

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Soldagem I

Estimativa de Custos em Soldagem

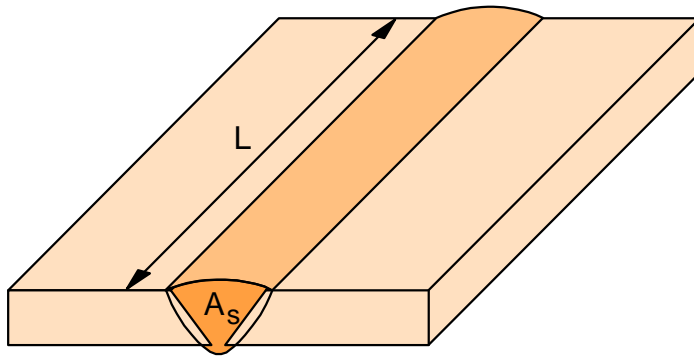
Prof. Paulo J. Modenesi

Janeiro de 2001

1. Considerações Iniciais:

- A soldagem é, em geral, usada como parte de um processo de fabricação que também utiliza outras operações como corte, usinagem, conformação mecânica, montagem, tratamentos térmicos e superficiais. Além disso, a operação de soldagem pode englobar etapas de pré-aquecimento, de remoção da raiz da solda e outras. No presente documento estas etapas e os outros processos não serão considerados. Deve-se deixar claro, contudo, que numa situação real, o custo de uma operação de soldagem não será, em geral, analisado de uma forma isolada. Assim, por exemplo, a adoção de um procedimento de soldagem mais sofisticado (e mais caro) pode levar a uma redução de custo pela eliminação de uma etapa no processo de fabricação (por exemplo, pode tornar desnecessário o uso de pré-aquecimento ou de um tratamento térmico posterior).
- A operação de soldagem envolve um grande número de aspectos que podem ter algum impacto em seu custo final como o uso de consumíveis (metal de adição, gás, fluxo e outros), o custo de pessoal e outros custos fixos, o gasto de energia elétrica, os custos de manutenção e a depreciação dos equipamentos e o custo dos equipamentos e materiais de proteção, de peças, ferramentas e outros materiais. No presente documento, serão considerados somente os três primeiros itens citados. Uma discussão mais detalhada destes itens e dos outros poderá ser encontrada na literatura listada no final deste documento.
- O custo de uma operação de soldagem será, em geral, calculado para: (a) preparar o orçamento de um serviço, (b) comparar procedimentos de soldagem entre si e com métodos alternativos de fabricação e (c) determinar a quantidade de consumíveis necessária para a execução de um serviço.
- Vários dos coeficientes e parâmetros aqui indicados podem ser encontrados tabelados em diferentes trabalhos. Entretanto, alguns deles tendem a ser muito específicos para uma dada empresa ou, mesmo, um serviço devendo, portanto, ser preferencialmente determinados.
- A determinação do custos associados com os consumíveis de soldagem e a mão de obra é baseada no cálculo da massa de metal depositado em um cordão de solda e do tempo de soldagem. Este cálculo será apresentado nos itens seguintes para o caso mais simples de um único tipo de junta soldada e de uma única estação de trabalho.
- Na maioria das equações apresentadas neste documento, não foram incluídos fatores para ajustar o uso de diferentes unidades (por exemplo, segundos e horas). Cabe ao usuário verificar cuidadosamente as unidades usadas para evitar problemas com os resultados obtidos.

2. Cálculo da massa de metal depositado (m_s):



$$m_s = A_s L \rho$$

ρ é a densidade da solda (tabela I).

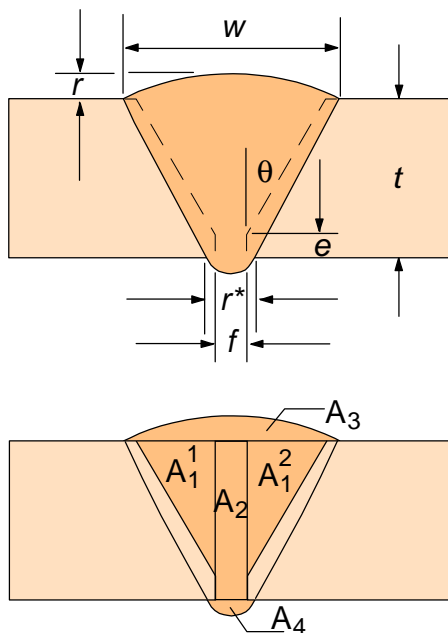
A_s é a área transversal do cordão associada com o metal depositado.

L é o comprimento do cordão.

Tabela I – Densidades aproximadas de algumas ligas:

Liga	Densidade (g/cm ³)
Aço carbono	7,8
Aço inoxidável	8,0
Ligas de Cobre	8,6
Ligas de Níquel	8,6
Ligas de Alumínio	2,8
Ligas de Titânio	4,7

Exemplo do cálculo de A_s :



$$A_s = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad \text{e} \quad A_1 = A_1' + A_1''$$

$$A_1' = A_1'' = \frac{(t-e)^2}{2} \tan \theta$$

$$A_2 = t f$$

$$A_3 = \pi w r / 4 \quad \text{ou, alternativamente:}$$

$$A_3 = \left(\frac{\pi}{2} + 1 \right) \left[2(t-e) \tan \theta + f \right] \frac{r}{4}$$

$$A_4 = \frac{\pi}{2} f^2 \quad \text{ou, alternativamente,} \quad A_4 = \frac{\pi}{2} r^{*2}$$

3. Cálculo do tempo de soldagem (t_{ARC} – “tempo de arco aberto”):

A. Com base na velocidade de soldagem (v):

$$t_{ARC} = L / v$$

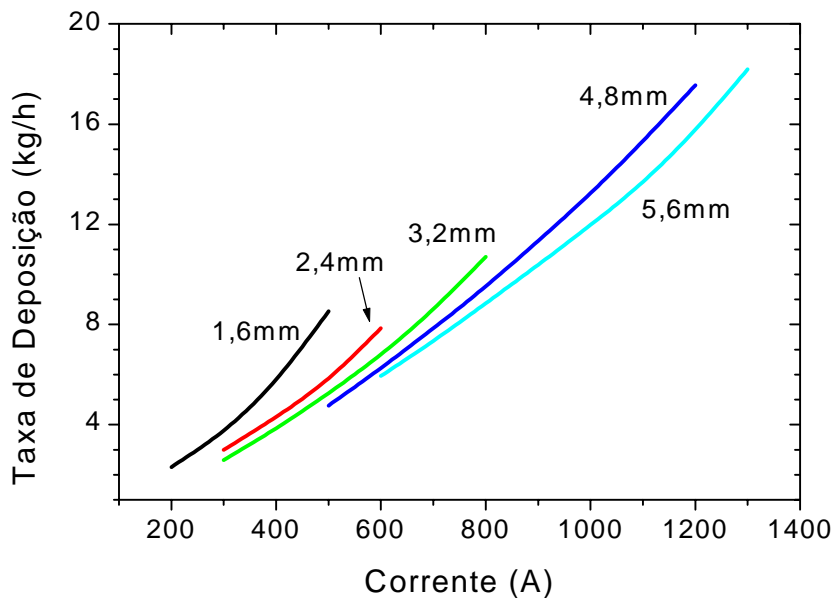
Para uma soldagem com vários passes, a velocidade v usada na equação anterior está definida como:

$$1/v = \sum_i (1/v_i), \text{ onde } v_i \text{ é a velocidade de soldagem por passe.}$$

B. Com base na taxa de deposição do processo (z_m):

$$t_{ARC} = \frac{m_s}{z_m}$$

A taxa de deposição, isto é, a quantidade de material depositado por unidade de tempo, depende de vários fatores, incluindo o processo de soldagem, o tipo e o diâmetro e o comprimento do eletrodo e o tipo, a polaridade e o nível da corrente (ver exemplo na figura abaixo). Se possível, z_m deve ser determinada em condições similares à da aplicação.



Taxa de deposição na soldagem SAW de aço carbono, com CC+ e comprimento do eletrodo de cerca de 25mm em função da corrente e do diâmetro do eletrodo.

Observação: O número necessário de passes para o preenchimento de uma junta pode ser estimado, para uma velocidade média v_{im} por passe, como:

$$n_p = \frac{m_s v_{im}}{z_m L}$$

O tempo total da operação de soldagem (t_T), incluindo o tempo de arco aberto e o tempo necessário para outras operações (remoção de escória e respingos, troca de eletrodos, posicionamento de cabeçote, etc.) é dado por:

$$t_T = \frac{t_{ARC}}{\phi}, \text{ onde } \phi \text{ é o fator de ocupação ou de marcha.}$$

O fator de ocupação é a razão entre t_{ARC} e t_T . Valores de referência ϕ são apresentados na tabela II. Contudo, como já foi colocado, valores a serem usados em cálculos para uma dada aplicação devem ser, sempre que possível, medidos em condições similares à desta aplicação.

Tabela II – Valores do fator de ocupação para diferentes modos de operação.

Modo de operação	ϕ (%)
Manual	05-30
Semi-automático	10-60
Mecanizado	40-90
Automático	50-100

4. Cálculo de custos em soldagem:

a. Eletrodos (C_e):

$$C_e = \frac{m_s}{\phi} C_{eU},$$

onde ϕ é a eficiência prática de deposição (tabela III) do processo e C_{eU} é o preço por peso do eletrodo (por exemplo, R\$/kg).

Tabela III – Valores típicos de ϕ para diferentes processos.

Processo	ϕ (%)
Eletrodos Revestidos:	
Comprimento: 350mm	55-65
450mm	60-70
Arames:	
SAW	95-100
ESW	95-100
GMAW	90-95
Arames tubulares: FCAW	80-85

b. Fluxo (Cf):

$$Cf = \frac{m_s}{\phi} K_f C_{fU} ,$$

onde K_f é a razão entre o consumo de fluxo e o de eletrodo e C_{fU} é o preço por peso do fluxo. Se o fluxo não fundido durante a soldagem for corretamente reaproveitado, K_f tem um valor próximo de 1,0. Contudo, este parâmetro varia bastante com as condições específicas de operação. Este tende, por exemplo, a aumentar com a tensão e a diminuir com a corrente de soldagem.

c. Gás de Proteção (Cg):

$$Cg = V_G t_{ARC} C_{GU} ,$$

onde V_G é a vazão de gás usada e C_{GU} é o preço por volume de gás (por exemplo, em R\$/m³). Esta equação supõe que exista um dispositivo elétrico ou mecânico para a abertura e fechamento do fluxo de gás sincronizado com o tempo de operação do arco e que não hajam vazamentos no sistema de alimentação de gás. Sem essas condições, o consumo de gás pode aumentar bastante.

d. Mão de obra e custos fixos (Cl):

$$Cl = \frac{t_{ARC}}{\phi} (L + O) ,$$

onde L e O são, respectivamente, os custos por unidade de tempo com mão de obra e gastos fixos.

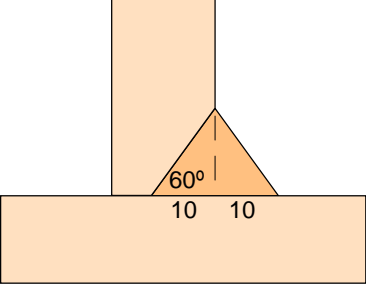
e. Energia elétrica (Cel):

$$Cel = \frac{P t_{ARC}}{\phi_{el}} (C_{elU}) ,$$

onde C_{elU} (R\$/kWh) é o preço da energia elétrica, P (kW) é a potência elétrica média desprendida durante a soldagem e ϕ_{el} é a eficiência elétrica do equipamento de soldagem. Por exemplo, a eficiência de um transformador gira em torno de 80%.

6. Exemplo:

Desenvolva as equações para o cálculo do custo de um metro de solda para a junta (dimensões em mm) e as condições mostradas abaixo:

<p>Desenho da Junta</p> 	<table> <tr> <td>Material:</td><td>Aço Carbono</td></tr> <tr> <td>Processo de Soldagem:</td><td>GMAW</td></tr> <tr> <td>Corrente:</td><td>220A</td></tr> <tr> <td>Tensão:</td><td>25V</td></tr> <tr> <td>Vazão de gás de proteção::</td><td>15l/min</td></tr> <tr> <td>Taxa de deposição:</td><td>3,0kg/h</td></tr> <tr> <td>Eficiência de deposição:</td><td>90%</td></tr> <tr> <td>Fator de ocupação:</td><td>40%</td></tr> <tr> <td>Eficiência elétrica da fonte:</td><td>70%</td></tr> </table>	Material:	Aço Carbono	Processo de Soldagem:	GMAW	Corrente:	220A	Tensão:	25V	Vazão de gás de proteção::	15l/min	Taxa de deposição:	3,0kg/h	Eficiência de deposição:	90%	Fator de ocupação:	40%	Eficiência elétrica da fonte:	70%
Material:	Aço Carbono																		
Processo de Soldagem:	GMAW																		
Corrente:	220A																		
Tensão:	25V																		
Vazão de gás de proteção::	15l/min																		
Taxa de deposição:	3,0kg/h																		
Eficiência de deposição:	90%																		
Fator de ocupação:	40%																		
Eficiência elétrica da fonte:	70%																		

a. Cálculo de A_s e de m_s :

$$A_s = 2 \times 10 \times [10 \tan(60^\circ)] / 2 = 173 \text{ mm}^2 = 1,73 \text{ cm}^2$$

$$L = 1 \text{ m} = 100 \text{ cm} \rightarrow m_s = 1,73 \text{ cm}^2 \times 100 \text{ cm} \times 7,8 \text{ g/cm}^3 = 1350 \text{ g} = 1,35 \text{ kg}$$

b. Cálculo de t_{ARC} :

$$t_{ARC} = m_s / z_w = 1,35 \text{ kg} / 3,0 \text{ kg/h} = 0,45 \text{ h} = 27 \text{ min.}$$

c. Custos para um metro de solda:

$$C_e = (1,35 \text{ kg/h} / 0,9) \times C_{eU} = 1,45 \text{ kg} \times C_{eU} \quad (\text{Eletrodos})$$

$$C_g = (15 \text{ l/min} \times 27 \text{ min}) \times C_{GU} = (405 \text{ l}) \times C_{GU} \quad (\text{Gás de proteção})$$

$$C_l = (0,45 \text{ h} / 0,4) \times (L + O) = 1,13 \text{ h} \times (L + O) \quad (\text{Mão de obra})$$

$$P = 220 \text{ A} \times 25 \text{ V} = 5500 \text{ W} = 5,5 \text{ kW} \quad (\text{potência})$$

$$C_{el} = (5,5 \text{ kW} \times 0,45 \text{ h} / 0,7) \times C_{elU} = 3,54 \text{ kWh} \times C_{elU} \quad (\text{Eletricidade})$$

5. Leitura Complementar:

1. Modenesi, P.J. **Características Econômicas dos Eletrodos Revestidos** (Guia de Aula Prática), UFMG, 2000.
2. Wainer, E. et alli **Soldagem - Processos e Metalurgia**, Editora Edgard Blücher, 1992, p.449-461
3. AWS, **Welding Handbook**, Vol. 1, 8ª edição, American Welding Society, 1987, p. 265-286.
4. Cary, H.B. **Modern Welding Technology**, Prentice Hall, 1979, p. 541-559.
5. The Lincoln Electric Company, **The Procedure Handbook of Arc Welding**, 12ª edição, The Lincoln Electric Company, 1973, seção 12.