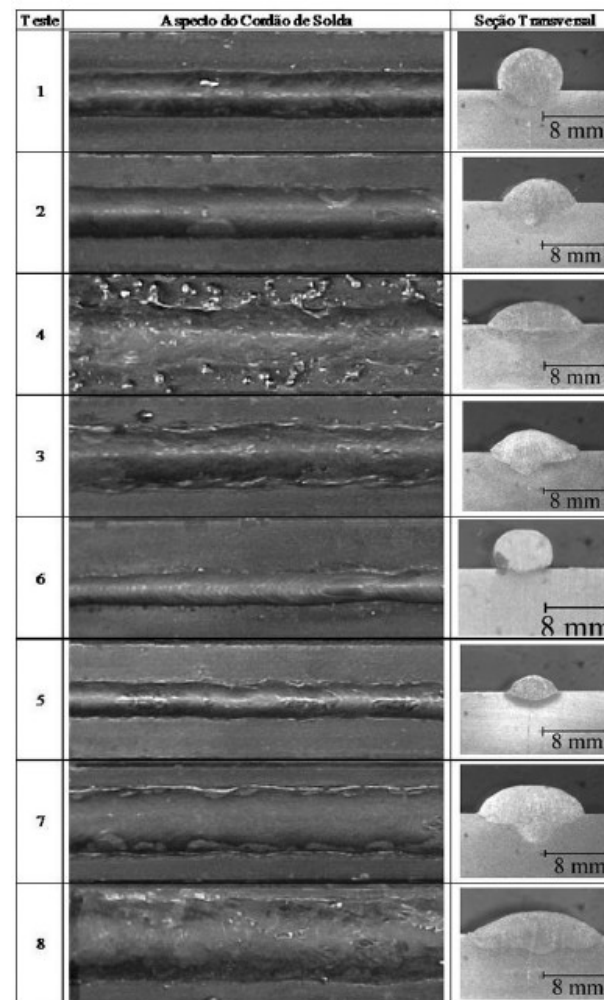


Figura 11. Aspecto e seção transversal dos cordões de solda

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

A FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA deve-se a dois efeitos:

- **Efeito térmico**: acoplamento do arco elétrico com o material da peça a soldar através da manchas catódicas (polaridade reversa)
- **Efeito mecânico**: Jato de Plasma e Transferência Metálica

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- **Acoplamento do arco:** O calor gerado é transferido por condução para o metal de base. Parte do calor funde o metal, parte difunde pelo metal de base
- **Entalpia dos gases de proteção:** O calor é transferido para o metal de base via convecção forçada. Entalpia → Energia absorvida pelo gás da temperatura ambiente até o estado plasmático. Quanto maior o potencial de ionização, maior a entalpia

Tabela 2.1 — Potencial de ionização de gases e vapores⁽¹⁾

Gás ou vapor	eV	Gás ou vapor	eV
Argônio	15,7	Sódio	5,1
Alumínio	6,0	Níquel	7,6
Cálcio	6,1	Oxigênio	13,6
Cobre	7,7	Silício	8,1
Fluor	17,3	Tungstênio	8,1
Hidrogênio	13,5	CO	14,1
Hélio	24,5	H ₂	15,6
Ferro	7,8	H ₂ O	12,6
Potássio	4,3	N ₂	15,5
Nitrogênio	14,5	O ₂	12,5

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Aporte de Calor

$$E = \sum u i / V_s$$

Energia de Soldagem

- Potência elétrica para manter um arco aberto dividido pela velocidade de soldagem

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Aporte de Calor

$$CI = \left(\sum \frac{u_i}{V_s} \right) \eta_{termico}$$

Calor Imposto

- Parcela de calor que efetivamente se transferiu para o metal de base, descontada a parcela que se perde para o meio ambiente (caracterizada pelo $\eta_{termico}$)
- Relacionado às propriedades metalúrgicas e aos defeitos da solda devido às microestruturas geradas
- Depende da geometria do arco e propriedades dos gases de proteção, sobretudo a capacidade de troca de calor: arcos longos aumentam a **Energia de Soldagem** mas reduzem o $\eta_{termico}$, podendo diminuir o **Calor Imposto**

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Aporte de Calor

$$CF = \left(\sum \frac{u_i}{V_S} \right) \eta_{\text{termico}} \eta_{\text{fusão}}$$

Calor Efetivo de Fusão

- Parcela do Calor Imposto responsável pela fusão do metal de base, deduzida a parcela de calor que se difunde para a peça (caracterizada pelo $\eta_{\text{fusão}}$)
- Relacionado à otimização operacional (formação do cordão de solda)
- Depende da concentração do arco e das propriedades do material de base (condutividade térmica, calor específico e ponto de fusão)
- Também é afetado pelo comprimento do arco: maior comprimento do arco, maior área de acoplamento com metal de base (menor densidade de corrente) e menor $\eta_{\text{fusão}}$

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

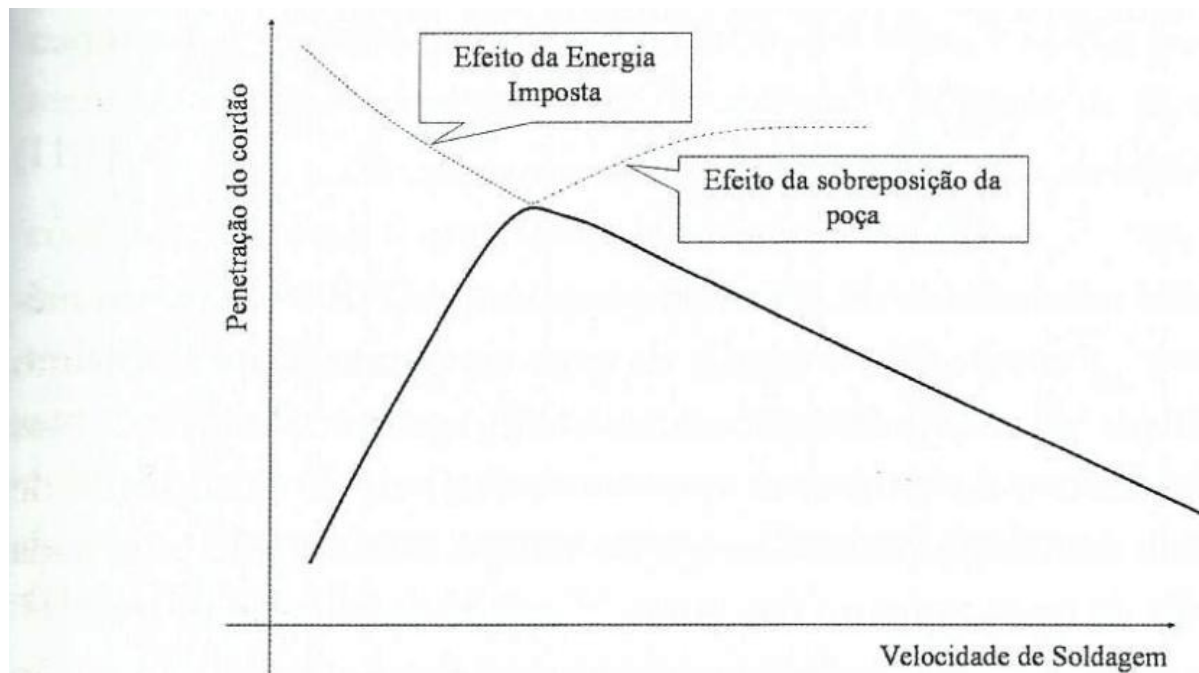
Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- É de se esperar que: \uparrow intensidade do arco (corrente) e \uparrow concentração de calor (arcos de menor diâmetro) \rightarrow \uparrow da penetração de metal fundido (gases de maior entalpia \rightarrow maior calor)
- Gotas em transferência “carregam” calor. A princípio, \uparrow produção \rightarrow \uparrow penetração
- Por outro lado, \uparrow poça de fusão (resultado de maior produção para uma mesma velocidade de soldagem) dificulta a transferência de calor para o metal de base e diminui o $\eta_{\text{fusão}}$ (sobreposição da poça de fusão)

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



$$CI = \left(\sum \frac{u_i}{V_s} \right) \eta_{\text{termico}}$$

Figura 1.57 – Balanceamento dos efeitos da energia imposta e da sobreposição da poça sobre a penetração para velocidade de soldagem crescente

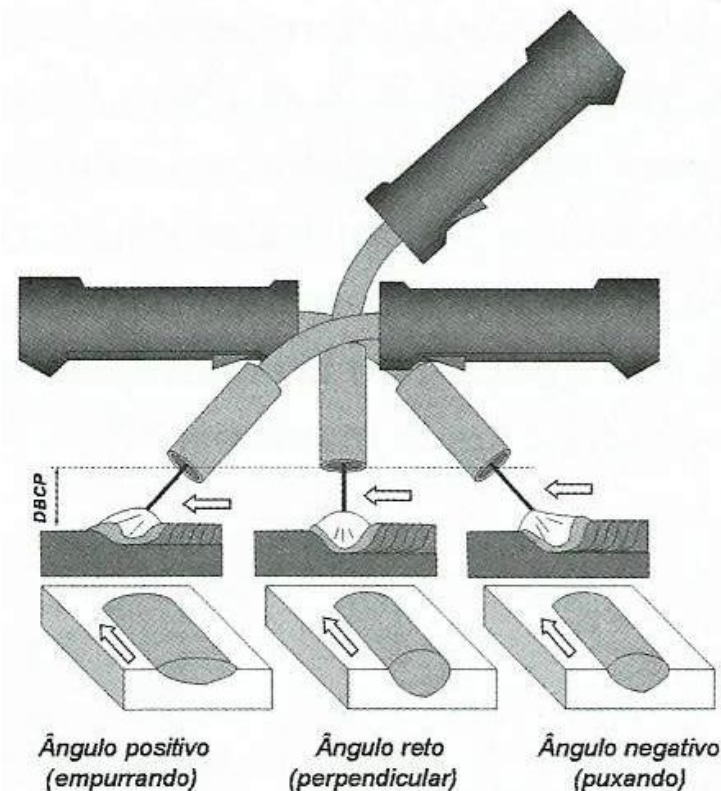
- Para baixas V_s o efeito da sobreposição da poça prevalece

FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- A **largura do cordão** deve garantir o preenchimento da junta sem excessos
- Depende da taxa de deposição por unidade de comprimento e molhabilidade do metal depositado
- A largura é maior para maiores correntes (maior aporte de calor), gases “mais quentes” e maiores comprimentos de arco (arco mais aberto aquecendo as laterais)
- Depende também do ângulo de ataque: **arco puxando** → ↑ penetração (jato de plasma empurra a poça para trás facilitando a ação do acoplamento arco-peça); **arco empurrando** → ↑ largura (pré-aquecimento à frente da poça, aumentando a molhabilidade)



FORMAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA

Efeito térmico

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

- A **Oscilação (tecimento)** da tocha é outra prática importante para o controle da geometria do cordão de solda
- A oscilação promove maior aquecimento das laterais da junta e cordões com maior largura e menor reforço
- Por outro lado reduz a penetração, podendo provocar falta de penetração em juntas em ângulo ou passes de raiz de juntas de topo com altura elevada do encosto (junta Y, por exemplo)
- Importante na deposição de filetes em juntas em ângulo onde a convexidade excessiva reduz a resistência a esforços dinâmicos

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$\text{PREÇO} = \text{CUSTO} + \text{LUCRO}$$

X

$$\text{LUCRO} = \text{PREÇO} - \text{CUSTO}$$

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC$$

CMO - Custo de Mão-de-obra

CC - Custo dos Consumíveis

CE - Custo de Energia Elétrica

CM - Custo de Manutenção

CD - Custo de Depreciação

CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CT pode ser expresso em:

- R\$/peça soldada
- R\$/kg de solda depositada
- R\$/m de junta soldada
- R\$/h de operação

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = \text{CMO} + CC + CE + CM + CD + CMC$$

CMO (R\$) = Custo unitário (R\$/h) x tempo de soldagem (h)

- Custo unitário: Salários, encargos sociais e custos fixos da empresa
- Solicitar ao RH folha de pagamento setorial e dividir por total de horas trabalhadas no mês

CMO - Custo de Mão-de-obra

CC - Custo dos Consumíveis

CE - Custo de Energia Elétrica

CM - Custo de Manutenção

CD - Custo de Depreciação

CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + \mathbf{CC} + CE + CM + CD + CMC$$

$$\mathbf{CC} = \mathbf{CMA} + \mathbf{CF} + \mathbf{CG}$$

- CMA – Custo do Metal de Adição
- CF – Custo do Fluxo
- CG – Custo do Gás de Proteção

CMO - Custo de Mão-de-obra

CC - **Custo dos Consumíveis**

CE - Custo de Energia Elétrica

CM - Custo de Manutenção

CD - Custo de Depreciação

CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC$$

$$CC = CMA + CF + CG$$

$$CMA (\text{R\$}) = 100CMD/ED(\%)$$

$$CMD (\text{R\$}) = MMD (\text{kg}) \times \text{Custo do Eletrodo (R\$/kg)}$$

$$MMD (\text{kg}) = A (\text{cm}^2) \times W (\text{cm}) \times \rho (\text{kg/cm}^3)$$

- CMD – Custo do Metal de Depositado
- MMD – Massa de Metal Depositado
- CMA – Custo do Metal de Adição
- CF – Custo do Fluxo
- CG – Custo do Gás de Proteção

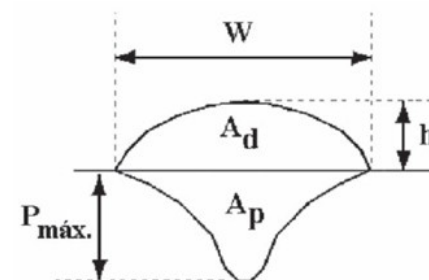


Figura 2. Representação esquemática das características geométricas do cordão. W – largura, h – reforço, $P_{\text{máx}}$ – penetração máxima, A_d – área depositada e A_p – área de penetração.

Densidades aproximadas de algumas ligas

Liga	Densidade (kg/cm ³)
Aço carbono	0,0078
Aço inoxidável	0,0080
Ligas de cobre	0,0086
Ligas de níquel	0,0086
Ligas de alumínio	0,0028
Ligas de titânio	0,0047

CMO - Custo de Mão-de-obra

CC - **Custo dos Consumíveis**

CE - Custo de Energia Elétrica

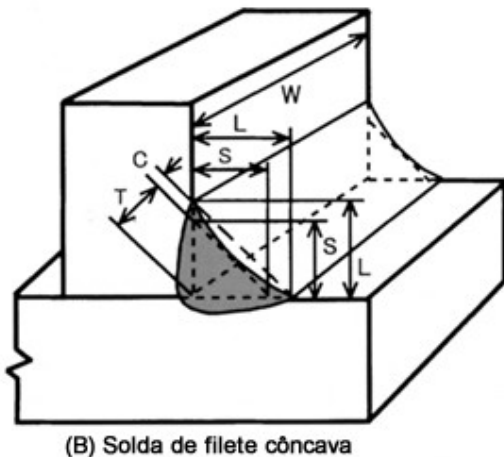
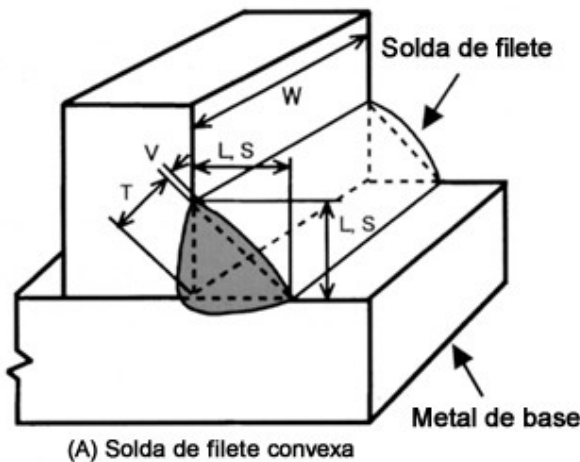
CM - Custo de Manutenção

CD - Custo de Depreciação

CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM



$$CMA \text{ (R\$)} = 100CMD/ED(\%)$$

$$CMD \text{ (R\$)} = MMD \text{ (kg)} \times \text{Custo do Eletrodo (R\$/kg)}$$

$$MMD \text{ (kg)} = A \text{ (cm}^2\text{)} \times W \text{ (cm)} \times \rho \text{ (kg/cm}^3\text{)}$$

- CMD – Custo do Metal de Depositado
- MMD – Massa de Metal Depositado
- CMA – Custo do Metal de Adição
- CF – Custo do Fluxo
- CG – Custo do Gás de Proteção

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC$$

$$CC = CMA + CF + CG$$

$$CMA (R\$) = 100CMD/ED(\%)$$

$$CMD (R\$) = MMD (kg) \times \text{Custo do Eletrodo (R\$/kg)}$$

$$MMD (kg) = A (cm^2) \times W (cm) \times \rho (kg/cm^3)$$

Valores típicos de eficiência de deposição para diferentes processos

Processo	φ (%)
SMAW	
Comprimento: 350mm	55-65
450mm	60-70
SAW	95-99
GMAW	85-97
FCAW	80-90

- CMD – Custo do Metal de Depositado
- MMD – Massa de Metal Depositado
- CMA – Custo do Metal de Adição
- CF – Custo do Fluxo
- CG – Custo do Gás de Proteção

- CMO - Custo de Mão-de-obra
- CC - **Custo dos Consumíveis**
- CE - Custo de Energia Elétrica
- CM - Custo de Manutenção
- CD - Custo de Depreciação
- CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC$$

$$CC = CMA + CF + CG$$

$$CF \text{ (R\$)} = \text{MMD (kg)} \times \text{RMF} \times \text{Custo do fluxo (R\$/kg)}$$

- **RMF – Razão Massa Fluxo (massa de fluxo consumido/massa de metal depositado)**
- **Obtido junto a fornecedores**
- **Varia entre 0,9 a 1,2**

- **MMD – Massa de Metal Depositado**
- **CMA – Custo do Metal de Adição**
- **CF – Custo do Fluxo**
- **CG – Custo do Gás de Proteção**

CMO - Custo de Mão-de-obra
CC - **Custo dos Consumíveis**
CE - Custo de Energia Elétrica
CM - Custo de Manutenção
CD - Custo de Depreciação
CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + CMC$$

$$CC = CMA + CF + CG$$

$$CG \text{ (R\$)} = [\text{Vazão de Gás (l/min)} \times \text{tempo de arco aberto (s)} \times \text{Custo do gás (R\$/m}^3\text{)}] / 60000$$

- CMA – Custo do Metal de Adição
- CF – Custo do Fluxo
- CG – Custo do Gás de Proteção

CMO - Custo de Mão-de-obra

CC - **Custo dos Consumíveis**

CE - Custo de Energia Elétrica

CM - Custo de Manutenção

CD - Custo de Depreciação

CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + \mathbf{CE} + CM + CD + CMC$$

$$\mathbf{CE (R\$)} = 10\mathbf{PE (R\$/kWh)} \times \mathbf{PES (kW)} \times \mathbf{t(h)} / \mathbf{E(\%)}$$

- PE – Preço da Energia Elétrica
- PES – Potência Elétrica de Saída (U.I)
- t – Tempo de Arco Aberto
- E – Eficiência Elétrica do Equipamento (fornecida pelo fabricante)

CMO - Custo de Mão-de-obra

CC - Custo dos Consumíveis

CE - Custo de Energia Elétrica

CM - Custo de Manutenção

CD - Custo de Depreciação

CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + \mathbf{CM} + CD + CMC$$

$$\mathbf{CM (R\$)} = \mathbf{CMM (R\$/h)} \times \mathbf{tempo de operação (h)}$$

- CMM – Custo Médio de Manutenção

CMO - Custo de Mão-de-obra
CC - Custo dos Consumíveis
CE - Custo de Energia Elétrica
CM - Custo de Manutenção
CD - Custo de Depreciação
CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + CM + \mathbf{CD} + CMC$$

$$\mathbf{CD} = \frac{\text{Valor do Investimento Inicial (R\$)} - \text{Valor Residual (R\$)}}{\text{Vida Útil do Equipamento}}$$

- Valor Residual – Valor de venda do equipamento ao término da vida útil

Tabela IV - Taxas máximas de depreciação estabelecidas pela SRF

Tipos de ativos	Taxa anual (%)	Vida útil (anos)
Prédios/Construções	4	25
Móveis e utensílios	10	10
Máquinas e equipamentos	10	10
Veículos e ferramentas	20	5

CMO - Custo de Mão-de-obra
 CC - Custo dos Consumíveis
 CE - Custo de Energia Elétrica
 CM - Custo de Manutenção
CD - Custo de Depreciação
 CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

CUSTOS DE SOLDAGEM

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

$$CT = CMO + CC + CE + CM + CD + \mathbf{CMC}$$

- Valores médios referentes a bicos de contato, antirrespingo, eletrodos não consumíveis, material de segurança etc

CMO - Custo de Mão-de-obra
CC - Custo dos Consumíveis
CE - Custo de Energia Elétrica
CM - Custo de Manutenção
CD - Custo de Depreciação
CMC - Custo de Outros Materiais de Consumo

9. Exemplo

Suponha-se que a junta de ângulo da Figura 2, com um filete de 6,4 mm, será soldada por dois processos diferentes; eletrodo revestido e arco submerso. Em seguida será calculado o custo aproximado da solda feita pelos dois processos, considerando apenas os custos de mão de obra, custo do metal depositado e custo de energia elétrica. Alguns dados a serem considerados nos cálculos são fornecidos nas Tabelas V e VI. Será tomado como comprimento total da solda 100 cm e a razão de consumo de fluxo igual a 1.

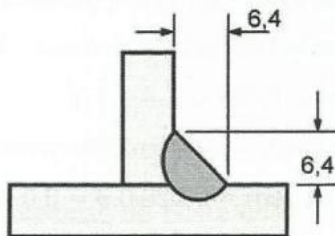


Figura 2
Junta considerada no cálculo de custo da soldagem deste exemplo

Processos de Fabricação III - SOLDAGEM

Tabela V – Características dos processos arco submerso e eletrodo revestido

Característica	Processo →	Eletrodo revestido	Arco submerso
Tamanho da solda (mm)		6,4	6,4
Área da solda (cm ²)		0,32	0,32
Velocidade de soldagem (cm/min)		25	60
Corrente (A)		300 AC	500 DC
Tensão (V)		25	30
Eletrodo (classe/diâmetro) (mm)		E7024 / 5,0	EL12 / 3,2
Número de passes		1	1
Eficiência de deposição		0,60	0,95
Eficiência do equipamento		0,75	0,80