

09

SOLDAGEM

Engenharia Mecânica

Prof. Luis Fernando Maffeis Martins

Soldagem por resistência

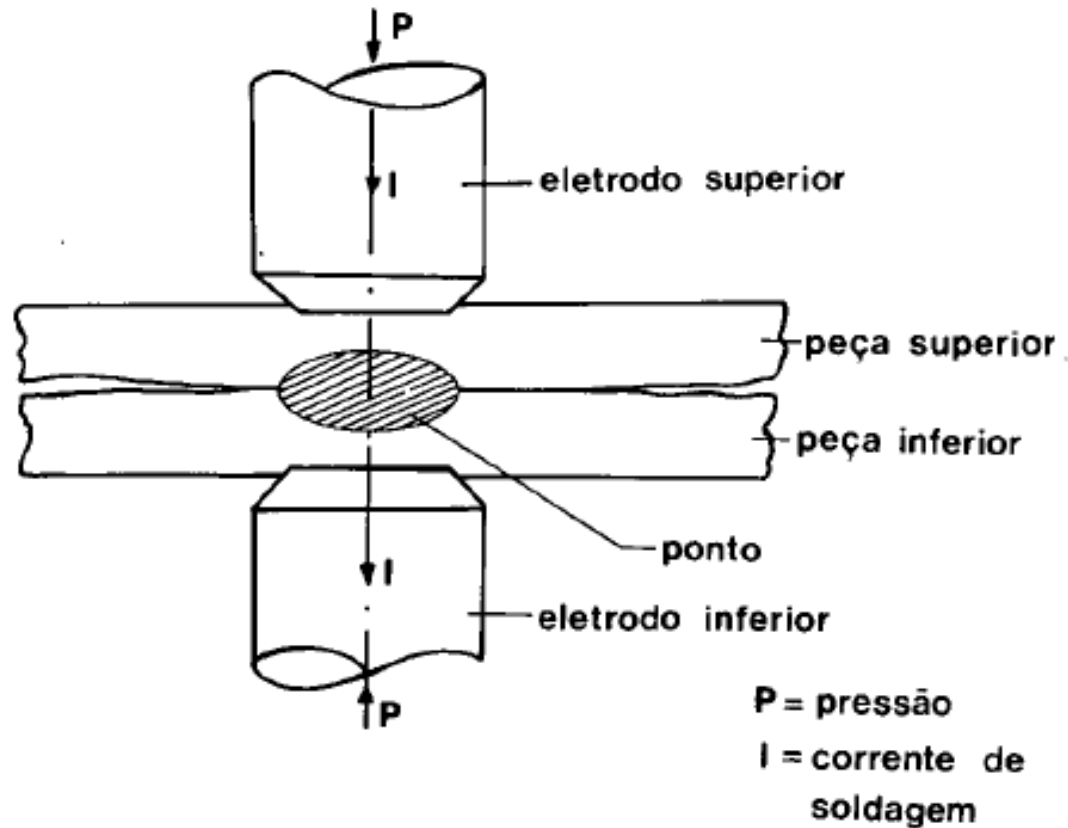


Soldagem por resistência

Soldagem através da geração de calor devida à passagem de corrente elétrica e da aplicação de pressão entre duas peças, ocorrendo fusão localizada no ponto de contato entre as peças.

A geração de calor é devida à resistência elétrica à passagem de corrente (contato/peça + peça/peça).

Soldagem por resistência



Soldagem por resistência

Lei de Joule: energia térmica gerada pela passagem de corrente elétrica

$$Q = \frac{1}{J} \int_0^t I^2 R_T dt$$

onde: $J = 4,185 \text{ J}$

I = corrente de soldagem (A)

R_T = conjunto de resistência elétrica (Ω)

dt = intervalo de tempo de passagem da corrente (s)

Soldagem por resistência

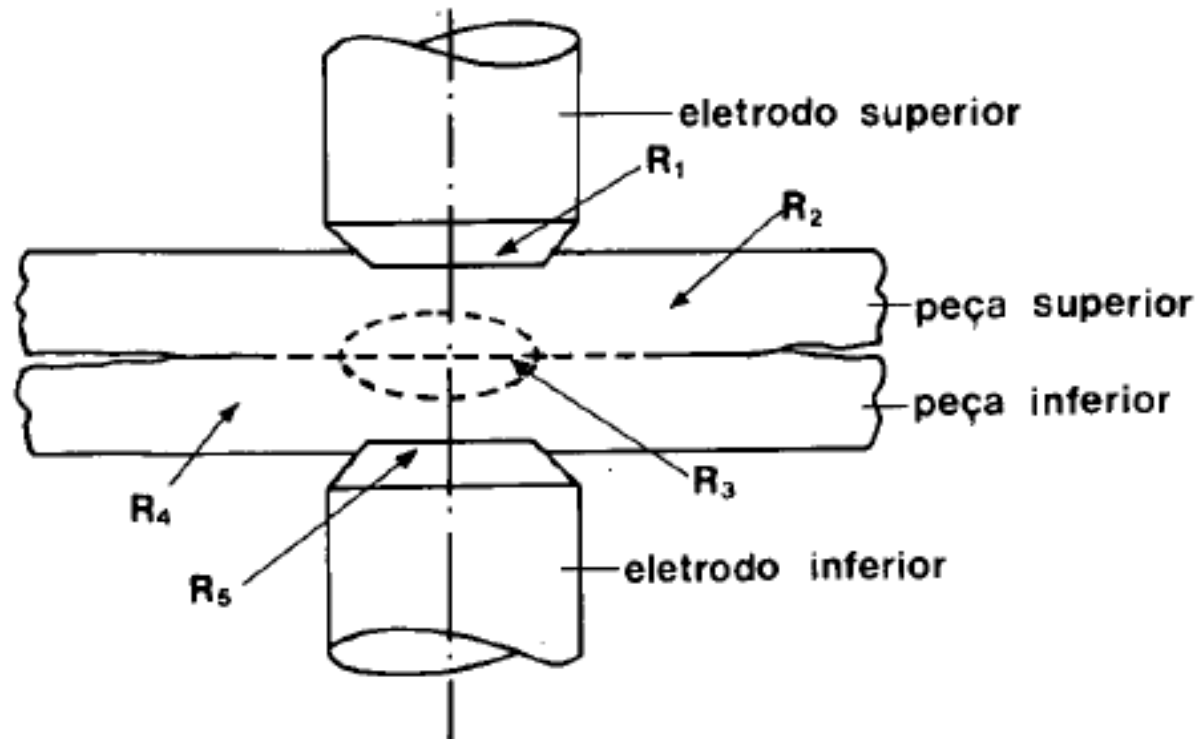
Resistência elétrica:

Quando as peças estão unidas mecanicamente através da aplicação de uma pressão exercida pelos eletrodos, temos uma resistência total composta de 5 componentes:

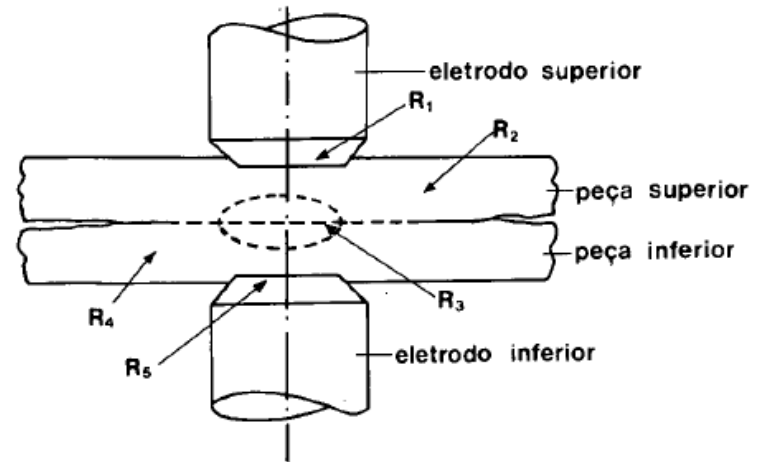
$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

Soldagem por resistência

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$



Soldagem por resistência



R_T = Resistência total

R_1 = Resistência entre eletrodo superior e peça superior

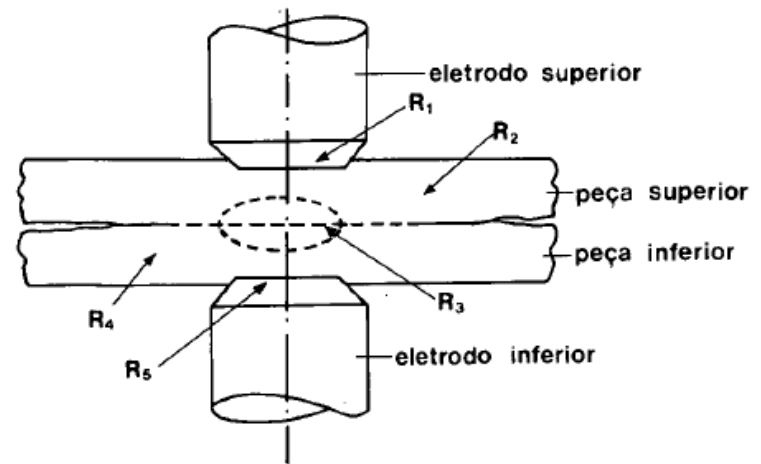
R_2 = Resistência da peça superior

R_3 = Resistência entre as peças

R_4 = Resistência da peça inferior

R_5 = Resistência entre eletrodo inferior e peça inferior

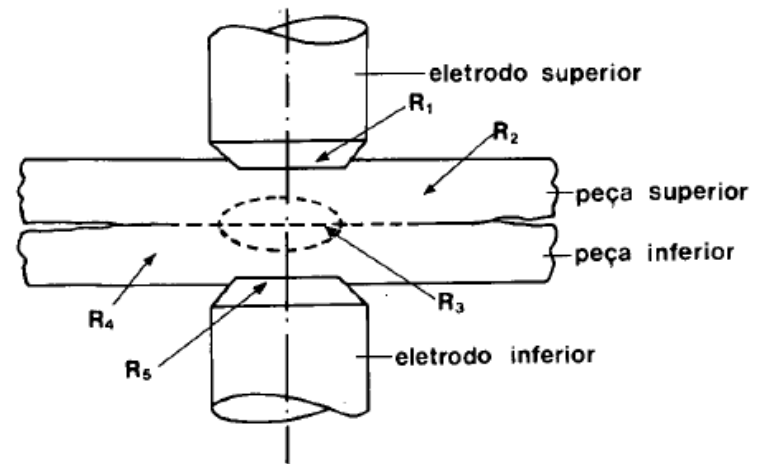
Soldagem por resistência



R_3 = Resistência entre as peças

é a resistência principal do sistema, pois é neste ponto que queremos que ocorra o aquecimento do material, para fusão e solda do material.

Soldagem por resistência

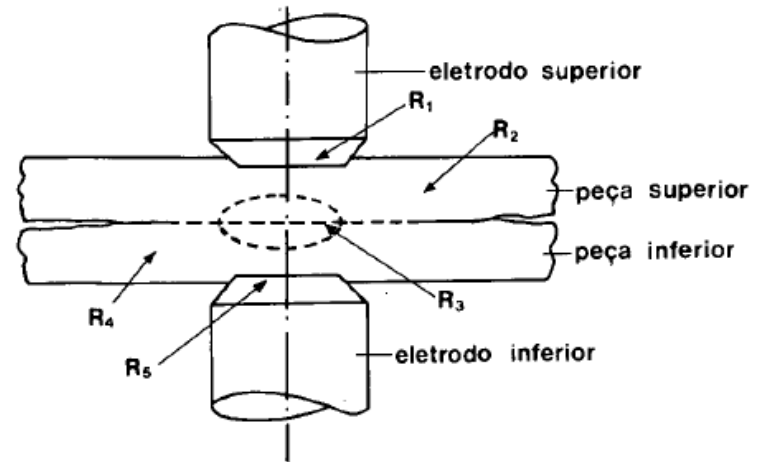


R_1 e R_5 = Resistências entre eletrodos e peças

Devem ser mantidas o mais baixo possível para evitar o aquecimento no contato entre os eletrodos e as peças, aumentando a vida útil do eletrodo.

Oxidação na superfície das peças eleva a resistência (óxidos são não-condutores)

Soldagem por resistência



R_2 e R_4 = Resistências das peças

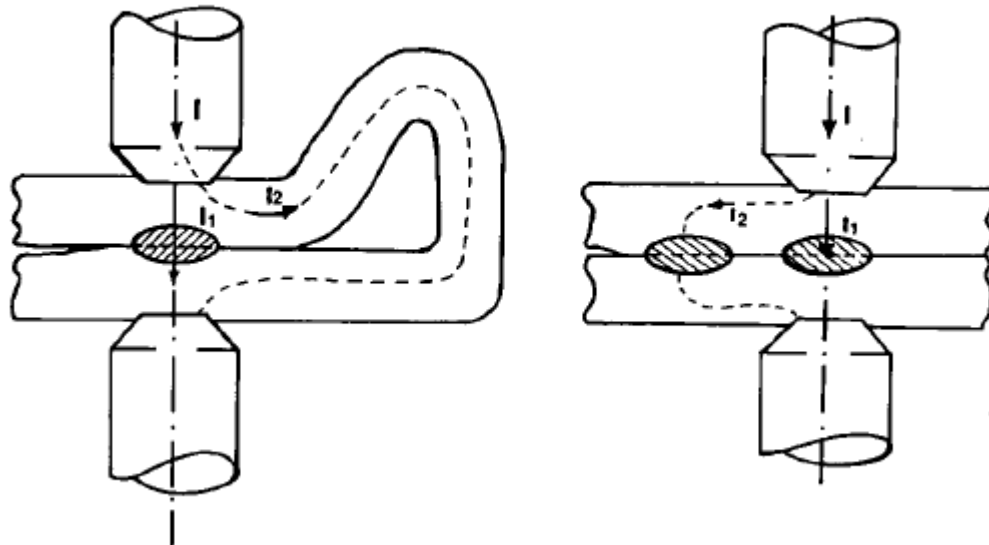
São importantes no estágio final da soldagem

Soldagem por resistência

Circuitos derivados:

Caso a resistência entre as peças seja muito elevada, podem ocorrer a formação de circuitos derivados, que devem ser evitados.

(a) solda por pontos



Soldagem por resistência

Circuitos derivados:

Os circuitos derivados são “atalhos” onde a corrente encontra menor resistência à sua passagem.

Para evitar sua formação, é definido uma distância mínima entre dois pontos de solda. Caso não seja possível, é necessário aumentar a corrente para compensar as perdas.

Soldagem por resistência

Diâmetro do eletrodo:

É recomendado que o diâmetro do eletrodo (face de contato do eletrodo com a peça) seja 1,6 mm a mais do que o diâmetro do ponto de solda.

Diâmetro do ponto de solda:

Está relacionado com a espessura da chapa a ser soldada:

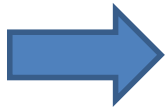
$$d = 5 \sqrt{S}$$

onde, S = espessura da chapa
d = diâmetro do ponto de solda

Soldagem por resistência

Desgaste do eletrodo:

O desgaste do eletrodo gera um aumento da área de contato, reduzindo a densidade de corrente.



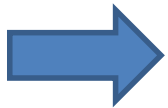
queda no rendimento do processo

Costuma-se “recuperar” o eletrodo através de desgaste da ponta (lima), para a redução da área de contato, mas uma recuperação exagerada pode reduzir em demasia a área de contato, gerando aumento da densidade de corrente.

Soldagem por resistência

Desgaste do eletrodo:

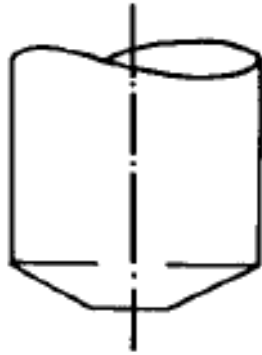
Costuma-se “recuperar” o eletrodo através de desgaste da ponta (lima), para a redução da área de contato, mas uma recuperação exagerada pode reduzir em demasia a área de contato, gerando aumento da densidade de corrente.



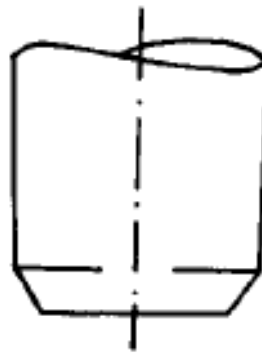
aquecimento exagerado com redução da vida útil

Soldagem por resistência

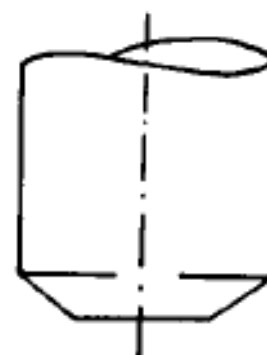
Desgaste do eletrodo:



(a) eletrodo limado
em excesso
(área de contato
menor)



(b) eletrodo
gasto
(área de contato
maior)

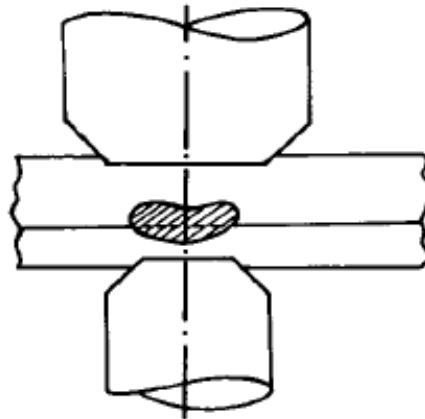


(c) eletrodo
normal

Soldagem por resistência

Soldagem de peças com espessura diferente:

No caso de peças com espessuras diferentes há geração de calor desigual entre as peças. Para corrigir este efeito, utiliza-se eletrodos com diâmetros diferentes, sendo eletrodo menor para a peças com menor espessura.

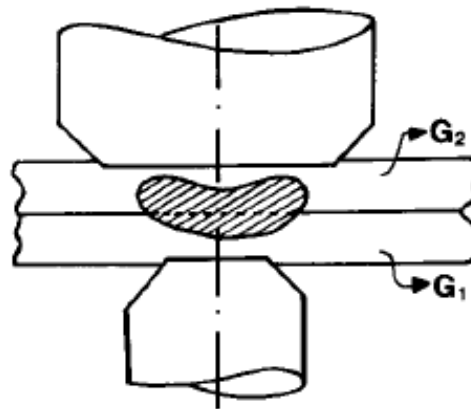


(a) mesmo material ,
espessuras diferentes

Soldagem por resistência

Soldagem de peças com condutividade diferente:

No caso de peças com espessuras iguais, porém com condutividades diferentes deve-se utilizar eletrodo com diâmetro menor em contato com a peça com maior condutividade



(b) mesma espessura,
condutibilidades diferentes
($G_1 > G_2$)

Soldagem por resistência

Para calcular as áreas de contato, utiliza-se a relação:

$$\frac{G_1 A_1}{e_1} = \frac{G_2 A_2}{e_2} = \dots = \frac{G_n A_n}{e_n}$$

onde: G_1, G_2, \dots = condutibilidade elétrica das peças

A_1, A_2, \dots = área de contato dos eletrodos.

e_1, e_2, \dots = espessura das peças

Tipos de soldagem por resistência

Soldagem a ponto

Soldagem topo a topo por resistência pura

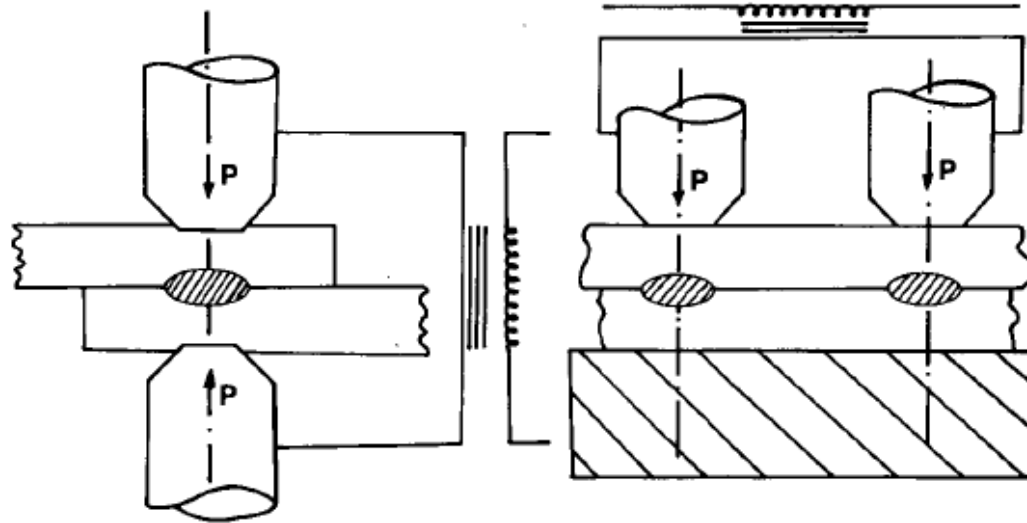
Soldagem topo a topo por centelhamento

Soldagem por ressalto

Soldagem por costura

Soldagem por ponto

Soldagem produzida pelo calor gerado na passagem de corrente pelas peças, através de eletrodos que mantêm as peças unidas por pressão. Pode ser por ponto simples ou múltiplo.



(a) soldagem por ponto

(b) soldagem por pontos múltiplos

Soldagem de topo por resistência

Soldagem onde a junção é realizada em toda a área de contato entre as duas peças, que são unidas por pressão até que o calor gerado pela passagem de corrente seja suficiente para fusão do material no ponto de contato.

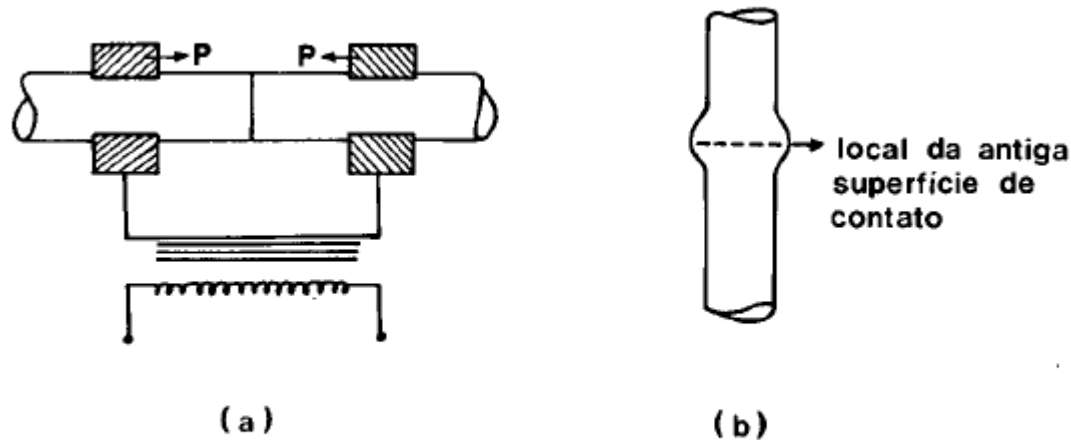


Figura 4.9 — a) Esquema da soldagem topo-a-topo por resistência pura. b) aspecto da solda terminada

Soldagem de topo por centelhamento

Soldagem onde a junção é realizada em toda a área de contato entre as duas peças, porém neste caso as peças são afastadas e aproximadas sequencialmente gerando faíscas até que o aquecimento formado seja suficiente para a soldagem por forjamento.

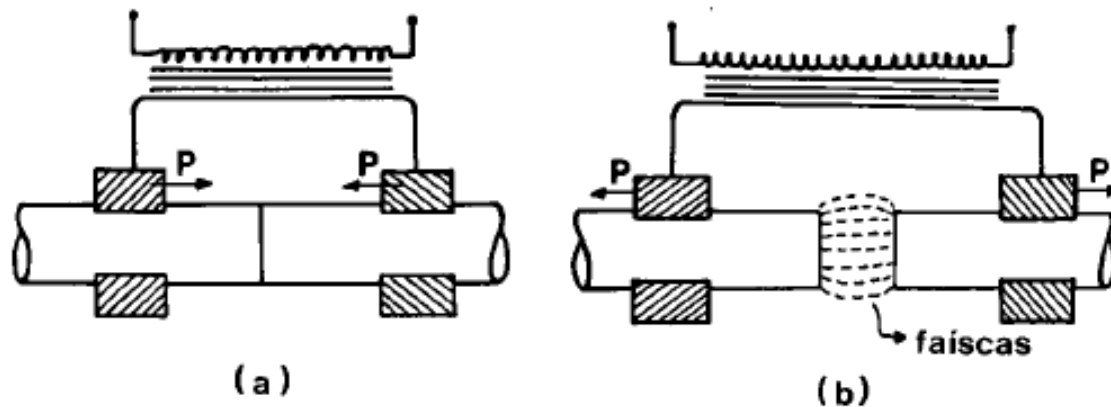


Figura 4.10 — Esquema da soldagem topo-a-topo por centelhamento, mostrando as posições alternadas (a) e (b) durante a fase de aquecimento.

Soldagem por ressalto

Soldagem pela passagem de calor e pressão entre as peças, porém em pontos previamente determinados através de ressaltos presentes nas peças.

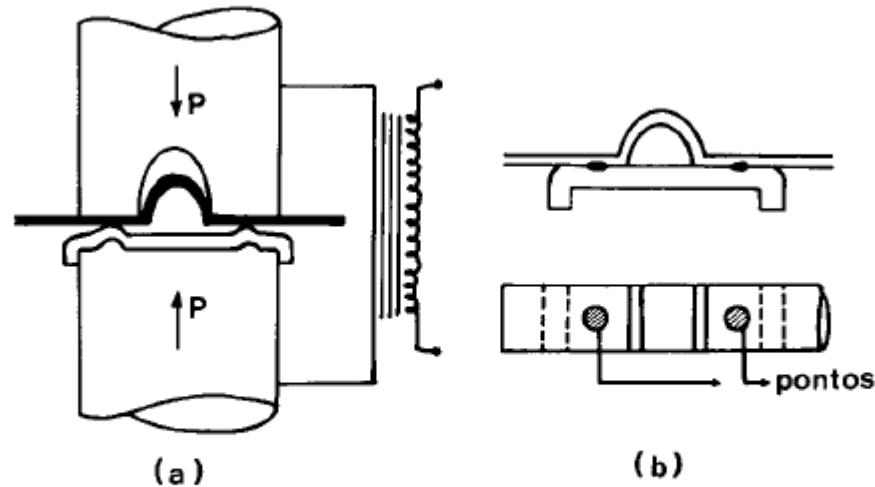


Figura 4.11 — Esquema do processo de soldagem por ressalto (a) mostrando o tipo de soldagem obtida (b)

Soldagem por costura

Soldagem similar à por ponto, porém com o eletrodo em formato de disco, que vai se movimentando, formando um cordão de soldas por ponto.

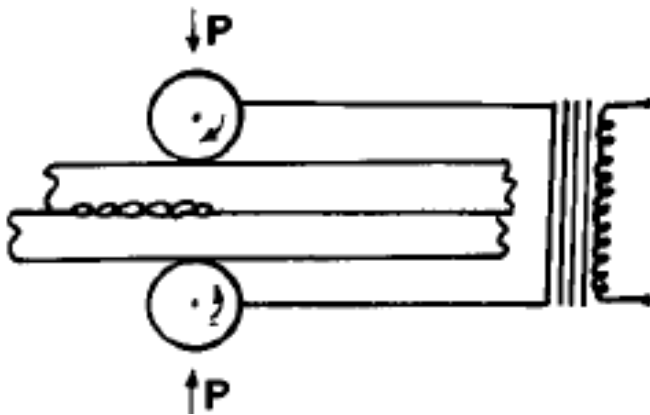
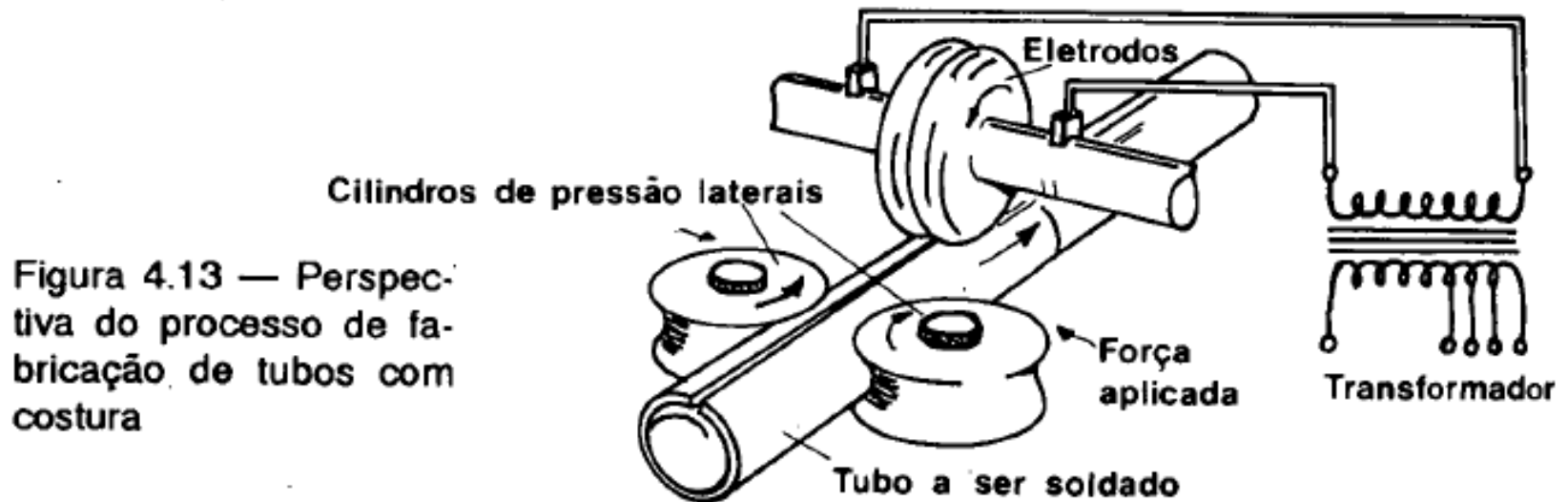


Figura 4.12 — Esquema do processo de soldagem por costura

Soldagem de tubos por costura

Arranjo específico da soldagem por costura para a fabricação de tubos.



Parâmetros de soldagem a ponto

Exemplo de tabela com os parâmetros usuais da soldagem por ponto.

Tabela 4.2 - Ciclo de soldagem por pontos para chapas de aço-1010;
adaptada de ⁽¹⁾

Espessura da chapa mais fina (mm)	Eletrodos tipos I e II (R = 75mm)		Força entre eletrodos (N)	Tempo de soldagem (impulso único) ciclos	Corrente de soldagem (A)	Contato mínimo p/ superposição (mm)	Espaçamento mínimo entre os centros das soldas (mm)	Diâmetro do ponto de solda (mm)	Resistência mínima ao cisalhamento (N)		
	a	D máx (mm)							d máx (mm)	Limite de resistência à tração	
										< 480 MPa	≥ 480 MPa
0,25	15,9	3,2	890	4	4.000	9,5	3,2	2,5	580	800	
0,5		4,8	1.350	6	6.500	11,1	9,5	3,3	1.420	1.960	
0,8		4,8	1.800	8	8.000	11,1	13	4,0	2.540	3.560	
1,0	12,7	6,4	2.250	10	9.500	12,7	19	4,8	4.100	5.400	
1,3		6,4	2.900	12	10.500	14,2	22	5,6	6.000	—	
1,6		6,4	3.500	14	12.000	15,8	25	6,4	8.230	—	
2,0	15,9	8,0	4.500	17	14.000	17,4	32	7,4	12.000	—	
2,4		8,0	5.800	20	15.500	19,0	38	7,9	15.350	—	
2,5	22,2	9,5	7.100	23	17.500	20,6	41	8,1	18.460	—	
3,2		9,5	8.000	26	19.000	22,2	44	8,4	22.250	—	

Distribuição da temperatura

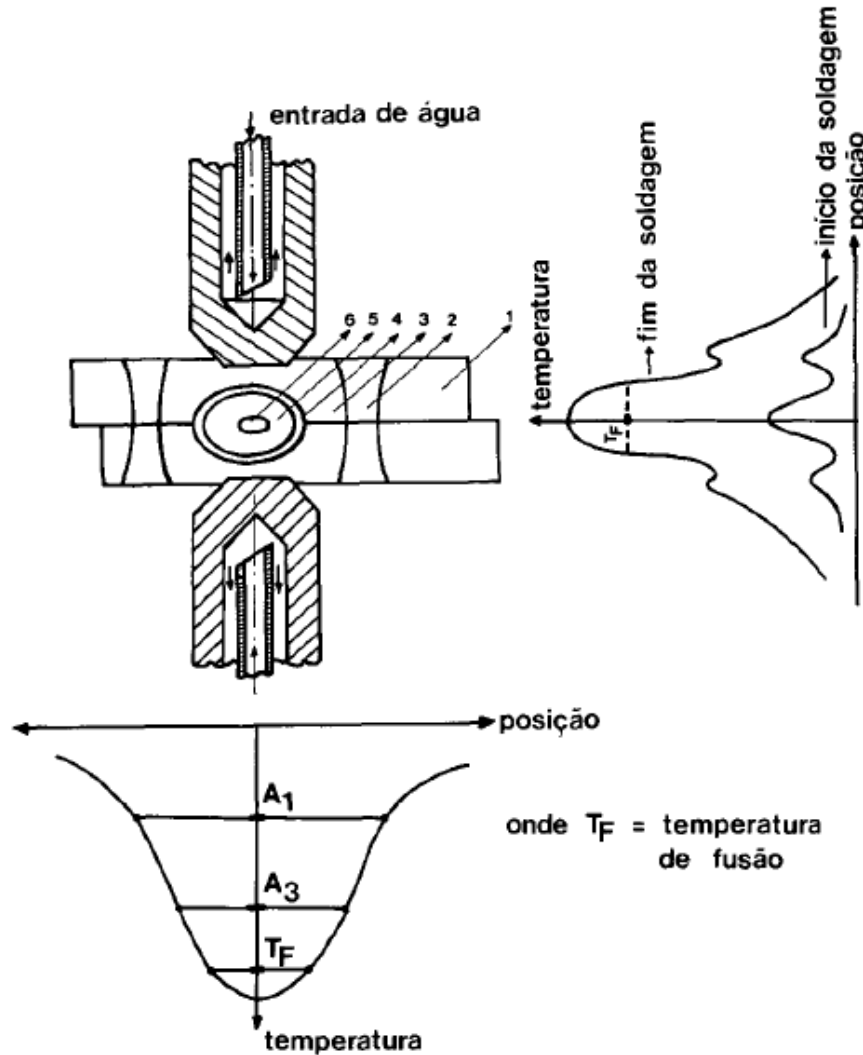


Figura 4.18 — Distribuição da temperatura em uma soldagem por ponto. A distribuição (a) é no plano que passa no centro dos eletrodos; a distribuição (b) é no plano que passa pela superfície de contato entre as chapas.

Distribuição da temperatura

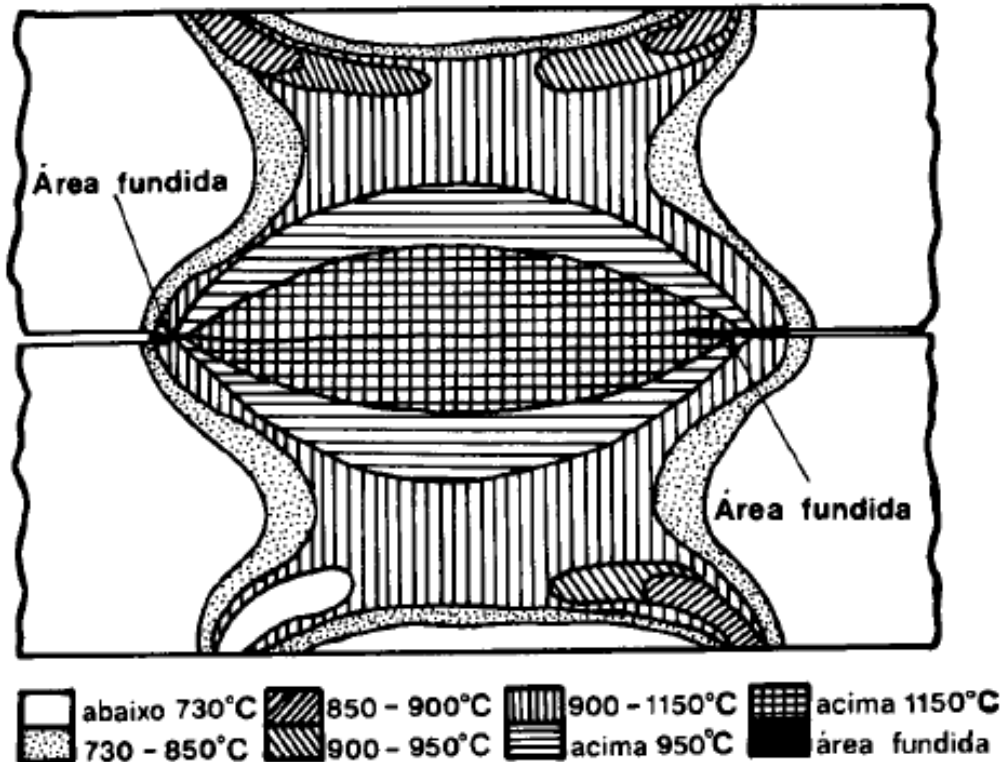


Figura 4.19 — Distribuição de temperatura em um aço-carbono durante a formação de um ponto.

Equipamento

Basicamente composto de componentes:

- sistema mecânico: onde a peça é fixada e é aplicada a força através dos eletrodos
- circuito primário: transformador cuja função é regular a corrente de soldagem
- sistema de controle: atua sobre o tempo de soldagem e, eventualmente, também sobre a aplicação da força do eletrodo

Equipamento

Basicamente composto de componentes:

- sistema mecânico: onde a peça é fixada e é aplicada a **força** através dos eletrodos
- circuito primário: transformador cuja função é regular a **corrente** de soldagem
- sistema de controle: atua sobre o **tempo** de soldagem e, eventualmente, também sobre a aplicação da força do eletrodo

Equipamento

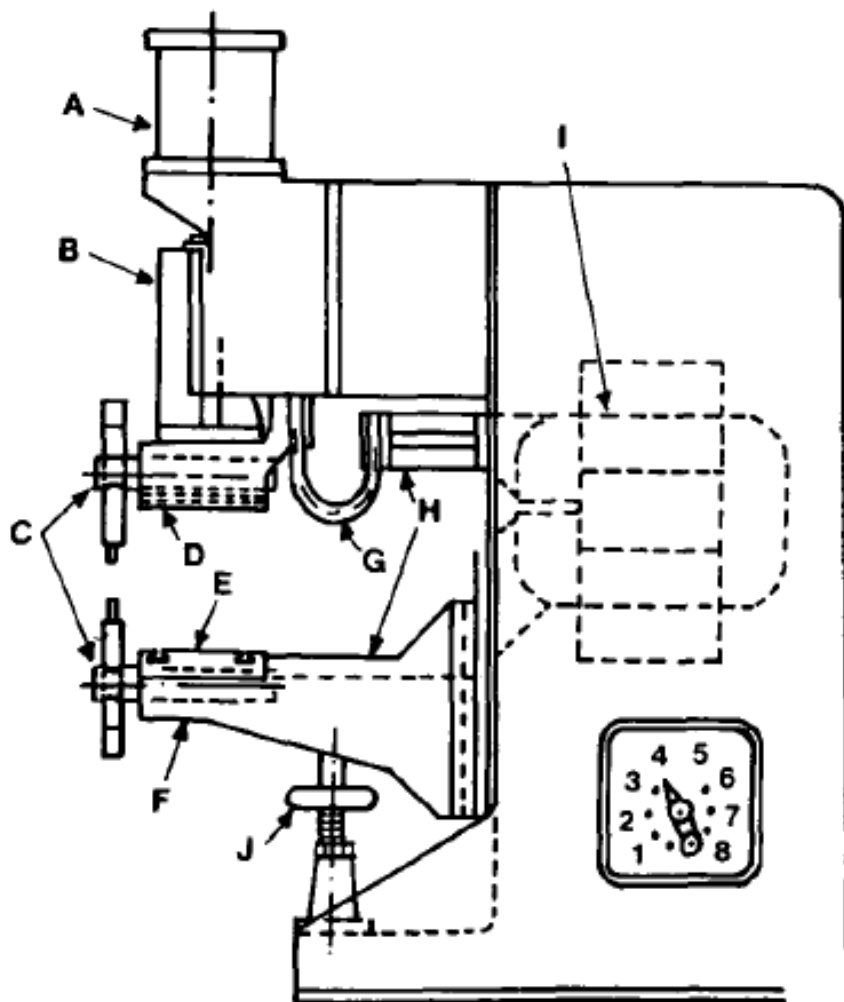


Figura 4.21 — Máquina de solda por resistência, tanto por ponto como por ressalto. A- cilindro hidráulico ou pneumático; B- cabeçote de solda; C- eletrodos com seus suportes; D- mesa superior; E- mesa inferior; F- chapa inferior de reforço; G- contatos flexíveis; H- terminais de contato superior e inferior; I- transformador secundário; J- suporte da chapa de reforço e macaco de parafuso.

Eletrodos

Os eletrodos têm importância vital no processo, e necessitam de propriedades especiais para suportar as condições de trabalho durante a soldagem por resistência:

- condução de eletricidade (800 a 10.000 A/cm²)
- resistência mecânica (LE = 70 a 400 MPa)
- resistência a altas temperaturas
- resistência ao atrito

Eletrodos

Os eletrodos têm importância vital no processo, e necessitam de propriedades especiais para suportar as condições de trabalho durante a soldagem por resistência:

- condução de eletricidade (800 a 10.000 A/cm²)
- resistência mecânica (LE = 70 a 400 MPa)
- resistência a altas temperaturas
- resistência ao atrito

São utilizadas ligas de cobre:

Cu-Cr
Cu-Cr-Zr
Cu-Cd
Cu-Be
Cu-W

Eletrodos

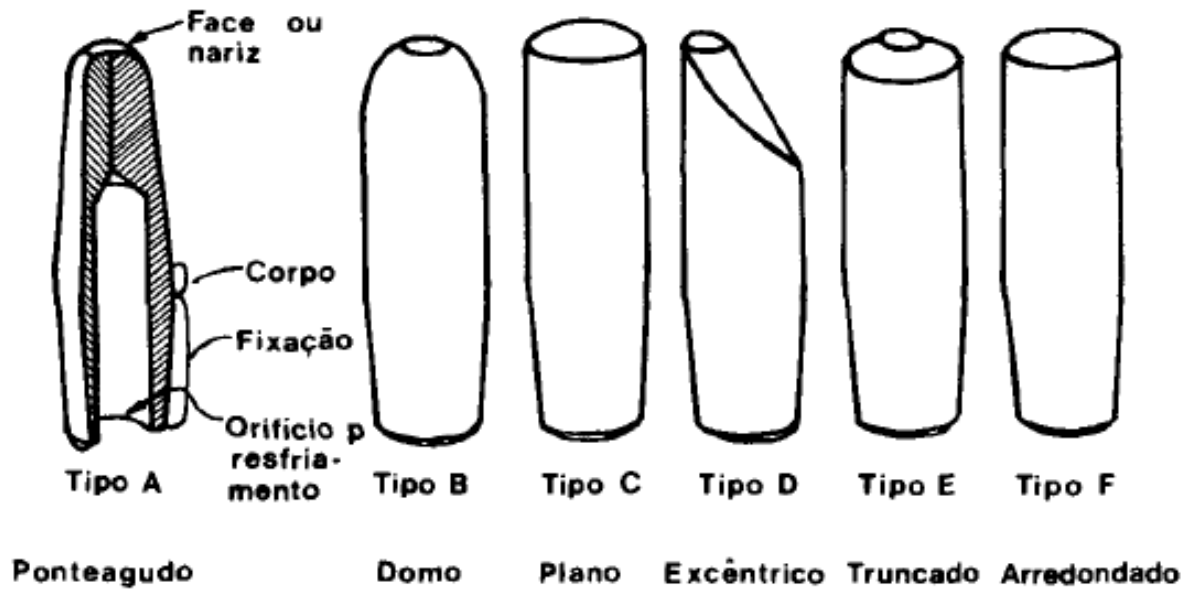


Figura 4.22 — Tipos padrões de eletrodos para a soldagem por ponto

Soldabilidade

Tabela 4.11 - Influência das propriedades físicas na soldabilidade dos metais

Propriedades físicas	Variação da propriedade	Efeito na soldabilidade
Resistividade elétrica	↑	↑
	↓	↓
Condutividade térmica	↑	↓
	↓	↑
Expansão térmica	↑	↓
	↓	↑
Dureza e resistência	↑	↓
	↓	↑
Característica de formação de óxidos	↑	↓
	↓	↑
Faixa de plasticidade em função da temperatura	↑	↑
	↓	↓

Soldabilidade

Material	Soldabilidade
aço baixo C	alta
aço médio e alto C	baixa (em função da possibilidade de temperar)
aços inoxidáveis	baixa (em função da estrutura)
ligas de níquel	boa
ligas de cobre	baixa / boa para ligas que apresentam alta resistência elétrica (latões com alto teor de Zn, ligas Cu-Sn e ligas Cu-Si)
ligas de alumínio	média (baixa resistência elétrica e pequena resistência mecânica a altas temperaturas)
ligas de magnésio	média (baixa resistência mecânica a altas temperaturas)

Qualidade da solda

Tabela 4.12 - Condições da superfície soldada: causas e efeitos

Tipo	Causa	Efeito
Penetração profunda do eletrodo	<ul style="list-style-type: none"> - eletrodo impróprio - falta de controle da força entre eletrodos - taxa excessiva de geração de calor devido à resistência elevada de contato (força do eletrodo baixo) 	<ul style="list-style-type: none"> - aparência ruim - perda da resistência da solda devido à diminuição da espessura da chapa
Fusão superficial (geralmente acompanhada pela penetração profunda do eletrodo)	<ul style="list-style-type: none"> - metal com a superfície suja ou com incrustações de óxidos - força do eletrodo baixa - desalinhamento das peças - corrente de soldagem excessiva - seqüência de soldagem imprópria - eletrodo impróprio 	<ul style="list-style-type: none"> - solda com tamanho menor - diminui a vida do eletrodo - forma um grande buraco na zona de solda - aumenta o custo de remoção das rebarbas

Qualidade da solda

Tabela 4.12 - Condições da superfície soldada: causas e efeitos

Tipo	Causa	Efeito
Solda com formato irregular	<ul style="list-style-type: none"> - desalinhamento das peças - eletrodo impróprio - partes mal fixadas após a soldagem - limpeza imprópria da superfície dos eletrodos - patinação dos eletrodos 	<ul style="list-style-type: none"> - redução da resistência da solda devido à mudança na área de contato e expulsão do metal fundido
Trincas, poros e microporos	<ul style="list-style-type: none"> - retirada da força dos eletrodos antes que a solda se solidifique e resfriamento a temperatura bem abaixo da de fusão - geração excessiva de calor, promovendo expulsão maciça de metal fundido - mal ajuste das partes, necessitando de forças além das aplicadas pelos eletrodos 	<ul style="list-style-type: none"> - redução da resistência à fadiga - aumento na velocidade de corrosão, devido à concentração de líquidos corrosivos nos poros

Qualidade da solda

Tabela 4.12 - Condições da superfície soldada: causas e efeitos

Tipo	Causa	Efeito
Deposição do eletrodo na superfície (geralmente acompanhada de fusão superficial)	<ul style="list-style-type: none">- superfície suja- seqüência de soldagem incorreta- corrente de soldagem elevada- baixa força do eletrodo- eletrodo com material não adequado- eletrodo sujo e afiado	<ul style="list-style-type: none">- diminuição da resistência mecânica com expulsão do metal fundido- diminuição de resistência à corrosão- redução da vida do eletrodo- aspecto comprometedor