

# TECNOLOGIA DA SOLDADURA

UMA ABORDAGEM TÉCNICO-DIDÁTICA

Francisco J. G. Silva

**3<sup>a</sup>** EDIÇÃO  
ATUALIZADA



AUTOR

**FRANCISCO J. G. SILVA**

TÍTULO

**TECNOLOGIA DA SOLDADURA – Uma Abordagem Técnico-Didática**

3ª Edição – atualizada

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

Tel: 220 939 053 · E-mail: geral@quanticaeditora.pt · www.quanticaeditora.pt

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados

Tel. 220 104 872 · info@booki.pt · www.booki.pt

COLABORAÇÃO DE IMAGEM

Ronny Miguel Gouveia

REVISÃO DA 3ª EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda

DESIGN DA 3ª EDIÇÃO

Delineatura – Design de Comunicação · www.delineatura.pt

APOIO

Gislotica – Projeto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda · www.gislotica.pt

IMPRESSÃO

Dezembro, 2022

DEPÓSITO LEGAL

503245/22



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2022 | Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU

621.7      Tecnologia mecânica em geral: processos, ferramentas, máquinas, equipamentos

ISBN

Papel:      9789899101289

Ebook:      9789899101296

Catálogo da publicação

Família:      Engenharia Mecânica

Subfamília: Soldadura

# ÍNDICE

<b>NOTA À 3ª EDIÇÃO</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E DE ABREVIATURAS</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO À SOLDADURA</b>	<b>17</b>
1.1. Introdução aos processos de ligação	19
1.2. A soldadura	20
1.3. Classificação dos processos de soldadura	21
1.4. Nomenclatura usada na soldadura	24
QUESTÕES	32
<b>2. PREPARAÇÃO E CODIFICAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS</b>	<b>33</b>
2.1. Preparação de juntas soldadas	35
2.1.1. Execução dos chanfros	35
2.1.2. Limpeza	37
2.2. Simbologia de soldadura	37
2.2.1. Simbologia segundo a norma ISO 2553	38
2.2.2. Simbologia segundo a norma AWS a2.4	43
2.3. Sistemas de apoio à soldadura	47
QUESTÕES	57
<b>3. SOLDADURA POR ARCO ELÉTRICO</b>	<b>59</b>
3.1. Física do arco elétrico	61
3.2. Fatores externos que afetam a qualidade do arco	68
3.3. Particulares de cada processo relativamente ao arco	69
3.4. Máquinas para soldadura por arco	69
3.4.1. Conceção das fontes de alimentação para soldadura	69
3.4.2. Principais parâmetros que caracterizam as fontes de alimentação	76
3.4.3. Curvas características	78
3.4.4. Seleção da fonte de energia elétrica a utilizar	81
3.4.5. Cuidados a ter com as fontes de alimentação	82
QUESTÕES	83
<b>4. SOLDADURA POR ELÉTRODO REVESTIDO</b>	<b>85</b>
4.1. Características do processo	87
4.2. Os elétrodos revestidos	87
4.3. Funções do revestimento do eletrodo	88
4.3.1. Funções elétricas	89
4.3.2. Funções metalúrgicas	89
4.3.3. Funções físicas e mecânicas	90
4.3.4. Funções operatórias	90
4.3.5. Tipos de revestimento de elétrodos	90
4.3.5.1. Elétrodos com revestimento rutílico	90
4.3.5.2. Elétrodos com revestimento celulósico	91
4.3.5.3. Elétrodos com revestimento básico	91
4.3.5.4. Elétrodos de alto rendimento	92

4.3.6. Codificação AWS dos eletrodos	93
4.3.7. Cuidados a observar na utilização dos eletrodos	95
4.3.8. Equipamentos e acessórios necessários à soldadura com eletrodo revestido	95
4.3.9. Parâmetros de soldadura	96
4.3.9.1. Tipo do eletrodo	96
4.3.9.2. Diâmetro do eletrodo	97
4.3.9.3. Tipo e intensidade da corrente elétrica	97
4.3.9.4. Comprimento do arco	100
4.3.9.5. Velocidade de soldadura	101
4.3.9.6. Manipulação e orientação do eletrodo	101
4.4. O fenómeno de sopro magnético com eletrodo revestido	103
4.5. Breves considerações sobre a técnica operatória	104
4.5.1. Escorvamento, manutenção e fecho do arco	104
4.5.2. Pingagem	104
4.5.3. Dificuldades sentidas na soldadura por arco elétrico com eletrodo revestido	104
4.6. Aplicações	105
QUESTÕES	106
<b>5. SOLDADURA SEMIAUTOMÁTICA (MIG-MAG)</b>	<b>107</b>
5.1. Princípios do processo	109
5.2. Equipamento característico e operação no processo MIG-MAG	110
5.3. Gases e misturas gasosas de proteção na soldadura pelo processo MIG-MAG	116
5.3.1. Gases inertes para MIG	117
5.3.2. Gases reativos para MAG	117
5.3.3. Misturas gasosas	118
5.4. Modos de transferência do metal de adição no processo MIG-MAG	122
5.4.1. Transferência tipo curto-circuito	123
5.4.2. Transferência tipo globular	125
5.4.3. Transferência <i>spray</i>	126
5.4.4. Modo tipo pulsado	126
5.5. Parâmetros do processo	129
5.5.1. Intensidade de corrente	130
5.5.2. Tensão e comprimento do arco	130
5.5.3. Velocidade de soldadura	132
5.5.4. Extensão livre do eletrodo	132
5.5.5. Posição da tocha	133
5.5.6. Diâmetro do eletrodo	134
5.5.7. Gás de proteção	135
5.5.8. Polaridade	135
5.5.9. Resumo da influência dos parâmetros de soldadura	136
5.6. Codificação dos fios sólidos para a soldadura MIG-MAG	137
5.7. Aplicações	138
QUESTÕES	141
<b>6. SOLDADURA COM FIO FLUXADO</b>	<b>143</b>
6.1. Princípios do processo	146
6.2. Equipamento próprio do sistema de soldadura com fios fluxados	147
6.3. Parâmetros do processo	148
6.3.1. Intensidade de corrente na soldadura com fio fluxado	149
6.3.2. Diferença de potencial na soldadura com fio fluxado	149

6.3.3. Polaridade	149
6.3.4. Gás de proteção na soldadura com fio fluxado e atmosfera protetora adicional	150
6.3.4.1. Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	150
6.3.4.2. Misturas Árgon/Dióxido de Carbono	151
6.4. Modos de transferência no processo de soldadura com fio fluxado	152
6.5. Os fios fluxados	152
6.5.1. Processo de fabrico do fio fluxado	153
6.5.2. Funções dos componentes dos fios consumíveis	154
6.5.3. Composição do fluxo	154
6.5.3.1. Fluxos rútilicos	154
6.5.3.2. Fluxos básicos	155
6.5.3.3. Arames tubulares autoprotetidos	156
6.5.3.4. Arames tubulares metálicos	157
6.5.3.5. Resumo das principais características dos arames tubulares	158
6.6. Classificação dos fios fluxados	158
6.7. Vantagens do uso de fios fluxados	158
6.8. Desvantagens do uso da soldadura com fios fluxados	159
6.9. Aplicações do processo de soldadura com fio fluxado	159
QUESTÕES	160
<b>7. SOLDADURA TIG</b>	<b>161</b>
7.1. Princípio do processo	163
7.2. Equipamento necessário à soldadura pelo processo TIG	164
7.3. Os eletrodos de Tungsténio	168
7.3.1. Eletrodos de Tungsténio puro	169
7.3.2. Eletrodos de Tungsténio com adições de Tório	169
7.3.3. Eletrodos de Tungsténio com adições de Cério	169
7.3.4. Eletrodos de Tungsténio com adições de Lantânio	169
7.3.5. Eletrodos de Tungsténio com adições de Zircónio	170
7.4. Material de adição no processo TIG	173
7.5. Gases de proteção no processo TIG	174
7.6. Parâmetros de soldadura	175
7.6.1. Tipo de corrente	175
7.6.1.1. Polaridade direta (eletrodo ligado ao negativo)	175
7.6.1.2. Polaridade inversa (eletrodo ligado ao positivo)	175
7.6.1.3. Corrente alternada	175
7.7. Tensão no arco	178
7.7.1. Tensão no arco	178
7.7.2. Velocidade de soldadura	178
7.7.3. Geometria da extremidade do eletrodo	178
7.7.4. Velocidade de alimentação do fio no TIG mecanizado	179
7.8. Técnica operatória	179
7.9. Vantagens e limitações do processo	180
7.10. Soldadura TIG através do método <i>keyhole</i>	181
7.11. Soldadura por pontos através do processo TIG	182
7.12. Aplicações do processo TIG	184
QUESTÕES	185
<b>8. SOLDADURA POR PLASMA</b>	<b>187</b>
8.1. Princípio do processo de soldadura por plasma	189

8.2. Especificidades e parâmetros envolvidos no processo de soldadura por plasma .....	190
8.2.1. Escorvamento do arco na soldadura por plasma .....	190
8.2.2. Tipos de arco .....	191
8.2.3. Comprimento do arco .....	191
8.2.4. Tipo de corrente e polaridade utilizadas no processo plasma .....	191
8.2.5. Regulações usuais de parâmetros .....	193
8.3. Equipamento .....	194
8.3.1. Fonte de alimentação .....	195
8.3.2. Tochas .....	195
8.4. Modo de operação .....	197
8.4.1. Técnica <i>Keyhole</i> .....	197
8.5. Eléttodos para a soldadura por plasma .....	200
8.6. Vantagens do processo de soldadura por plasma .....	200
8.7. Aplicações da soldadura por plasma .....	201
QUESTÕES .....	202
<b>9. SOLDADURA POR ARCO SUBMERSO .....</b>	<b>203</b>
9.1. Princípio do processo de soldadura por arco submerso .....	205
9.2. Equipamento necessário ao processo .....	208
9.3. Parâmetros do processo .....	209
9.3.1. Intensidade da corrente de soldadura .....	209
9.3.2. Tensão de soldadura .....	211
9.3.3. Velocidade de soldadura .....	212
9.3.4. Diâmetro do eléctrodo .....	212
9.3.5. Extremidade livre do eléctrodo .....	212
9.3.6. Polaridade do eléctrodo .....	213
9.4. Tipo e quantidade de fluxo granulado .....	213
9.5. Posição da tocha .....	215
9.6. Vantagens e limitações do processo de soldadura por arco submerso .....	216
9.7. Aplicações .....	216
QUESTÕES .....	218
<b>10. SOLDADURA POR RESISTÊNCIA .....</b>	<b>219</b>
10.1. Princípio do processo .....	221
10.2. Técnica operatória .....	222
10.3. Equipamento necessário à soldadura por resistência .....	227
10.4. Parâmetros de soldadura .....	229
10.4.1. Resistência eléctrica .....	229
10.4.2. Intensidade de corrente que atravessa a junta .....	230
10.4.3. Tempo de soldadura .....	230
10.4.4. Força de aperto dos eléctrodos .....	230
10.4.5. Material, forma e estado dos eléctrodos .....	231
10.4.6. Estado superficial das peças a soldar .....	231
10.4.7. Algumas indicações práticas sobre a regulação de parâmetros .....	232
10.4.8. Composição química dos materiais a soldar .....	234
10.5. Soldabilidade de diferentes materiais pelo processo de soldadura por resistência .....	234
10.6. Juntas especiais na soldadura por resistência .....	235
10.7. Estudo da qualidade das soldaduras efetuadas por resistência .....	236
10.8. Problemas resultantes do processo de soldadura por resistência .....	236
10.9. Testes efetuados a juntas soldadas por resistência/pontos .....	237

10.10. Aplicações	237
QUESTÕES	239
<b>11. SOLDADURA POR FRICÇÃO</b>	<b>241</b>
11.1. Princípio do processo de soldadura por fricção convencional	243
11.1.1. Parâmetros envolvidos na soldadura por fricção	246
11.1.1.1. Velocidade de rotação	246
11.1.1.2. Pressão	246
11.1.1.3. Tempo de aquecimento	247
11.1.2. Vantagens e desvantagens deste processo	247
11.1.3. Equipamentos para a soldadura por fricção	248
11.1.4. Aplicações da soldadura por fricção	249
11.2. Princípio do processo de soldadura por fricção linear ( <i>friction stir welding</i> )	251
11.2.1. Ferramentas necessárias ao processo	251
11.2.2. Vantagens e desvantagens do processo	253
QUESTÕES	254
<b>12. SOLDADURA POR EXPLOSÃO</b>	<b>255</b>
12.1. Princípio do processo de soldadura por explosão	257
12.2. Parâmetros relacionados com a soldadura por explosão	259
12.3. Vantagens e limitações da soldadura por explosão	259
12.4. Aplicações da soldadura por explosão	260
QUESTÕES	261
<b>13. SOLDADURA POR LASER</b>	<b>263</b>
13.1. Princípio de geração do feixe <i>laser</i>	265
13.2. Tipos de <i>laser</i> usados em soldadura	266
13.2.1. <i>Laser</i> CO <sub>2</sub>	266
13.2.2. <i>Laser</i> Nd:YAG	267
13.2.3. <i>Lasers</i> de fibra ótica	267
13.3. Características do processo de soldadura <i>laser</i>	268
13.4. Parâmetros principais de operação na soldadura <i>laser</i>	269
13.5. Vantagens e limitações da soldadura <i>laser</i>	270
13.6. Aplicações	272
QUESTÕES	274
<b>14. SOLDADURA POR FEIXE DE ELETRÕES</b>	<b>275</b>
14.1. Princípio do processo	277
14.2. Variantes do processo de soldadura por feixe de eletrões	278
14.3. Equipamento de soldadura por feixe de eletrões	279
14.4. Vantagens e limitações do processo de soldadura por feixe de eletrões	280
14.5. Áreas de aplicação da soldadura por feixe de eletrões	282
QUESTÕES	284
<b>15. SOLDADURA OXIACETILÉNICA</b>	<b>285</b>
15.1. Soldadura tendo o gás como fonte de calor	287
15.2. Soldadura oxiacetilénica	290
15.2.1. Princípio do processo de soldadura oxiacetilénica	290
15.2.2. O Acetileno e o Oxigénio	291
15.2.3. Equipamento necessário	292



15.2.4. Parâmetros associados ao processo de soldadura oxiacetilénica	293
15.2.5. Técnica operatória	294
15.2.6. Vantagens apresentadas pela soldadura oxiacetilénica	294
15.2.7. Aplicações	295
QUESTÕES	296
<b>16. BRASAGEM</b>	<b>297</b>
16.1. Princípio do processo	300
16.2. Formas de aquecimento	302
16.2.1. Ferro de soldar	303
16.2.2. Maçarico	303
16.2.3. Fornos	304
16.2.4. Indução/alta-frequência	305
16.2.5. Feixe <i>laser</i>	306
16.2.6. Resistência	306
16.3. Materiais de adição	306
16.3.1. Decapantes/Fluxos	307
16.4. Processo operatório	307
16.5. Soldobrasagem	308
16.6. Aplicações	309
QUESTÕES	310
<b>17. DEFEITOS DE SOLDADURA</b>	<b>311</b>
17.1. Breve resumo sobre as causas dos defeitos	313
17.2. Enquadramento normativo	314
17.3. Classificação principal dos defeitos	314
17.3.1. Defeitos geométricos	314
17.3.1.1. Distorção e encurvadura	314
17.3.1.2. Excesso de material	317
17.3.1.3. Sobreposição	319
17.3.1.4. Desalinhamento	319
17.3.1.5. Falta de preenchimento	321
17.3.1.6. Falta de penetração na raiz	322
17.3.1.7. Excesso de penetração na raiz	324
17.3.1.8. Convexidade excessiva	325
17.3.1.9. Concavidade excessiva	326
17.3.1.10. Cordão assimétrico	327
17.3.2. Defeitos intrínsecos	328
17.3.2.1. Salpicos/projeções	328
17.3.2.2. Mordeduras e Bordos queimados	329
17.3.2.3. Inclusões de escória	331
17.3.2.4. Inclusões de Tungsténio	333
17.3.2.5. Porosidade	334
17.3.2.5.1. Ninhos de poros	336
17.3.2.5.2. Porosidade alinhada no centro do cordão	336
17.3.2.5.3. Porosidade uniformemente distribuída	337
17.3.2.6. Falta de fusão	338
17.3.2.7. Fissuração	339
17.3.2.7.1. Fissuração a quente	340
17.3.2.7.2. Fissuração a frio	341
QUESTÕES	345



<b>18. CONTROLO DE DEFEITOS EM SOLDADURA</b>	<b>347</b>
18.1. Controlo de juntas através de ensaios destrutivos	350
18.1.1. Análise metalográfica	350
18.1.2. Ensaios de tração	350
18.1.3. Ensaios de dureza	351
18.1.4. Ensaios de impacto	351
18.1.5. Ensaios de dobragem	351
18.1.6. Outros ensaios destrutivos	352
18.2. Controlo de juntas através de ensaios não destrutivos	353
18.2.1. Inspeção visual	353
18.2.2. Líquidos penetrantes	355
18.2.3. Magnetoscopia	356
18.2.4. Ultrassons	359
18.2.5. Raios-X	364
QUESTÕES	368

<b>ANEXO A – EXEMPLOS COMPLEMENTARES DE SIMBOLOGIA UTILIZADA EM SOLDADURA</b>	<b>CCCLXIX</b>
<b>ANEXO B – CASOS DE ESTUDO SOBRE GABARITOS DE SOLDADURA</b>	<b>CCCLXXVII</b>
<b>ANEXO C – DIAGRAMA DE POSIÇÕES DE SOLDADURA</b>	<b>CDI</b>
<b>ANEXO D – QUESTÕES</b>	<b>CDV</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>CDXXI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>CDXXIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>CDXXXVII</b>

## 1.1. Introdução aos processos de ligação

As indústrias de construção metálica e metalomecânica necessitam correntemente de produzir peças com formas relativamente complexas. Para tal, a indústria tem atualmente ao dispor três grandes grupos de tecnologias: a tecnologia subtrativa, a tecnologia neutra e a tecnologia aditiva.

Na tecnologia subtrativa poderá ser incluída a maquinagem, por exemplo, que parte de um bloco de material anteriormente obtido por fundição (lingote, bilete ou outro), o qual é posteriormente conformado plasticamente por forjagem ou laminagem, e só depois sujeito ao processo de maquinagem por arranque de aparas. Neste processo, sucessivas passagens da mesma ou de diferentes ferramentas vão subtraindo o material necessário até que seja obtida a forma final desejada. Este processo subtrativo é utilizado com frequência na produção de peças que exigem elevado rigor dimensional, entre as quais se pode destacar os moldes para a injeção de plásticos, os moldes para injeção de ligas leves, os cunhos e cortantes para prensas, entre muitos outros tipos de peças que, mesmo possuindo menores dimensões, obrigam a cuidados especiais na sua produção, devido às exigentes tolerâncias requeridas. O corte é outro processo subtrativo muito utilizado, sendo realizado de forma extremamente frequente em chapas, tubos e perfis com recurso aos mais diversos processos, tais como o corte em prensa, o corte *laser*, o corte por jato de água, entre outros.

Quando são utilizadas tecnologias neutras, é esperado que haja um fluxo de material de uma forma inicial para outra intermédia ou final, sem que haja perda significativa de material. Poderão ser considerados como neutros processos tais como a laminagem, o forjamento, a embutidura, a estampagem ou a quinagem, entre muitos outros processos de transformação de metais. Deve aqui ser referido que os processos realizados a quente poderão acarretar alguma perda de material, enquanto os processos realizados a frio apresentam perdas de material nulas ou pouco significativas. Poderá ser citado como exemplo um tacho, que parte de um simples disco de metal obtido por corte e, por conformação plástica, adquire a forma que é pretendida.

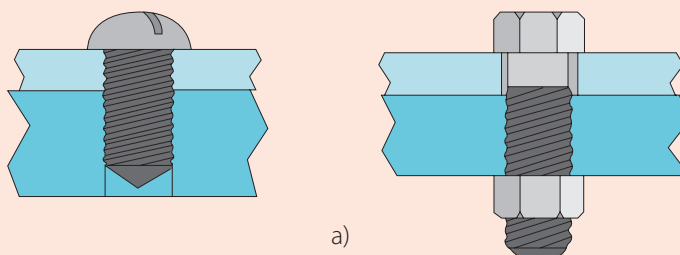
As tecnologias sumativas têm como ponto de partida formas normalizadas, bastante simples, sendo a forma complexa requerida pelo produto final construída através da junção de diversas formas simples. Neste caso, são utilizados muitas vezes semiprodutos, tais como chapas, barras, cantoneiras ou tubos, os quais, unidos através de processos de ligação adequados, poderão originar produtos finais complexos, tais como a estrutura de uma motocicleta, um silo, uma cisterna, um poste de distribuição de energia ou mesmo uma ponte.

Quando necessitamos de ligar peças e/ou subprodutos, teremos que ponderar qual o processo mais indicado para o efeito, tendo em atenção fatores tão importantes quanto o(s) material(ais) a ligar, as solicitações a que o conjunto vai estar sujeito e a resistência requerida, a quantidade a ligar, o nível de manutenção desejado e a facilidade ou não com que esta pode ser realizada, problemas relacionados com concentração de tensões, problemas com deformações devidas a tensões de origem térmica, problemas de acesso, entre muitos outros.

Atendendo aos fatores atrás referidos, poderemos optar por uma ligação amovível ou inamovível.

Como exemplos de ligações amovíveis poderemos considerar o aparafusamento, a montagem rápida (molas) ou a rebitagem (esta necessita de trabalho suplementar para a desmontagem). A colagem, dependendo do adesivo utilizado e da forma como pode ser removido (forma mecânica ou forma química), poderá ser considerada uma ligação amovível ou inamovível. Por vezes pode também ser utilizada a conformação plástica, bastante utilizada em latas para conservas e não só, que poderá ser considerada uma ligação inamovível, pois a desmontagem leva à degradação parcial do material ligado.

Já a soldadura é uma ligação perfeitamente inamovível, pois envolve normalmente a participação íntima dos materiais intervenientes na união.



## 1.4. Nomenclatura usada na soldadura

Para uma correta abordagem à soldadura, é necessário, primeiramente, dominar o vocabulário mais correntemente utilizado quando se trata desta matéria. Com o objetivo de dar a conhecer a terminologia mais comum relativa às juntas soldadas, são mostradas seguidamente algumas figuras, onde estão indicadas a nomenclatura habitualmente utilizada e as abreviaturas normalmente usadas, assim como a zona a que correspondem numa junta.

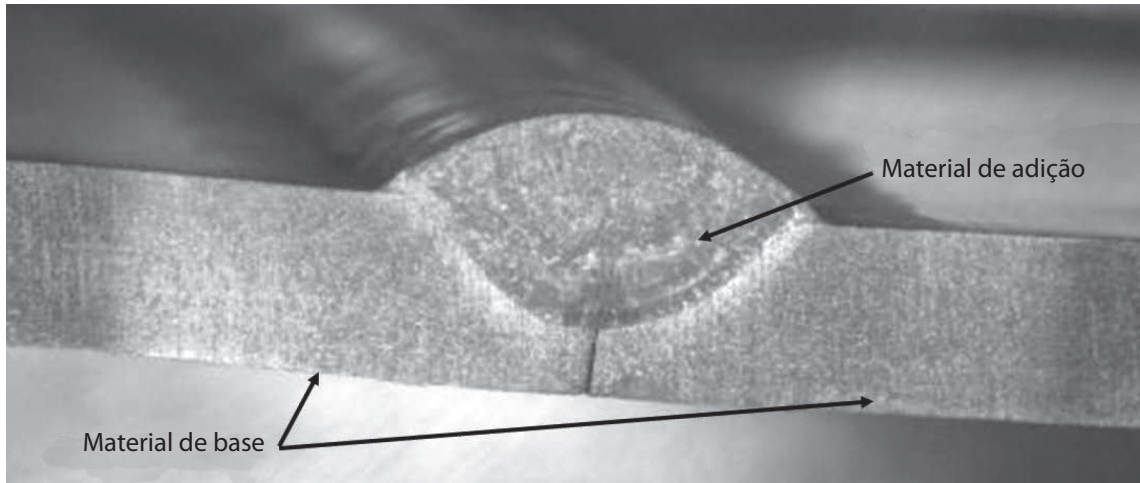


Figura 1.5. Conceito de material de base e material de adição.

Um dos conceitos básicos em soldadura é saber a que se refere o material de base e o material de adição. Basicamente, o MATERIAL DE BASE são os componentes que queremos soldar, enquanto o MATERIAL DE ADIÇÃO é a porção de eletrodo ou fio fundido depositado na junta, responsável por promover a ligação.

Relativamente à junta propriamente dita, deveremos considerar a figura seguinte para atendermos à terminologia normalmente utilizada.

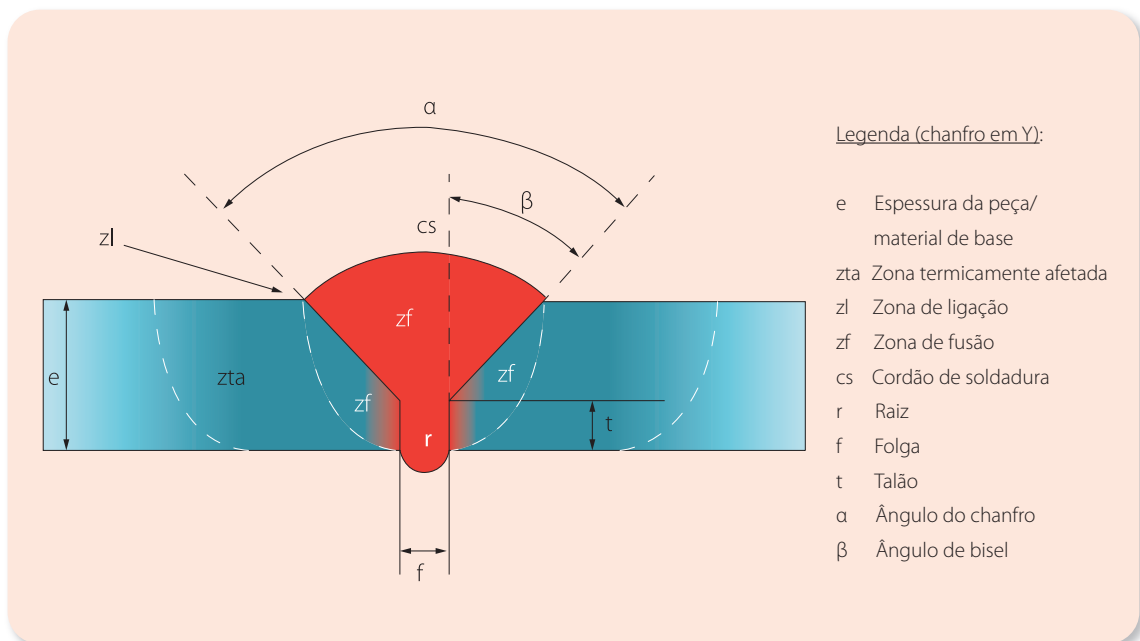
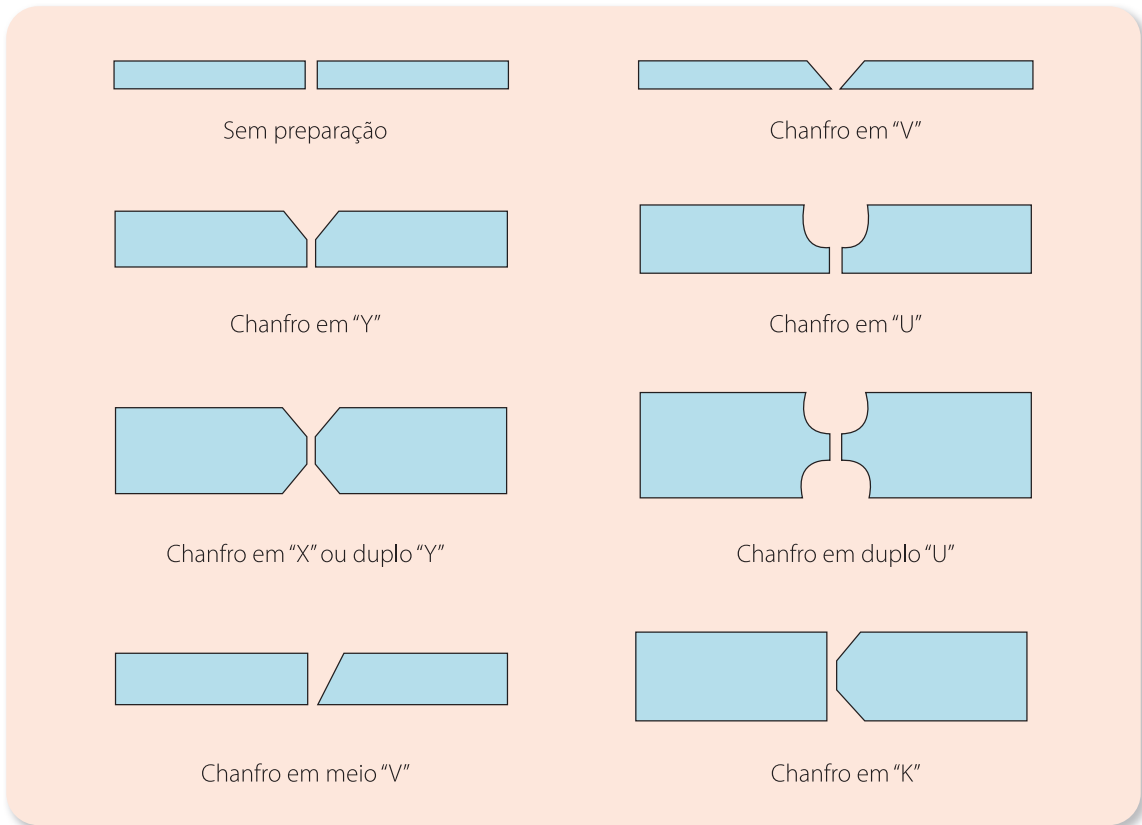


Figura 1.6. Representação esquemática de uma junta soldada e respetiva nomenclatura.

## 2.1. Preparação de juntas soldadas

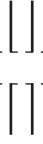
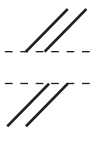



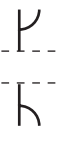
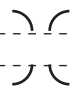
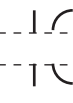
### 2.1.1. Execução dos chanfros

Dependendo essencialmente da espessura dos materiais de base a soldar, a preparação da junta pode ser uma operação extremamente importante para a qualidade global da soldadura. A preparação de juntas, para além da limpeza obrigatória das superfícies a unir, implica na maior parte das vezes a realização de chanfros, os quais podem ser produzidos nas peças através de maquinagem por arranque de apara (normalmente um processo caro) ou através de rebarbagem. A tabela seguinte ilustra alguns dos tipos de chanfros que podem ser solicitados pelos projetistas, e que devem ser reproduzidos nos componentes a ligar, seguindo escrupulosamente as indicações do projeto e as normas correspondentes.



**Figura 2.1.** Algumas configurações para o tipo de preparação a efetuar com vista à realização de juntas soldadas.

**Tabela 2.1.** Simbologia para os tipos mais comuns de chanfros para juntas soldadas.

Tipo de Chanfro							
Topo-a-Topo	Biselado	V	Meio V	U	Meio U	Curvilíneo	Reto/Curvo
							

### 3.1. Física do arco elétrico

A soldadura implica, na maioria dos casos, a fusão do material de base e, geralmente, também a do material de adição, embora haja exceções, conforme poderemos ver adiante. Quando pretendemos a fusão intensa dos materiais de base e de adição, utiliza-se em grande parte dos casos, como fonte de calor, um arco elétrico gerado pela passagem da corrente elétrica através de um meio gasoso situado entre o cátodo (elétrodo negativo) e o ânodo (elétrodo positivo). O arco elétrico é muito utilizado porque é um meio prático de gerar a energia necessária à soldadura. Os equipamentos apresentam custos aceitáveis, o controlo do processo é relativamente simples e o nível de risco para a saúde dos operadores é relativamente baixo. O arco elétrico produzido irá transformar energia elétrica em energia calorífica. Esta energia é transmitida à peça através da projeção do arco sobre a peça, dependendo da área de contacto entre a extremidade do arco e a peça. No entanto, dependendo do material de base, este calor tende a difundir-se no material de base, dificultando em determinados casos a soldadura. Assim, é importante que o calor fornecido pela fonte de alimentação se processe a uma taxa bastante superior à de dissipação do mesmo, através do material de base, para que se produza o efeito pretendido de fusão do material de base e do material de adição.

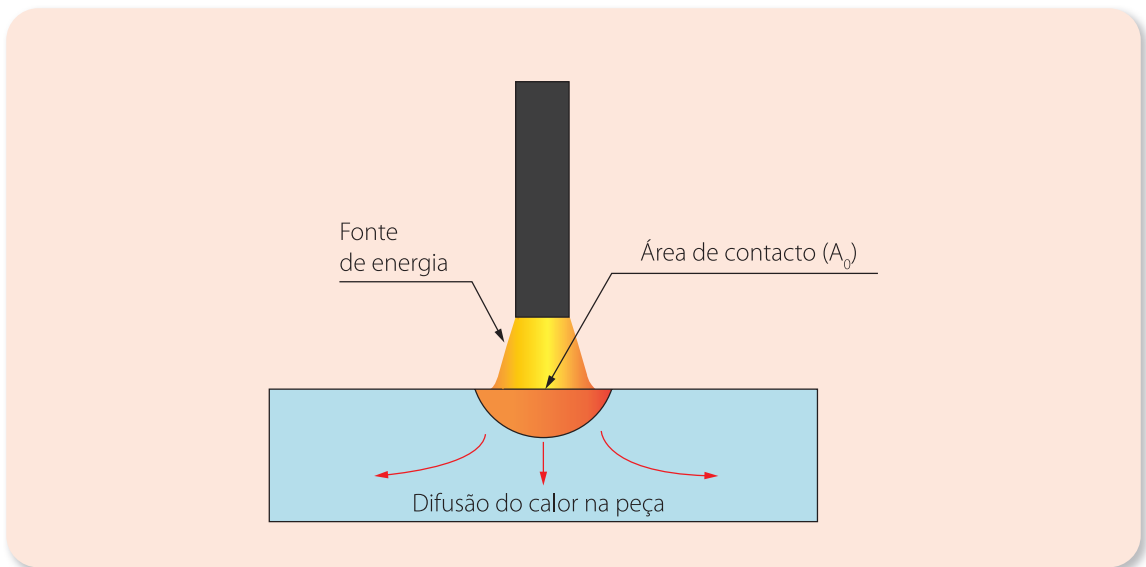


Figura 3.1. Diagrama esquemático da projeção do arco elétrico sobre o material de base (Modenesi, 2001).

Desta forma, o calor produzirá tanto mais efeito quanto mais concentrada for a área de contacto atrás referida, menor for o tempo necessário para a transmissão de energia e maior for a energia efetiva despendida no processo. Então, a **Potência Específica**, expressa em  $W/m^2$ , poderá ser traduzida pela seguinte expressão para os processos de arco elétrico:

$$P_{esp} = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{A_0} \quad (1.1)$$

onde  $V$  representa a Diferença de Potencial em carga da fonte de energia, expressa em Volt,  $I$  representa a Intensidade de Corrente, expressa em Ampere,  $A_0$  representa a Área de Contacto expressa em  $m^2$  e  $\eta$  representa o rendimento do processo. Por outro lado, poderemos considerar que a Entrega Térmica se define através da seguinte expressão:

$$E_T = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad (1.2)$$

## 4.4. O fenómeno de sopro magnético com elétrodo revestido

Quando a corrente elétrica atravessa a alma do elétrodo, os cabos e as peças a soldar, geram-se campos magnéticos com uma forma circular em planos perpendiculares em cada ponto à direção da passagem da corrente. Quando os campos que rodeiam o elétrodo e as peças ficam em desequilíbrio, o arco tem tendência a defletir, afastando-se da área onde é mais intenso o campo magnético. O fenómeno de deflexão do arco é designado por sopro magnético. Este fenómeno faz-se sentir mais intensamente quando é utilizada corrente contínua (principalmente quando são utilizados geradores rotativos como fonte de alimentação), já que em corrente alternada a troca de polaridade constante reduz significativamente este problema.

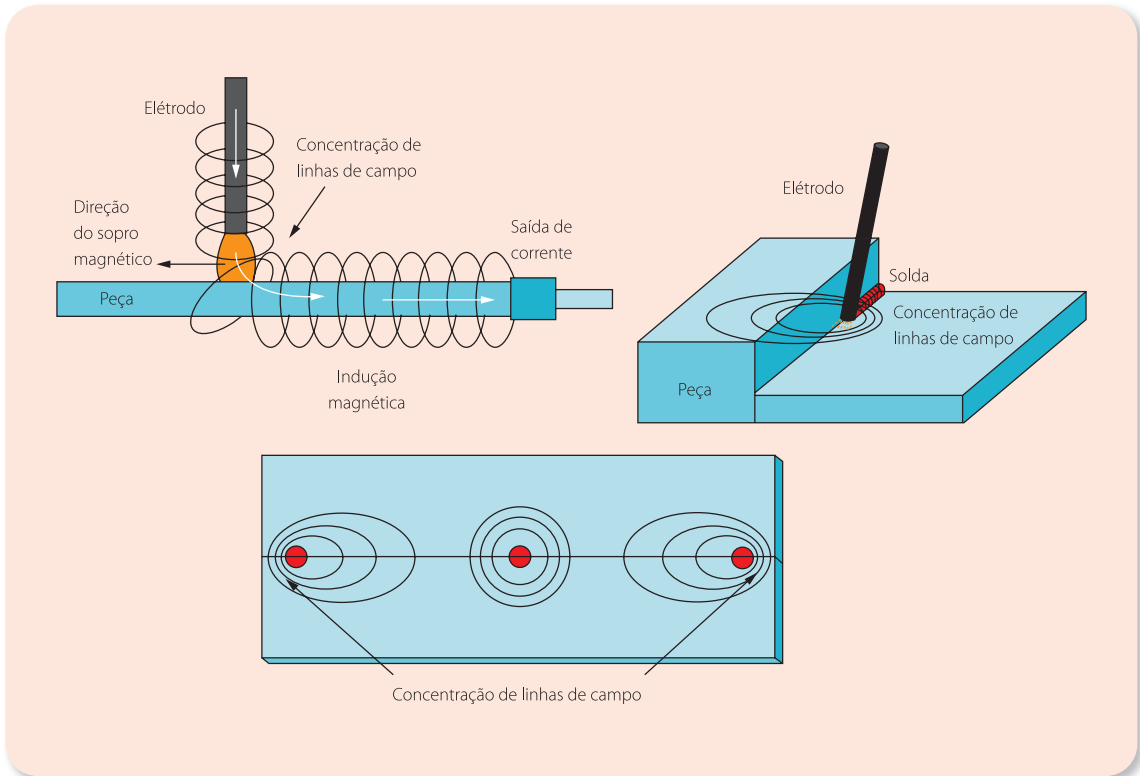


Figura 4.8. Campos magnéticos que geram o efeito de Sopro Magnético.

O fenómeno tem tendência a intensificar-se com os seguintes fatores:

- Quando se utilizam elérodos de revestimento espesso, contendo mais de 30% de pó de Ferro;
- Ao terminar um cordão de soldadura;
- Com o mau estado dos acessórios de soldadura.

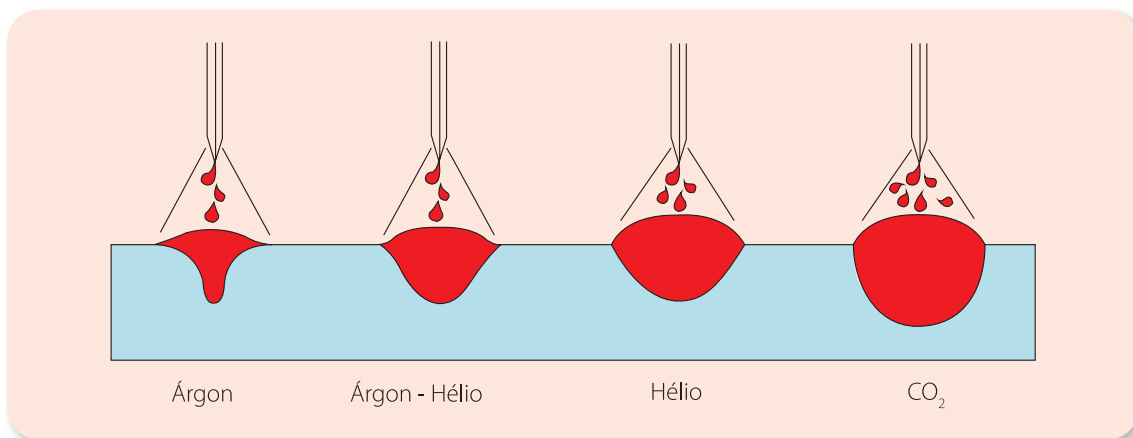
As medidas corretivas a aplicar para evitar este fenómeno são as seguintes:

- Mudar a fonte de alimentação para corrente alternada;
- Reduzir o comprimento do arco elétrico;
- Reduzir a intensidade de corrente utilizada;
- Soldar na direção de pingos fortes ou de pequenos cordões anteriormente realizados;
- Utilizar a técnica de passo de peregrino para cordões mais longos;
- Colocar a ligação de terra o mais afastada possível do local onde se pretende realizar o cordão.

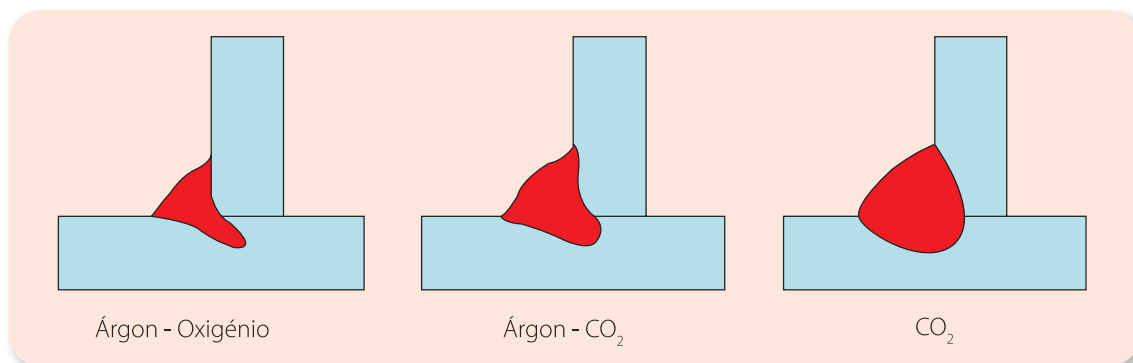
**Tabela 5.1.** Campos de aplicação dos gases e misturas gasosas de proteção na soldadura MIG-MAG.

Gás ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Árgon	Inerte	Quase todos os metais, exceto o aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Ar + He (20-50%)	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Azoto		Cobre (devido a maior energia térmica)
Ar + N <sub>2</sub> (20-30%)		<i>idem</i> , mas melhor do que 100% N <sub>2</sub>
Ar + O <sub>2</sub> (1-2%)	Oxidante Moderado	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + O <sub>2</sub> (3-5%)	Oxidante	Aços ao Carbono e alguns aços de baixa liga
CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aços ao Carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + CO <sub>2</sub> (20-50%)	Oxidante	Vários aços. Transferência por Curto-Circuito
Ar + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	Oxidante	Vários aços

Na Tabela 5.1. poderá verificar-se, de forma resumida, qual a gama de aplicação de alguns dos gases e misturas gasosas anteriormente focadas e que são mais comuns. Nas duas figuras seguintes, poderá ainda ser observado o efeito dos principais gases de proteção usados no processo MIG-MAG, quando aplicados a soldaduras ao baixo ou "em canto".

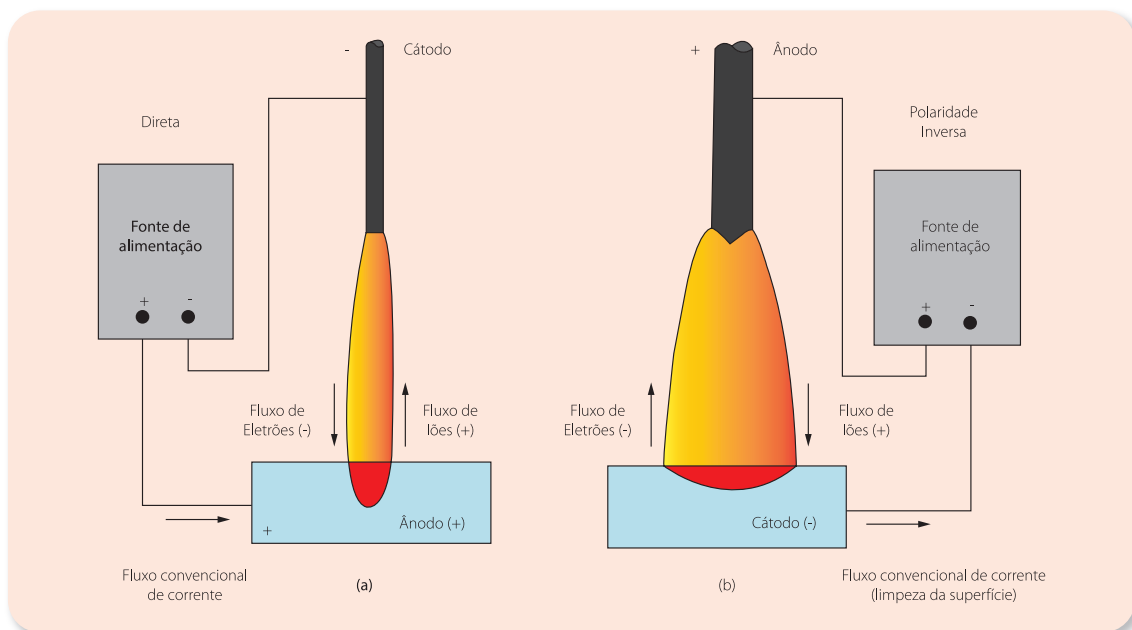


**Figura 5.13.** Geometria típica da secção transversal dos cordões efetuados pelo processo MIG-MAG com diferentes gases e misturas gasosas de proteção na soldadura topo-a-topo (LINCOLN ELECTRIC).



**Figura 5.14.** Geometria típica da secção transversal dos cordões efetuados pelo processo MIG-MAG com diferentes gases e misturas gasosas de proteção na soldadura de canto (LINCOLN ELECTRIC).





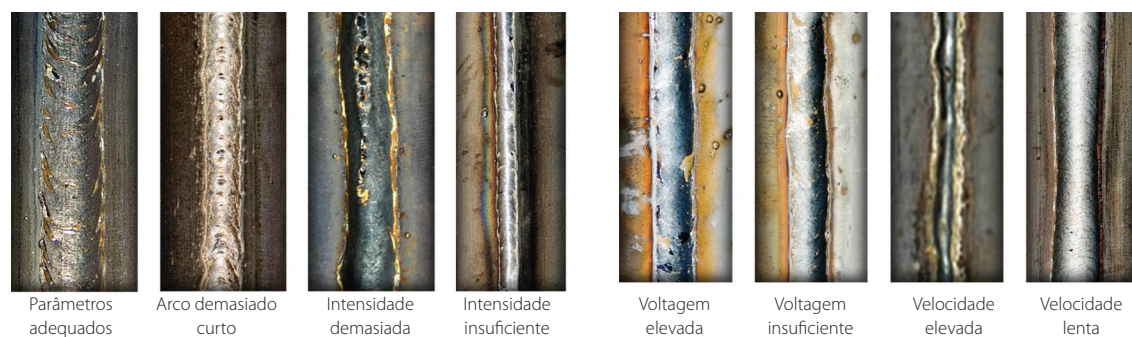
**Figura 5.30.** Diagrama esquemático do efeito de cada polaridade na geometria do cordão de soldadura no processo MIG-MAG.

Por outro lado, a polaridade direta origina uma transferência de material de adição e um cordão de soldadura mais irregulares e de menor qualidade. Deverá, no entanto, referir-se que o uso deste tipo de polaridade permite incrementar significativamente a taxa de fusão. Por vezes, são utilizadas misturas gasosas especiais para permitirem uma maior estabilização do arco, aliada às altas taxas de fusão proporcionadas.

A corrente alternada não é normalmente utilizada neste processo, devido ao facto de não permitir uma estabilização adequada do arco. A soldadura de alumínio constitui uma das exceções, embora seja possível soldar com corrente pulsada.

### 5.5.9. Resumo da influência dos parâmetros de soldadura

Seguidamente, e a título de resumo da influência dos parâmetros de soldadura no aspeto dos cordões gerados pelo processo MIG-MAG, são apresentadas algumas imagens que pretendem mostrar o efeito isolado dos desvios de cada um dos parâmetros mais importantes deste processo. Na Figura 5.31. poderá ver-se o aspeto do cordão de referência, executado com os parâmetros mais indicados, tendo em conta o tipo do material de base, espessura do mesmo e gás de proteção mais indicado. As restantes imagens reportam os respetivos desvios.



**Figura 5.31.** Influência do desvio isolado de determinados parâmetros no aspeto dos cordões de soldadura no processo MIG-MAG.

A soldadura com fios fluxados poderá dividir-se desde logo em dois grupos distintos:

- **Fios fluxados autoprotégidos**, nos quais a fusão, queima e vaporização de alguns elementos constituintes do fluxo asseguram a proteção total do arco elétrico e do banho de fusão, relativamente à contaminação pelo ar envolvente.
- **Fios fluxados com proteção gasosa adicional**, nos quais a fusão, queima e vaporização de alguns constituintes do fluxo garantem a quase totalidade da proteção do arco elétrico e do banho, mas é considerada insuficiente. Então, neste caso, acaba por ser necessário complementá-la com uma proteção gasosa exterior, adicional, a qual pode ser efetuada com  $\text{CO}_2$  ou misturas gasosas de He, Ar,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ ;

Este tipo de soldadura é também conhecido como soldadura semiautomática com fios fluxados, devido à sua semelhança com o processo MIG-MAG. No entanto, em grande parte dos casos, este processo foi totalmente automatizado.

## 6.1. Princípios do processo

No processo de soldadura por arco elétrico com fio fluxado é utilizado um fio tubular que contém um fluxo, na ponta do qual se estabelece o arco. O calor desenvolvido provoca a fusão do metal de adição do fio, do seu fluxo e do material de base, promovendo a criação do banho de soldadura necessário à ligação dos materiais. As principais vantagens associadas a este processo resultam da combinação dos seguintes fatores:

- Incremento da produtividade resultante da utilização de um fio contínuo (ausência de paragens para substituição do eletrodo);
- Utilização de maiores densidades de energia, as quais vão beneficiar a taxa de deposição e a penetração, reduzindo as possibilidades de ocorrência de defeitos de fusão;
- Possibilidade de correção da composição química do banho, pela adição de elementos de liga no fluxo contido no interior do fio/eléctrodo.

As figuras seguintes mostram, de forma esquemática, o princípio do processo, considerando a necessidade de proteção gasosa adicional e o fio autoprotégido.

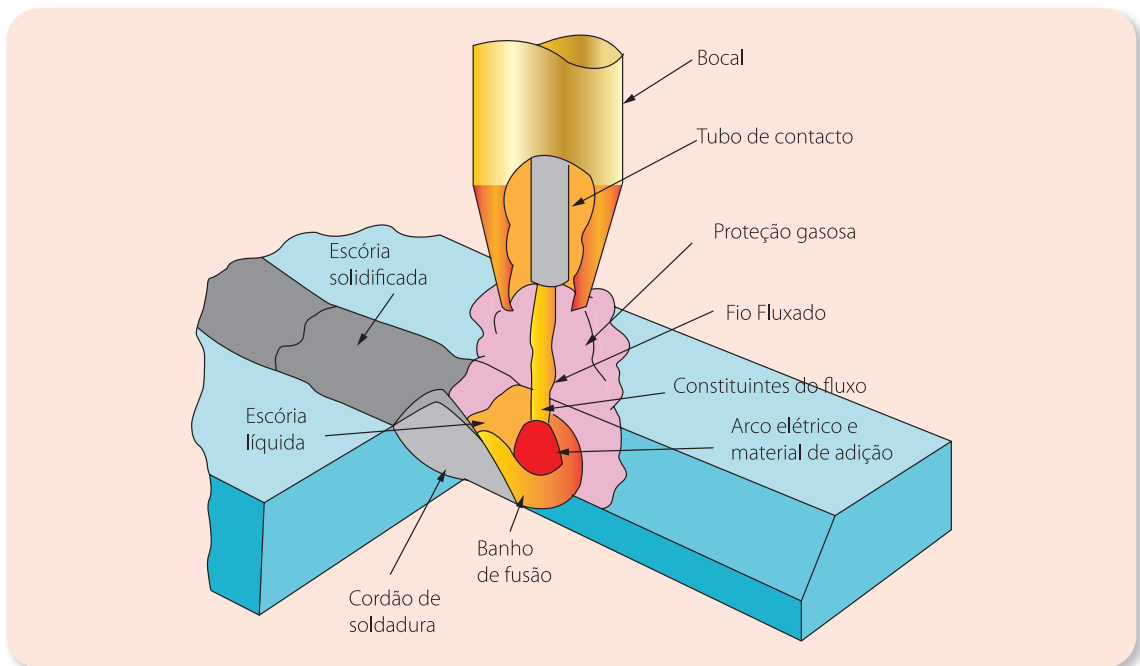


Figura 6.1. Representação esquemática da soldadura por arco elétrico com fio fluxado e proteção gasosa adicional (ESAB).

colidem com a superfície da peça, exercendo uma ação de limpeza, destruindo os filmes de Óxidos e removendo-os da zona da junta. O fluxo de elétrons que abandona a peça também contribui para o rompimento dos filmes de óxidos. Por estas razões, a polaridade inversa é a mais adequada em situações em que se torna necessário proceder a uma decapagem catódica como, por exemplo, na soldadura de Alumínio, Magnésio e suas ligas.

A decapagem catódica efetuada através de polaridade inversa traz, no entanto, os inconvenientes já referidos: fraca penetração e elevado aquecimento do elétrodo. A utilização de corrente alternada permite obter as mesmas vantagens da corrente contínua com polaridade inversa na decapagem catódica, sem apresentar os inconvenientes referidos: os filmes de óxidos são removidos durante a alternância positiva do ciclo, verificando-se um arrefecimento do elétrodo e uma melhoria significativa da penetração durante a metade negativa do ciclo.

Neste caso (AC), é utilizado apenas o Árgon como gás de proteção, já que o Hélio não proporciona a adequada ação de limpeza catódica.

Em relação à Polaridade Direta e Inversa, poderá assim afirmar-se que a utilização de Corrente Alternada produz cordões com uma geometria intermédia, conforme fica ilustrado na figura seguinte.

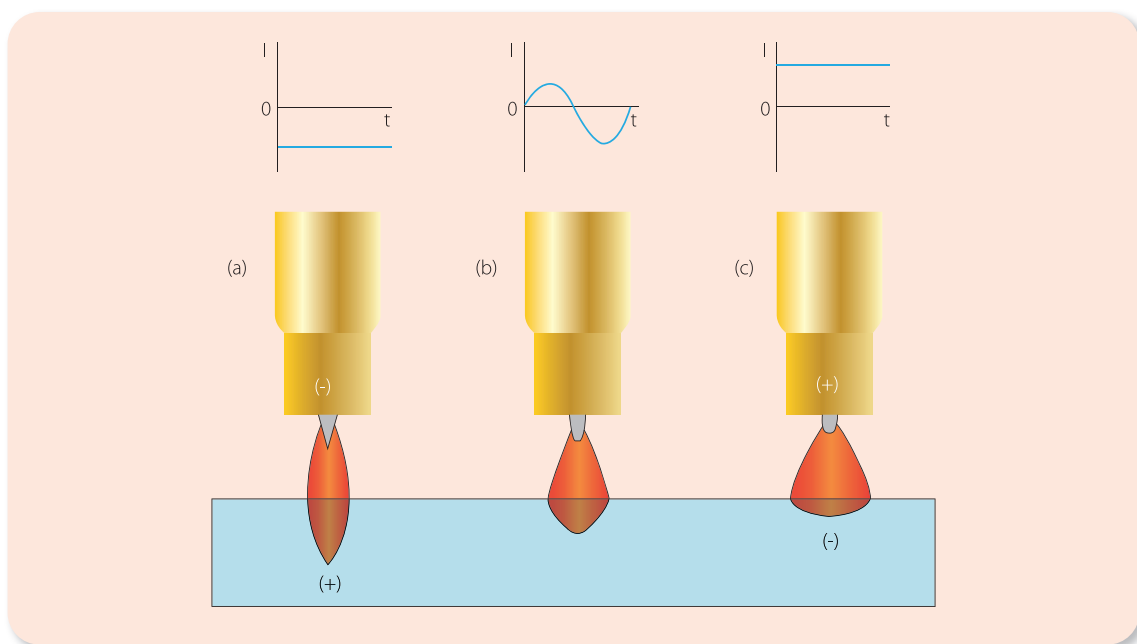


Figura 7.15. Efeito da polaridade e da Corrente Alternada na geometria dos cordões obtidos pelo processo TIG.

Tabela 7.4. Intervalos de intensidade de corrente admissíveis para cada tipo de corrente, tipo e diâmetro de elétrodo (Modenesi).

Diâmetro do Elétrodo (mm)	Intensidade de Corrente (A)			
	Corrente Alternada		Corrente Contínua	
	W	W + Th	W + Th (CC+)	W + Th (CC-)
0.5	--	--	5 – 35	--
1.0	10 – 40	15 – 60	30 – 100	--
1.6	30 – 70	60 – 100	70 – 150	10 – 20
2.4	70 – 100	100 – 160	150 – 225	15 – 30
3.2	100 – 150	140 – 220	200 – 275	25 – 40
4.0	150 – 225	200 – 275	250 – 350	40 – 55
4.8	200 – 300	250 – 400	300 – 500	55 – 90
6.4	275 - 400	300 - 500	400 - 650	80 - 125

Por outro lado, esta técnica apresenta também algumas limitações, conforme se descreve seguidamente:

- Os parâmetros envolvidos nesta técnica de soldadura por plasma são em maior número e de maior complexidade de regulação, pelo que não será de estranhar que a gama de parâmetros ideais para cada caso seja bastante reduzida;
- As competências dos operadores terão que ser francamente aperfeiçoadas, através de formação, principalmente na soldadura manual de espessuras mais generosas;
- Exceto para a soldadura de ligas de Alumínio, e apesar de ser passível de ser utilizada em qualquer posição, esta técnica é essencialmente utilizada na posição ao baixo;
- Deverão ser tomadas precauções adicionais com a manutenção da tocha, pois este é um equipamento crítico para uma boa operação com esta técnica de soldadura.

## 8.5. Eléttodos para a soldadura por plasma

Os eléctrodos utilizados neste processo de soldadura são em tudo idênticos aos usados no processo TIG, seguindo as mesmas composições e codificação de cores, segundo o especificado na norma AWS 5.12M de 2009.



**Figura 8.12.** Convenção de cores para os eléctrodos de Tungsténio usados no processo de soldadura por plasma (igual ao usado no TIG) ([www.tungsten-electrodo.net](http://www.tungsten-electrodo.net)).

## 8.6. Vantagens do processo de soldadura por plasma

De uma forma geral, poderemos afirmar que o processo de soldadura por plasma apresenta as seguintes vantagens:

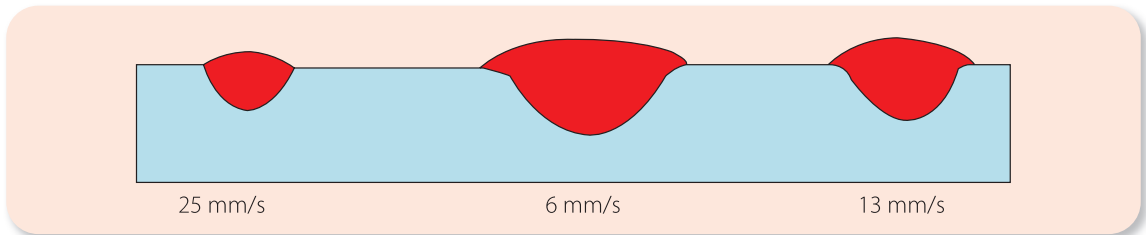
- Menor sensibilidade ao comprimento do arco;
- Maior vida útil do eléctrodo de Tungsténio, devido à posição recuada do eléctrodo;
- Riscos praticamente nulos de inclusões de Tungsténio na soldadura, pelo mesmo motivo;
- Poderá soldar até 6 mm de espessura numa única passagem (no modo *keyhole* poderá ir ainda mais longe), ou até cerca de 10 mm de espessura com duas passagens;

### 9.3.3. Velocidade de soldadura

A velocidade de soldadura é inversamente proporcional à secção do cordão. Maiores velocidades de soldadura reduzem a penetração e a largura do cordão. Com velocidades de soldadura elevadas deverão ser utilizadas voltagens no arco mais moderadas, por forma a diminuir o risco de ocorrência de desvios do arco elétrico.

Velocidades de soldadura excessivas aumentam a probabilidade de ocorrência de defeitos, tais como mordeduras, porosidades e forma irregular do cordão. No entanto, velocidades excessivamente lentas poderão provocar cordões suscetíveis à fissuração, grande quantidade de metal fundido (maior área do banho de fusão) e excessiva exposição do material de base e de adição a temperaturas elevadas.

De uma forma esquemática, poderemos observar na figura seguinte qual o efeito da velocidade de soldadura na secção transversal do cordão de soldadura, mantendo constantes os restantes parâmetros.



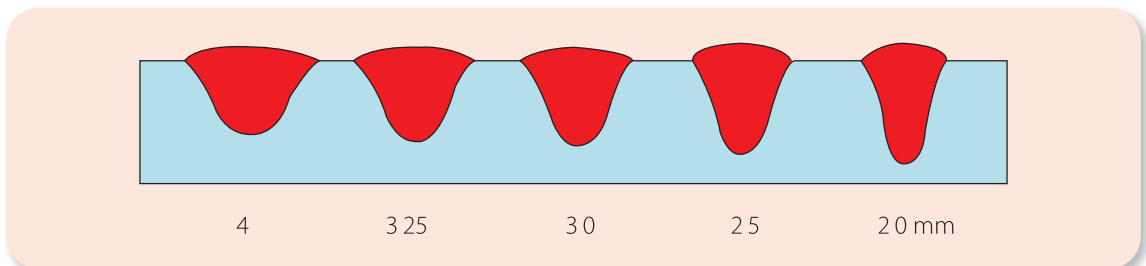
**Figura 9.14.** Representação esquemática do efeito da velocidade de soldadura na secção do cordão, mantendo fixos  $\varnothing_e=5.6$  mm,  $I=850$  A e  $V=34$  V, na soldadura de aço de baixa liga por arco submerso.

### 9.3.4. Diâmetro do eléctrodo

Para uma determinada intensidade de corrente, o diâmetro do eléctrodo influencia a forma do cordão de soldadura e a profundidade de penetração. Para essa mesma intensidade de corrente, aumentando o diâmetro do eléctrodo baixa-se a densidade de corrente (intensidade de corrente por unidade de área do eléctrodo), reduzindo assim a penetração e a estabilidade do arco. Considerando ainda uma mesma intensidade de corrente, um fio com um menor diâmetro e uma maior densidade de corrente irá permitir uma taxa de fusão mais elevada do que um eléctrodo de maior diâmetro.

O escorvamento torna-se mais fácil de realizar com eléctrodos de menor diâmetro.

Seguidamente poderá ver-se, de forma esquemática, como varia a secção do cordão com o diâmetro do fio-eléctrodo, mantendo constantes as restantes condições de soldadura.



**Figura 9.15.** Representação esquemática da forma como a secção do cordão varia em função do diâmetro do fio-eléctrodo usado na soldadura por arco submerso, mantendo os restantes parâmetros constantes.

### 9.3.5. Extremidade livre do eléctrodo

A extremidade livre do eléctrodo, também designada por extensão livre do eléctrodo, poderá assumir um papel relevante no processo de soldadura, principalmente para densidades de corrente superiores a  $125$  A/mm<sup>2</sup>. Um incremento da extremidade livre provoca um aumento do calor dissipado por efeito de Joule na extremidade do eléctrodo, aumentando

O ciclo de trabalho na soldadura por resistência/projeção é também diferente. Neste caso, será necessária a aplicação de dois níveis de pressão: um durante o primeiro ciclo, em que se verifica a passagem de corrente e a zona de soldadura é aquecida, e outro já depois de o material estar suficientemente quente, para proceder à junção da zona deformada com a zona em contacto da peça contrária, obrigando a que o material fundido se misture e dê lugar a um ponto de soldadura interno, o qual só terá reflexos para o exterior através da depressão originalmente provocada pela conformação plástica, sendo esta perfeitamente previsível e fiável em termos de dimensão e aspeto.

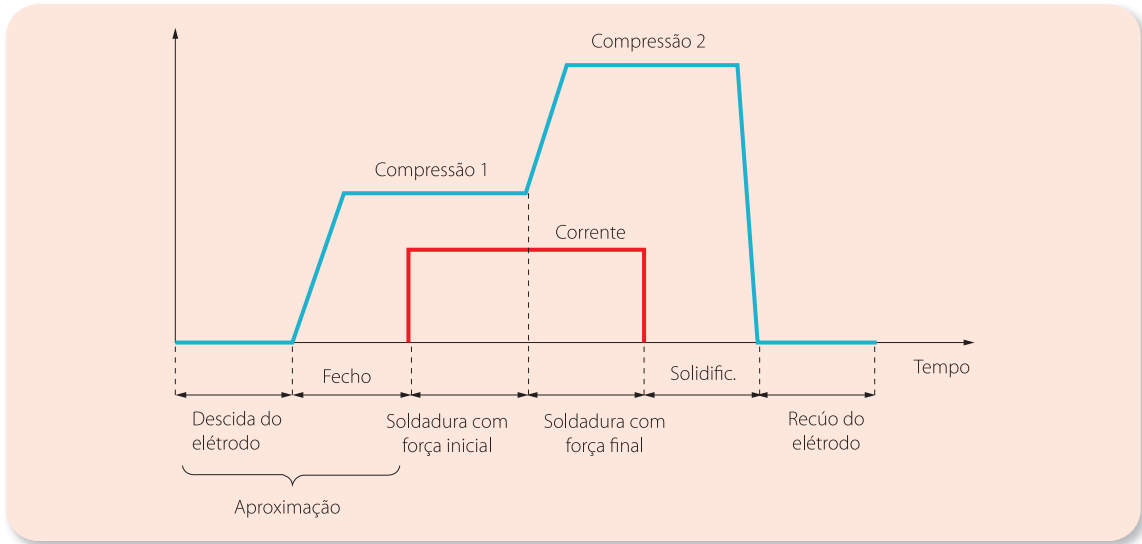


Figura 10.9. Ciclo próprio da soldadura por resistência/projeção.

O processo de soldadura poderá ainda ser seguido de algumas operações mais específicas:

- Têmpera para produzir soldaduras com resistência mecânica acrescida;
- Pós-aquecimento para refinamento do tamanho do grão.

No caso em que é executado um tratamento térmico para alívio de tensões, o diagrama da força e passagem de corrente poderá assumir outra configuração, nomeadamente a que é apresentada seguidamente.

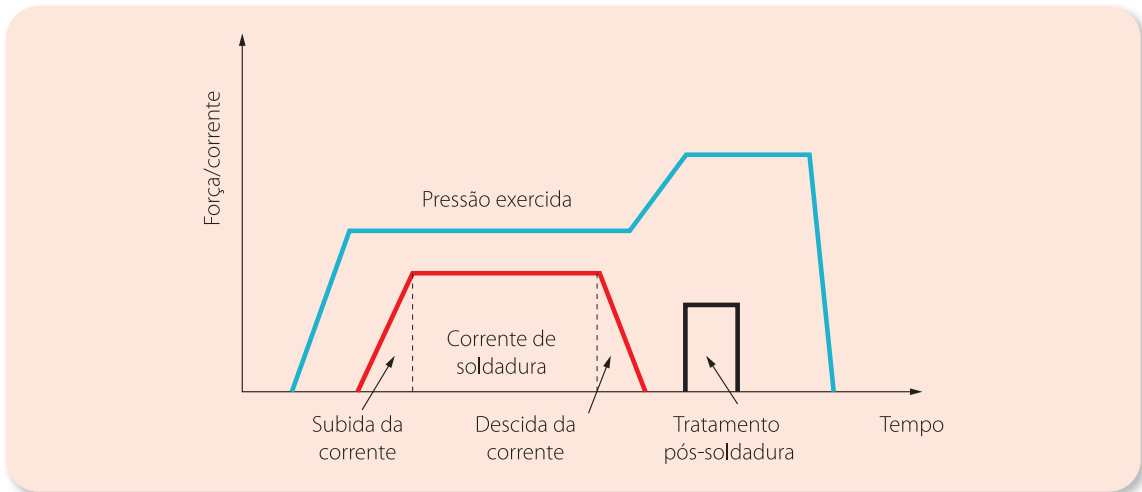
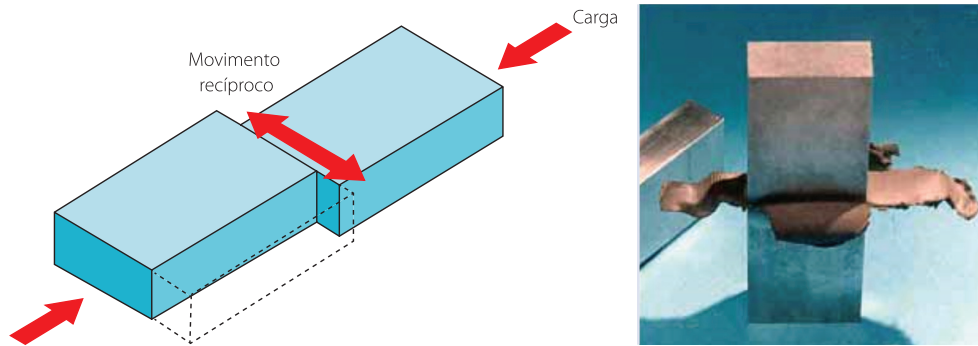


Figura 10.10. Diagrama Força/Corrente/Tempo para uma soldadura que inclui tratamento térmico durante o ciclo de trabalho.



**Figura 11.5.** Soldadura por fricção através de movimento de translação, em peças que não possuem formato de revolução (Fonte: TWI em 26.12.2013).

Este processo designa-se normalmente por Soldadura por Fricção Linear Recíproca. No entanto, uma terminologia idêntica é usada também para caracterizar outro tipo de soldadura por fricção, que será tratado adiante.

### 11.1.1. Parâmetros envolvidos na soldadura por fricção

Os principais parâmetros envolvidos na soldadura por fricção são a velocidade de rotação do pino, a pressão e a temperatura desenvolvida. Estes pontos serão tratados individualmente, em seguida.

#### 11.1.1.1. Velocidade de rotação

A velocidade de rotação é a responsável pela fricção entre as superfícies em contacto. Analisando os parâmetros na perspectiva da satisfação dos requisitos usualmente solicitados pelos clientes, conseguem-se obter juntas com elevada qualidade usando uma variada gama de velocidades de rotação, pelo que este parâmetro não poderá ser considerado como crítico para o sucesso da ligação. Para a soldadura de aços, a velocidade tangencial deverá situar-se em torno dos 1.3 m/s, tanto para peças cilíndricas sólidas, como para tubos. No entanto, os equipamentos projetados para este tipo de soldadura permitem normalmente velocidades de rotação compreendidas entre 350 e 600 rpm, o que, para veios entre 50 e 100 mm de diâmetro, poderá dar lugar a velocidades tangenciais entre 1.6 e 3.2 m/s. De referir que velocidades muito baixas originam elevados binários, o que provoca normalmente problemas nos mordentes de fixação das peças em movimento. No caso de aços temperáveis, poderemos ter simultaneamente elevadas velocidades de rotação e baixa transmissão de calor, com vista a aquecer mais gradualmente o aço e a minimizar o aparecimento de fissuras durante o arrefecimento. Já para certas juntas entre materiais dissimilares, deverá ser utilizada baixa rotação e elevada geração de calor, com vista a minimizar a formação de compostos intermetálicos frágeis. Na prática, o tempo de aquecimento acaba por ser balanceado com a pressão exercida no processo.

#### 11.1.1.2. Pressão

O intervalo de pressões efetivas aplicáveis no processo é bastante largo, tanto para o aquecimento como para o período de forjagem (ligação, através de força axial). A pressão controla o gradiente de temperatura na zona da soldadura, a potência necessária e o encurtamento axial desenvolvido. Como é óbvio, a pressão efetiva dependerá fortemente dos materiais envolvidos na soldadura e da geometria da mesma. A pressão efetiva deverá ser suficientemente elevada para forçar o perfeito contacto entre as superfícies pré-preparadas, evitando assim a formação de óxidos nessas superfícies. No caso do aço macio, a taxa de encurtamento axial é aproximadamente



Os *lasers* de fibra são bombardeados por díodos *laser* ou por outros *lasers* de fibra. Por outro lado, os *lasers* de fibra pulsados do tipo *Q-switched* são uma alternativa compacta e eletricamente mais eficiente, quando comparados com a tecnologia Nd:YAG. Este tipo de *laser* possui as vantagens de ter maior rendimento efetivo e de o feixe poder ser conduzido por uma fibra, em vez de espelhos. Assim, a flexibilidade obtida no processo é muito mais elevada.



Figura 13.3. Aspetto de um robô para soldadura *laser* por fibra ótica.

### 13.3. Características do processo de soldadura *laser*

A soldadura *laser* é levada a cabo normalmente sem metal de adição, necessitando que as peças a unir apresentem um distanciamento não superior a 15% da espessura do componente mais fino. Na indústria automóvel, é comum as peças a unir não poderem ultrapassar um afastamento superior a 0.2 mm entre si. As peças devem ser convenientemente limpas, já que a soldadura é muito rápida, não dando tempo para que os contaminantes possam ser queimados. Normalmente não é necessária proteção gasosa, podendo a maior parte das ligas ser soldadas ao ar. A exceção a esta regra é exigida pelos metais mais reativos, tais como o Titânio ou o Zircónio.

O calor transmitido às peças a soldar e a forma da secção reta do cordão de soldadura podem ser controlados através dos parâmetros de regulação do processo e pelos sistemas óticos, de forma a gerar o modo de condução, modo de penetração ou a soldadura do tipo *keyhole*. No modo de condução, o cordão de soldadura é bastante mais superficial e largo, sendo descuidada a penetração, ou seja, em tudo semelhante a um processo de soldadura MIG-MAG ou TIG.

Utilizando o modo de penetração, dá-se efetivamente ênfase à profundidade atingida pelo cordão, em detrimento da largura do mesmo. Neste modo, a transmissão de calor à junta é menor e mais concentrada, permitindo que um menor volume de material à superfície seja envolvido na soldadura, mas, em contrapartida, o calor cedido atua de forma eficaz na zona pretendida, fundindo em profundidade e provocando o efeito desejado.

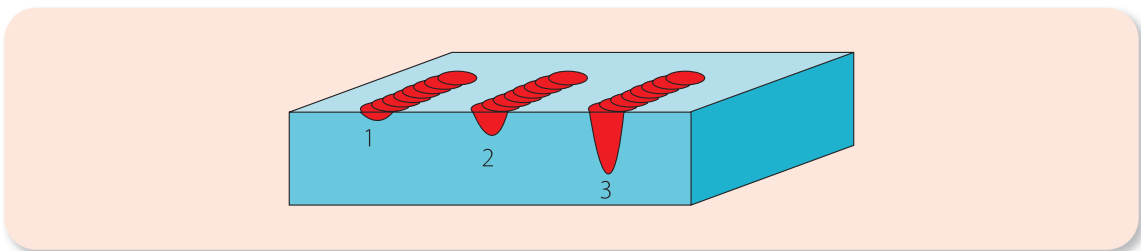


Figura 13.4. Diferentes modos de soldadura *laser*: (1) Condução, (2) Penetração e (3) *Keyhole*

(Fonte: Unitek Myiachi Corporation, Inc.).

## 17.2. Enquadramento normativo

As Normas BS EN ISO 6520-1: 2007 (soldaduras por fusão) e DIN 8524 classificam as imperfeições em 6 grupos, conforme descrito adiante. As normas não classificam as imperfeições de acordo com a origem, mas sim de acordo com a geometria e posição. Então, temos:

- Fissuras;
- Cavidades;
- Inclusões sólidas;
- Ausência de fusão e penetração;
- Imperfeições de forma e de dimensão;
- Imperfeições diversas.

## 17.3. Classificação principal dos defeitos

Para este texto, foi adotada uma classificação genérica dos defeitos, a qual os divide em dois grande grupos principais, tendo em atenção a sua origem. Assim, serão considerados:

- Defeitos geométricos: são imperfeições nas dimensões da ligação soldada, ou na forma dos cordões de soldadura, cuja gravidade irá depender essencialmente da aplicação;
- Defeitos intrínsecos: São descontinuidades na micro ou macroestrutura, na zona da soldadura. Normalmente, estes defeitos estão associados a falta de material ou à presença de material estranho à soldadura.

### 17.3.1. Defeitos geométricos

#### 17.3.1.1. Distorção e encurvadura

Estes tipos de defeitos estão normalmente associados a deformações que têm como origem um aquecimento exagerado das peças a soldar, devido à má regulação dos parâmetros de soldadura, técnica operatória usada durante a soldadura não ter sido a mais correta e/ou arrefecimento não cuidado da junta após soldadura.

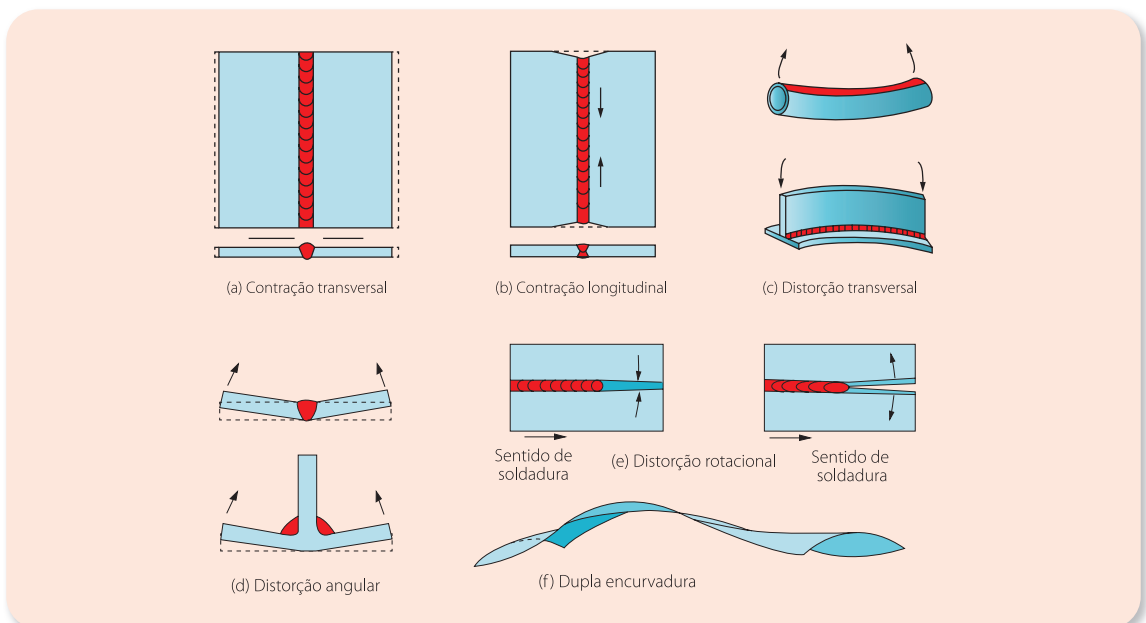
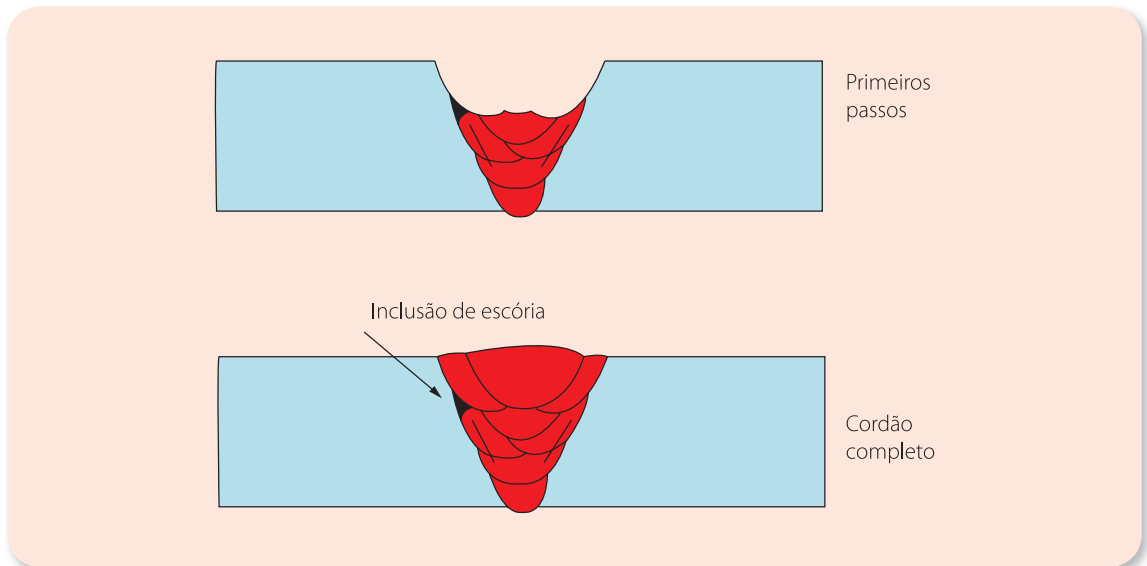


Figura 17.2. Principais defeitos geométricos (Fonte: kobelko-welding.jp, em 06.01.2014).

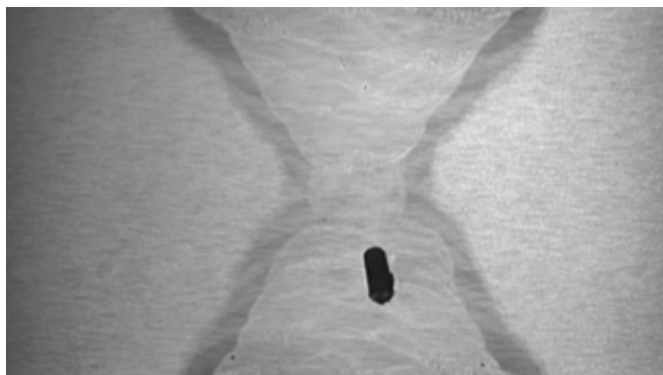
a junta durante e após a soldadura. Estão considerados neste grupo de processos a soldadura com elétrodo revestido, a soldadura com fios fluxados e a soldadura por arco submerso.



**Figura 17.36.** Diagrama esquemático do defeito de inclusão de escória (Fonte: Paulo Modenesi, 2001).

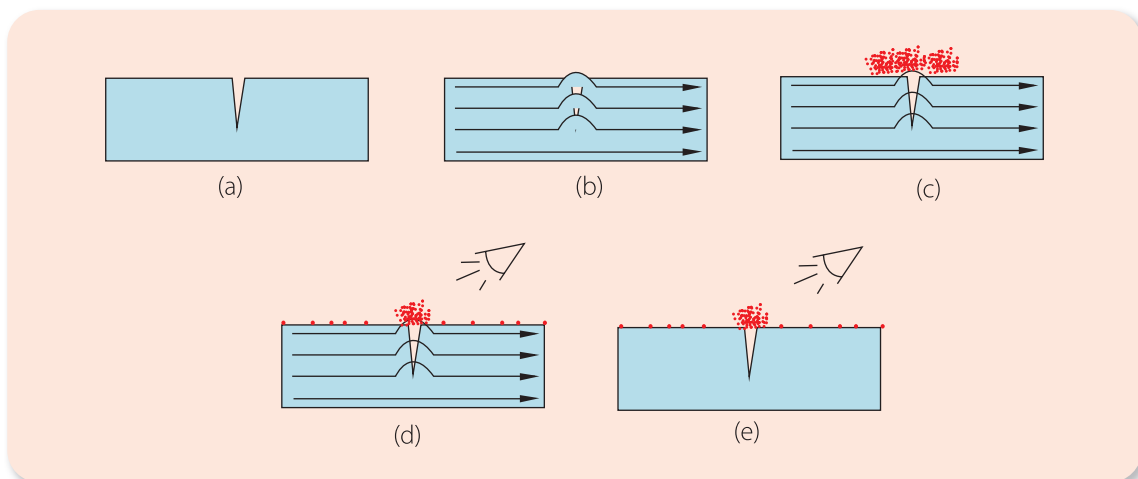
Na soldadura pelos processos referidos anteriormente acontecem reações no banho de fusão, originando produtos insolúveis no metal líquido que têm tendência a sobrenadar o banho de fusão, e que posteriormente se separam de forma relativamente fácil deste. No entanto, e principalmente na soldadura multipasse, se a limpeza entre passes não for cuidadosamente realizada, poderão ficar aprisionadas pequenas porções de escória, que não conseguem depois vir até à superfície do novo banho de fusão, e constituem uma heterogeneidade, a qual, por sua vez, irá promover um ponto de concentração de tensões, podendo originar a nucleação e progressão de fissuras, quando em serviço.

Na imagem seguinte poderá ser observada uma junta em corte, efetuada em várias passagens, e na qual está patente uma inclusão de escória (tonalidade escura).



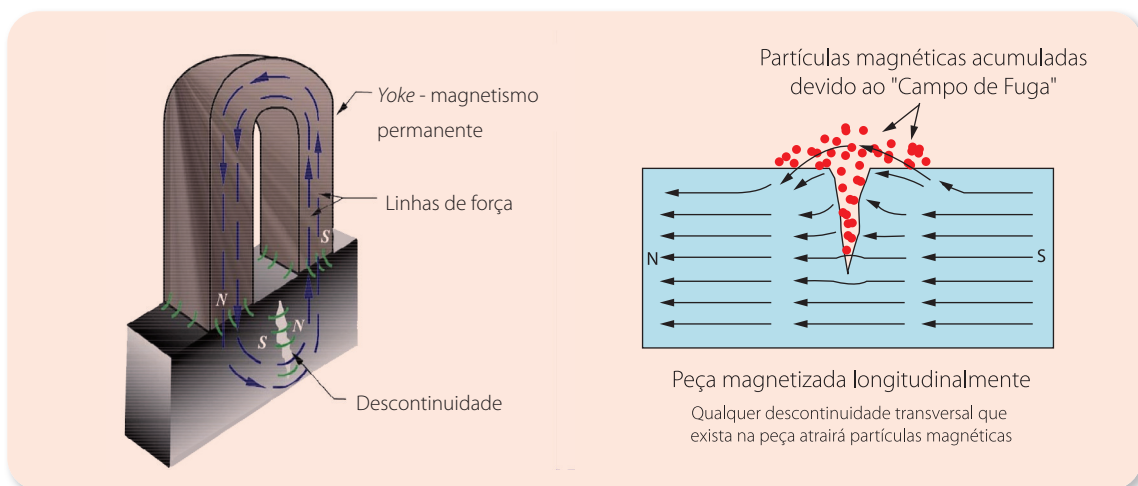
**Figura 17.37.** Inclusão de escória numa junta soldada, efetuada em diversas passagens, vista em corte (Adaptado de: twi.co.uk, em 11.01.2014).

As inclusões dependem, na sua maioria, de dois fatores extremamente importantes: perícia/atenção do soldador e projeto das juntas. Quando a manipulação do elétrodo é feita de forma incorreta, a escória flui para a frente do banho de fusão, aumentando drasticamente os riscos de a mesma vir a ficar retida, sem que consiga chegar à tona. Em geral,



**Figura 18.9.** Sequência de fases no processo de controle por magnetoscopia (Fonte: Paulo Modenesi).

Basicamente, temos uma peça que queremos analisar (a), onde será aplicado um campo magnético que atravessará a zona a controlar (b). Depois, são espalhadas partículas metálicas magnetizáveis sobre a superfície a controlar (c), usando via seca (partículas de pó, entre 5 e 170  $\mu\text{m}$ , possíveis de ser observadas à luz natural – mais utilizada para aplicações ao baixo) ou via húmida (derrame ou pulverização por *spray*, de água ou derivado do petróleo com partículas coloridas ou fluorescentes). Como as linhas do campo magnético são cortadas por qualquer descontinuidade superficial ou subsuperficial que exista, as partículas magnéticas vão ter tendência a aglomerar-se nos sítios onde existam essas descontinuidades, tentando compensar a falta de continuidade de transmissão do campo magnético oferecida pela peça, o que se vai traduzir numa aglomeração visível das partículas, denunciando assim a localização dos defeitos (d). Seguidamente, bastará retirar a ação do campo magnético e assinalar os locais onde se verificou a aglomeração das partículas, estabelecendo então os procedimentos de reparação necessários (e).



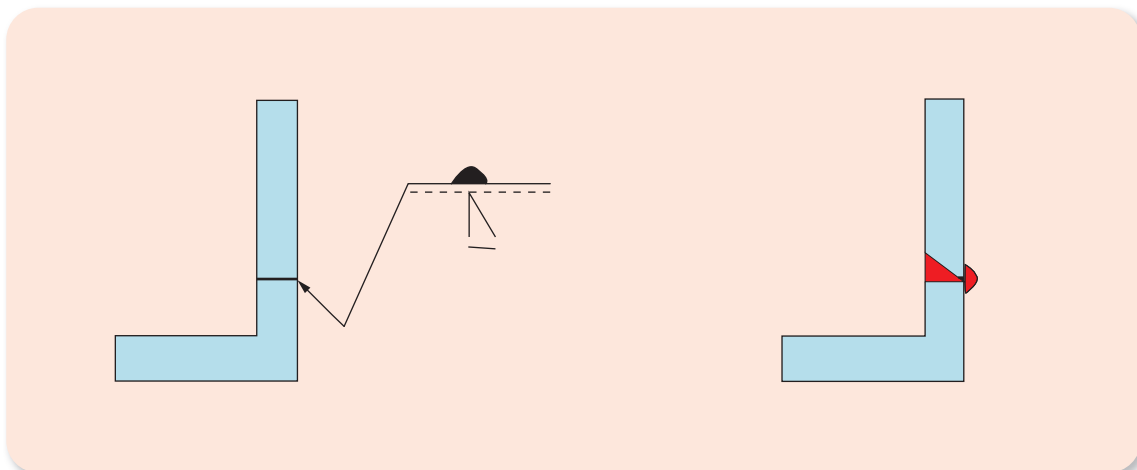
**Figura 18.10.** Princípio de aplicação do campo magnético e concentração de partículas em defeitos, através do processo de controle por magnetoscopia.

Este tipo de ensaio não destrutivo é regulado pela norma EN ISO 17638. Este ensaio poderá também ser aplicado em peças fundidas, mas reger-se-á por normas específicas.

A aplicação do campo magnético poderá ser realizada através de passagem de corrente elétrica (modo direto), ou através do campo gerado por uma bobina, normalmente designada por *Yoke* (modo indireto). A experiência do operador será fundamental, para fazer com que os defeitos possam ser atravessados da forma mais conveniente possível pelo campo magnético, melhorando as hipóteses de deteção mais fácil de qualquer descontinuidade existente.

## EXEMPLO 1

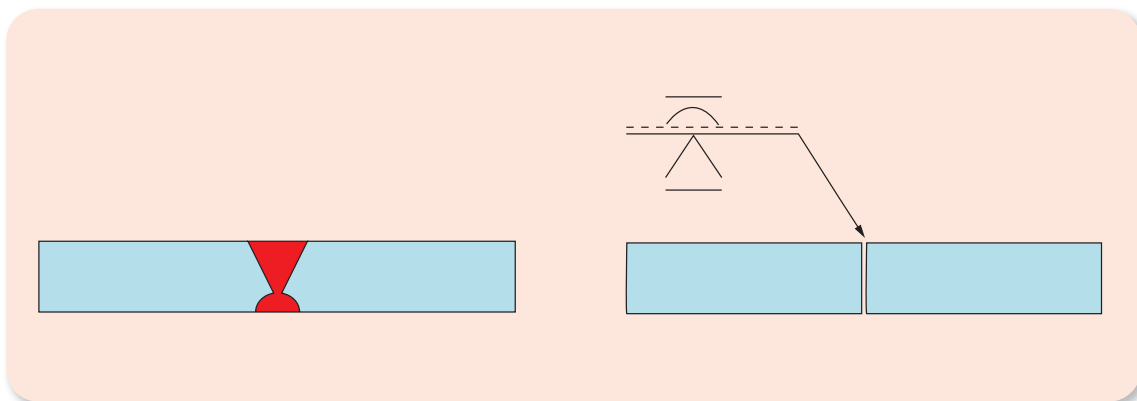
Considerando a norma ISO 2553 (DIN EN 22553), verificamos na figura do lado esquerdo a simbologia indicativa da soldadura que se pretende efetuar entre uma barra e uma cantoneira em "L". Trata-se de uma soldadura com preparação em "meio-V" pela parte interior da cantoneira e da barra, com geometria de face plana, e um passe de confirmação convexo pelo lado da raiz. De salientar que como a preparação é assimétrica, ou seja, em "meio-V", a seta deverá apontar para a peça que vai sofrer essa preparação, ou seja, neste caso será a barra. Na figura da direita vemos a representação da soldadura.



**Figura A.1.** Aspeto de uma junta soldada em que se pode ver a simbologia na figura da esquerda e o respetivo aspecto da secção em corte da junta soldada na figura da direita

## EXEMPLO 2

No exemplo seguinte, considerando a simbologia segundo a Norma ISO 2553 (DIN EN 22553), vemos na figura do lado esquerdo a representação do cordão indicado pela simbologia que consta na figura da direita. Basicamente, o que a figura da esquerda representa é um cordão com superfície plana e cuja preparação tinha sido efetuada em "V" pelo lado superior e com passe de confirmação com superfície plana no lado inferior. Observando a simbologia, podemos reparar que a linha a tracejado está por cima da linha a cheio da seta, o que nos indica que a simbologia do lado superior da linha diz respeito ao lado contrário àquele para onde aponta a seta. Então, a simbologia por baixo da linha a cheio indica aquilo que se deve produzir do lado para onde aponta a seta. Apenas mais um apontamento: a geometria da face do cordão é definida como reta pelas duas linhas paralelas às linhas a tracejado e a cheio da seta.



**Figura A.2.** Representação em corte do cordão produzido (à esquerda) e respetiva simbologia segundo a norma ISO 2553 (à direita).

## CASO DE ESTUDO Nº 1

O desafio proposto neste caso de estudo consiste em projetar um gabarito para produzir 500 peças segundo o desenho mostrado seguidamente.

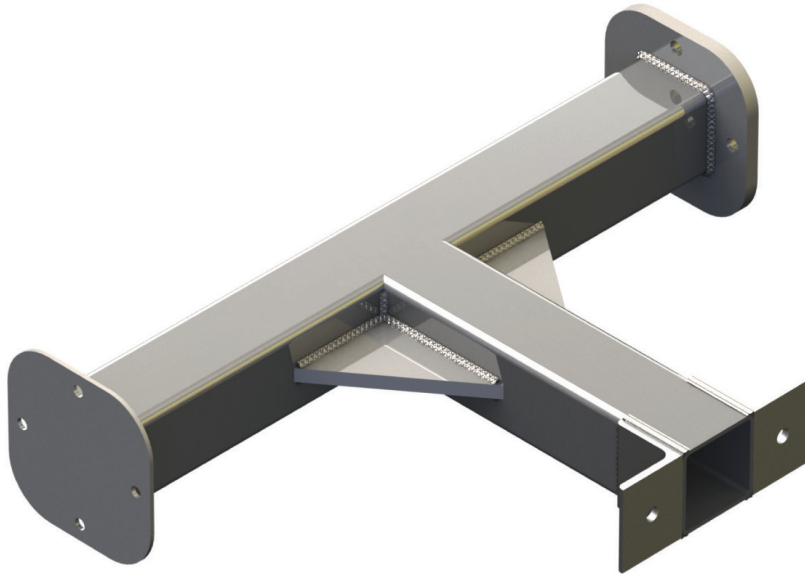


Figura B.1. Desenho 3D da peça que se pretende obter por soldadura.

Basicamente, a peça irá ser constituída por dois tubos quadrangulares, em que o menor deverá ser soldado no mesmo plano que o primeiro, a meio do seu comprimento. A este conjunto terão que ser soldados um reforço de cada lado, constituído por uma chapa espessa. Nas extremidades do tubo mais comprido, serão soldadas duas flanges, uma em cada extremidade, com espessuras diferentes. Na extremidade livre do tubo mais curto, serão soldadas duas cantoneiras em "L", uma de cada lado, no mesmo plano.

O material considerado será um aço S275JR.

Atendendo a que a quantidade a produzir se poderá considerar média no contexto nacional, será necessário produzir um gabarito que garanta reprodutibilidade e cujo preço possa ser amortizado na quantidade necessária, sem operações de manutenção e que, ao mesmo tempo, possa garantir a qualidade, não permitindo ao operário grau de liberdade para além daqueles que são estritamente necessários. O gabarito deverá permitir a fácil colocação dos componentes, assim como a fácil extração da peça já soldada, mesmo considerando possíveis empenos. Neste caso, deverão ser tidos os cuidados necessários para que não haja sobreaquecimento de algumas zonas e, caso isso seja inevitável, deverá ser considerada apenas a operação de pingagem dentro do gabarito e as operações de soldadura propriamente ditas já fora do gabarito e sem as restrições eventualmente causadas pelo mesmo.

Deverá ainda ser considerado que a empresa possui uma bancada de soldadura normalizada, a qual permitirá o acoplamento dos acessórios necessários à montagem de um gabarito modular, provido de poucas peças e que estas possam vir a poder ser utilizadas para outros fins, caso sejam compatíveis.

Na figura seguinte poderão ser observados os respetivos acessórios que são necessários para montar o gabarito, e que seriam produzidos especialmente para este fim, essencialmente por fresagem e electro-erosão (se necessário). A sua disposição irá permitir a rotação a 180° da peça, segundo o eixo do tubo mais comprido, após realizada a pingagem e soldadura de todos os componentes em uma das faces.

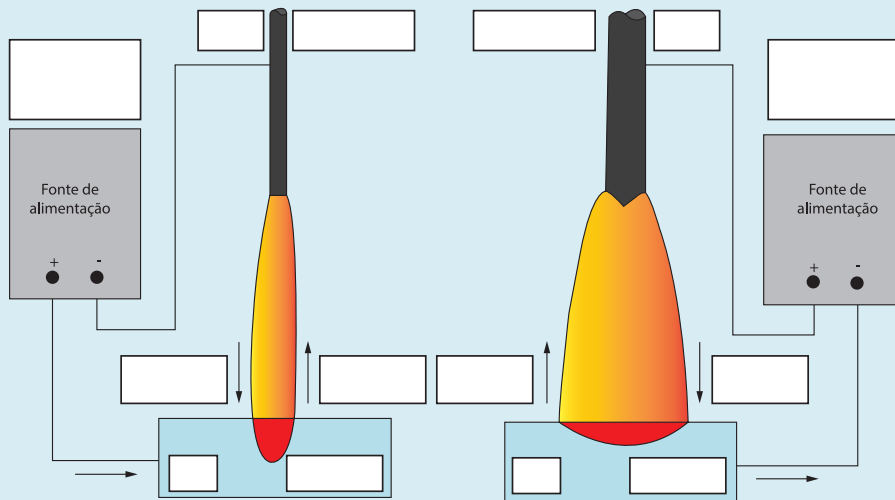
De referir que os desenhos seguintes visam permitir o acompanhamento da montagem e pingagem/soldadura dos diferentes componentes, sem pretender mostrar peças com elevado rigor mecânico e dimensional, que pudessem ser reproduzidas desta forma industrialmente.

## ARCO ELÉCTRICO

D.56. Coloque um "X" na opção **VERDADEIRO** ou **FALSO**, conforme entender que está mais correto.

Afirmção	Verdadeira	Falsa
Na soldadura por arco elétrico, a polaridade direta produz sempre maior penetração.		
Uma Cobre-Junta é sempre realizada em Cobre		
O Árgon é indispensável para obtermos o modo de transferência SPRAY no processo MIG		
Consigo maior penetração do cordão quando posiciono a tocha "a puxar"		
Um cordão de soldadura mais profundo (maior penetração), é obrigatoriamente mais fino		
A soldadura por RESISTÊNCIA limita a soldadura a juntas por sobreposição		
A soldadura por PLASMA evita que se verifiquem inclusões de Tungsténio		
A espessura da escória no processo por ARCO SUBMERSO é maior que no FIO FLUXADO		
A soldadura por ARCO SUBMERSO efetua-se preferencialmente na posição vertical		
A BRASAGEM implica que o material de base tenha baixo ponto de fusão		

D.57. Preencha as quadrículas brancas com as indicações necessárias à percepção do funcionamento do arco em cada um dos tipos de polaridade possíveis de usar em soldadura.



## ELÉTRODO REVESTIDO

D.58. No que toca a eléttodos revestidos, seleccione o melhor tipo para cada condição (só 1 opção).

Situação	Rutílico	Básico	Celulósico
Compram-se facilmente em grandes superfícies			
Revestimento formado maioritariamente por Óxido de Titânio			
Mais indicado para chanfros mais abertos e folgas mais generosas			
O melhor para soldar ao tecto			
O preferido para aplicações estruturais de elevada responsabilidade			
O mais difícil de escorvar e de manter estável o arco			
O que se utiliza principalmente para passes de raiz			
O que apresenta maior fluidez			
O que apresenta maior índice de "salpicos"			



# TECNOLOGIA DA SOLDADURA

UMA ABORDAGEM TÉCNICO-DIDÁTICA

Francisco J. G. Silva

**3ª** EDIÇÃO  
ATUALIZADA

## Sobre a obra

O presente livro pretende ser um guia didático sobre os principais processos de soldadura, focando aspetos tais como a nomenclatura e simbologia, processo de soldadura por eletrodo revestido, MIG-MAG, fio fluxado, TIG, plasma, arco submerso, soldadura laser, por feixe de eletrões, por fricção, por explosão, resistência, oxiacetilénica e brasagem. Para além disso, é realizada uma resenha dos principais defeitos que podem ser gerados por estes processos, assim como uma breve referência às técnicas de análise que podem ser utilizadas no controlo dos cordões de soldadura e na sua caracterização.

É uma obra essencialmente vocacionada para pessoas que necessitem adquirir conhecimentos técnicos na área da soldadura, de uma forma rápida e concisa, tais como alunos do ensino superior, alunos de cursos profissionais, técnicos industriais em início de carreira, ou que tenham mudado de área e necessitem dedicar-se pela primeira vez aos processos de soldadura, técnicos operacionais com curiosidade sobre a forma como devem utilizar cada processo e quais as suas possibilidades de aplicação, ou simplesmente curiosos pelo processo, que queiram dar os primeiros passos como autodidatas nesta matéria.

## Sobre o autor

Francisco J. G. Silva

Licenciado em Engenharia Mecânica no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), em 1992, quatro anos depois da finalização do Bacharelato em Engenharia Mecânica no mesmo Instituto Superior. Mestre em Engenharia Mecânica – Materiais e Processos de Fabrico, em 1997, e Doutor em Engenharia Mecânica, em 2002, graus obtidos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), possui ainda uma Especialização em Materiais e Processos de Fabrico (INEGI/FEUP), em 1990.

Atualmente, é Professor Coordenador com Agregação no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, onde exerce a sua atividade profissional desde dezembro de 1995. Foi diretor do Mestrado em Engenharia Mecânica do ISEP entre novembro de 2014 e maio de 2022, Diretor da Pós-Graduação em Maquinagem Avançada também no ISEP (edições de 2015 e 2016), Subdiretor do Departamento em Engenharia Mecânica (2014-2016), e Responsável do Grupo de Docentes de Materiais e Processos de Fabrico no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP (2014-2016). Foi ainda membro do Conselho Científico e do Conselho Pedagógico do ISEP entre 2020 e 2022.

Foi Diretor das Oficinas Mecânicas do ISEP durante 7 anos, e Diretor do Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP durante 2 anos. Entre 2002 e 2006, esteve alocado à ESEIG – Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão, do Instituto Politécnico do Porto (IPP), tendo sido o Coordenador da Licenciatura em Engenharia Mecânica nesse período e responsável por vários laboratórios (Caracterização de Materiais, Metrologia, Oficinas Mecânicas e Oficina Automóvel), assim como membro do Conselho Científico e Conselho Pedagógico. Foi ainda membro do Conselho Geral do IPP.

Atualmente, desenvolve atividade de investigação através de trabalhos de caracterização de materiais para multinacionais instaladas em Portugal, através do CIDEM-ISEP, para o desenvolvimento de novos sistemas produtivos, novos dispositivos mecânicos, desenvolvimento de processos de fabrico, melhoria de processos, caracterização de materiais, desenvolvimento de produtos ou outros.

Já orientou mais de 200 alunos de Mestrado e de Doutoramento. É membro do comité editorial de vários jornais científicos indexados à SCOPUS e CLARIVATE ANALYTICS. Foi revisor de mais de 600 artigos científicos para os mais diversos jornais. É correntemente avaliador de projetos científicos europeus.

Na indústria, foi Diretor do Planeamento da Produção na SUNVIAUTO, S.A. e Diretor do Planeamento e Controlo da Produção na FELINO, S.A. Para além disso, foi ainda fundador e proprietário de uma empresa ligada ao fabrico de componentes elétricos durante 18 anos.

Apoio

**Gislótica**

Também disponível em formato e-book

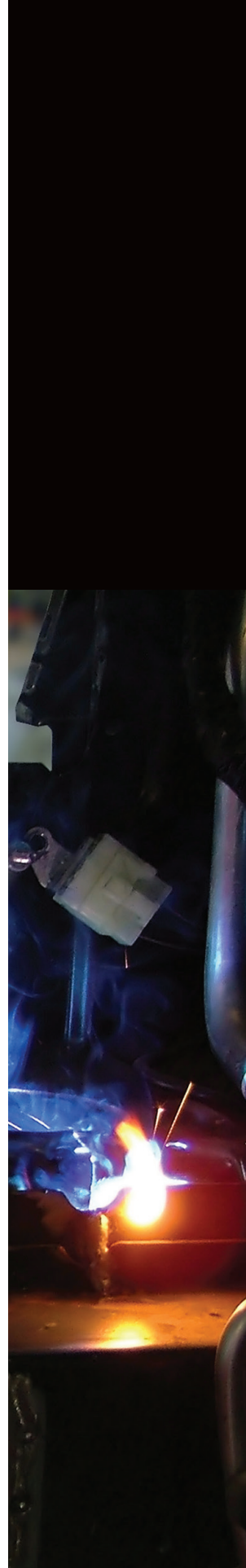


ISBN: 978-989-910-128-9



9 789899 101289

[www.engebook.pt](http://www.engebook.pt)



**engebeck**