

2ª EDIÇÃO

Revista e
Ampliada

Francisco J. G. Silva

TECNOLOGIA DA **SOLDADURA**

UMA ABORDAGEM TÉCNICO-DIDÁTICA



ÍNDICE

Lista de Símbolos e de Abreviaturas	XXV
1. INTRODUÇÃO À SOLDADURA	3
1.1. Introdução aos Processos de Ligação	5
1.2. A Soldadura	6
1.3. Classificação dos Processos de Soldadura	7
1.4. Nomenclatura usada na soldadura	10
QUESTÕES	18
2. PREPARAÇÃO E CODIFICAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS	19
2.1. Preparação de Juntas Soldadas	21
2.1.1. Execução dos chanfros	21
2.1.2. Limpeza	23
2.2. Simbologia de Soldadura	23
2.2.1. Simbologia segundo a norma ISO 2553	24
2.2.2. Simbologia segundo a norma AWS a2.4	29
2.3. Sistemas de Apoio à Soldadura	33
QUESTÕES	43
3. SOLDADURA POR ARCO ELÉTRICO	45
3.1. Física do Arco Elétrico	46
3.2. Fatores externos que afetam a qualidade do arco	53
3.3. Particulares de cada processo relativamente ao arco	54
3.4. Máquinas para Soldadura por Arco	54
3.4.1. Conceção das fontes de alimentação para soldadura	54
3.4.2. Principais parâmetros que caracterizam as fontes de alimentação	61
3.4.3. Curvas características	63
3.4.4. Seleção da fonte de energia elétrica a utilizar	66
3.4.5. Cuidados a ter com as fontes de alimentação	67
QUESTÕES	68
4. SOLDADURA POR ELÉTRODO REVESTIDO	71
4.1. Características do processo	72
4.2. Os elétrodos revestidos	72
4.3. Funções do revestimento do eléctrodo	73
4.3.1. Funções elétricas	74
4.3.2. Funções metalúrgicas	74
4.3.3. Funções físicas e mecânicas	75
4.3.4. Funções operatórias	75
4.3.5. Tipos de revestimento de elétrodos	75
4.3.5.1. Elétrodos com revestimento rutílico	75
4.3.5.2. Elétrodos com revestimento celulósico	76
4.3.5.3. Elétrodos com revestimento básico	76
4.3.5.4. Elétrodos de alto rendimento	77
4.3.6. Codificação AWS dos elétrodos	78
4.3.7. Cuidados a observar na utilização dos elétrodos	80

4.3.8. Equipamentos e acessórios necessários à soldadura com eletrodo revestido	80
4.3.9. Parâmetros de soldadura	81
4.3.9.1. Tipo do eletrodo	81
4.3.9.2. Diâmetro do eletrodo	82
4.3.9.3. Tipo e intensidade da corrente elétrica	82
4.3.9.4. Comprimento do arco	85
4.3.9.5. Velocidade de soldadura	86
4.3.9.6. Manipulação e orientação do eletrodo	86
4.4. O fenômeno de Sopros Magnéticos com eletrodo revestido	88
4.5. Breves considerações sobre a técnica operatória	89
4.5.1. Escorvamento, manutenção e fecho do arco	89
4.5.2. Pingagem	89
4.5.3. Dificuldades sentidas na soldadura por arco elétrico com eletrodo revestido	89
4.6. Aplicações	90
QUESTÕES	91
5. SOLDADURA SEMIAUTOMÁTICA (MIG-MAG)	93
5.1. Princípios do processo	95
5.2. Equipamento característico e operação no processo MIG-MAG	96
5.3. Gases e misturas gasosas de proteção na soldadura pelo processo MIG-MAG	102
5.3.1. Gases inertes para MIG	103
5.3.2. Gases reativos para MAG	103
5.3.3. Misturas gasosas	104
5.4. Modos de transferência do metal de adição no processo MIG-MAG	108
5.4.1. Transferência tipo curto-circuito	109
5.4.2. Transferência tipo globular	111
5.4.3. Transferência <i>Spray</i>	112
5.4.4. Modo tipo Pulsado	112
5.5. Parâmetros do processo	115
5.5.1. Intensidade de corrente	116
5.5.2. Tensão e comprimento do arco	116
5.5.3. Velocidade de soldadura	118
5.5.4. Extensão livre do eletrodo	118
5.5.5. Posição da tocha	119
5.5.6. Diâmetro do eletrodo	120
5.5.7. Gás de proteção	121
5.5.8. Polaridade	121
5.5.9. Resumo da influência dos parâmetros de soldadura	122
5.6. Codificação dos fios sólidos para a soldadura MIG-MAG	123
5.7. Aplicações	124
QUESTÕES	127
6. SOLDADURA COM FIO FLUXADO	129
6.1. Princípios do processo	132
6.2. Equipamento próprio do sistema de soldadura com fios fluxados	133
6.3. Parâmetros do processo	134
6.3.1. Intensidade de corrente na soldadura com fio fluxado	135
6.3.2. Diferença de potencial na soldadura com fio fluxado	135
6.3.3. Polaridade	135
6.3.4. Gás de proteção na soldadura com fio fluxado e atmosfera protetora adicional	136

6.3.4.1. Dióxido de Carbono (CO ₂)	136
6.3.4.2. Misturas Árgon/Dióxido de Carbono	137
6.4. Modos de transferência no processo de soldadura com fio fluxado	138
6.5. Os fios fluxados	138
6.5.1. Processo de fabrico do fio fluxado	139
6.5.2. Funções dos componentes dos fios consumíveis	140
6.5.3. Composição do fluxo	140
6.5.3.1. Fluxos rútilicos	140
6.5.3.2. Fluxos básicos	141
6.5.3.3. Arames tubulares autoprotégidos	142
6.5.3.4. Arames tubulares metálicos	143
6.5.3.5. Resumo das principais características dos arames tubulares	144
6.6. Classificação dos fios fluxados	144
6.7. Vantagens do uso de fios fluxados	144
6.8. Desvantagens do uso da soldadura com fios fluxados	145
6.9. Aplicações do processo de soldadura com fio fluxado	145
QUESTÕES	146
7. SOLDADURA TIG	147
7.1. Princípio do processo	149
7.2. Equipamento necessário à soldadura pelo processo TIG	150
7.3. Os eléctrodos de Tungsténio	154
7.3.1. Elérodos de Tungsténio puro	155
7.3.2. Elérodos de Tungsténio com adições de Tório	155
7.3.3. Elérodos de Tungsténio com adições de Cério	155
7.3.4. Elérodos de Tungsténio com adições de Lantânio	155
7.3.5. Elérodos de Tungsténio com adições de Zircónio	156
7.4. Material de adição no processo TIG	159
7.5. Gases de protecção no processo TIG	160
7.6. Parâmetros de soldadura	161
7.6.1. Tipo de corrente	161
7.6.1.1. Polaridade directa (Elédrodo ligado ao negativo)	161
7.6.1.2. Polaridade inversa (Elédrodo ligado ao positivo)	161
7.6.1.3. Corrente alternada	161
7.7. Tensão no arco	164
7.7.1. Tensão no arco	164
7.7.2. Velocidade de soldadura	164
7.7.3. Geometria da extremidade do eléctrodo	164
7.7.4. Velocidade de alimentação do fio no TIG Mecanizado	165
7.8. Técnica operatória	165
7.9. Vantagens e limitações do processo	166
7.10. Soldadura TIG através do método <i>Keyhole</i>	167
7.11. Soldadura por pontos através do processo TIG	168
7.12. Aplicações do processo TIG	170
QUESTÕES	171
8. SOLDADURA POR PLASMA	173
8.1. Princípio do processo de soldadura por Plasma	175
8.2. Especificidades e parâmetros envolvidos no processo de soldadura por plasma	176
8.2.1. Escorvamento do arco na soldadura por plasma	176

8.2.2. Tipos de arco.....	177
8.2.3. Comprimento do arco.....	177
8.2.4. Tipo de corrente e polaridade utilizadas no processo plasma.....	177
8.2.5. Regulações usuais de parâmetros.....	179
8.3. Equipamento.....	180
8.3.1. Fonte de alimentação.....	181
8.3.2. Tochas.....	181
8.4. Modo de operação.....	183
8.4.1. Técnica <i>Keyhole</i>	183
8.5. Eléttodos para a soldadura por plasma.....	186
8.6. Vantagens do processo de soldadura por plasma.....	186
8.7. Aplicações da soldadura por plasma.....	187
QUESTÕES.....	188
9. SOLDADURA POR ARCO SUBMERSO.....	189
9.1. Princípio do processo de soldadura por arco submerso.....	191
9.2. Equipamento necessário ao processo.....	194
9.3. Parâmetros do processo.....	195
9.3.1. Intensidade da corrente de soldadura.....	195
9.3.2. Tensão de soldadura.....	197
9.3.3. Velocidade de soldadura.....	198
9.3.4. Diâmetro do eléctrodo.....	198
9.3.5. Extremidade livre do eléctrodo.....	198
9.3.6. Polaridade do eléctrodo.....	199
9.4. Tipo e quantidade de fluxo granulado.....	199
9.5. Posição da tocha.....	201
9.6. Vantagens e limitações do processo de soldadura por arco submerso.....	202
9.7. Aplicações.....	202
QUESTÕES.....	204
10. SOLDADURA POR RESISTÊNCIA.....	205
10.1. Princípio do processo.....	207
10.2. Técnica operatória.....	208
10.3. Equipamento necessário à soldadura por resistência.....	213
10.4. Parâmetros de soldadura.....	215
10.4.1. Resistência eléctrica.....	215
10.4.2. Intensidade de corrente que atravessa a junta.....	216
10.4.3. Tempo de soldadura.....	216
10.4.4. Força de aperto dos eléctrodos.....	216
10.4.5. Material, forma e estado dos eléctrodos.....	217
10.4.6. Estado superficial das peças a soldar.....	217
10.4.7. Algumas indicações práticas sobre a regulação de parâmetros.....	218
10.4.8. Composição química dos materiais a soldar.....	220
10.5. Soldabilidade de diferentes materiais pelo processo de soldadura por resistência.....	220
10.6. Juntas especiais na soldadura por resistência.....	221
10.7. Estudo da qualidade das soldaduras efetuadas por resistência.....	222
10.8. Problemas resultantes do processo de soldadura por resistência.....	222
10.9. Testes efetuados a juntas soldadas por resistência/pontos.....	223
10.10. Aplicações.....	223
QUESTÕES.....	226

11. SOLDADURA POR FRICÇÃO	227
11.1. Princípio do processo de soldadura por fricção convencional	229
11.1.1. Parâmetros envolvidos na soldadura por fricção	232
11.1.1.1. Velocidade de rotação	232
11.1.1.2. Pressão	232
11.1.1.3. Tempo de aquecimento	233
11.1.2. Vantagens e desvantagens deste processo	233
11.1.3. Equipamentos para a soldadura por fricção	234
11.1.4. Aplicações da soldadura por fricção	235
11.2. Princípio do processo de soldadura por fricção linear (<i>Friction Stir Welding</i>)	237
11.2.1. Ferramentas necessárias ao processo	237
11.2.2. Vantagens e desvantagens do processo	239
QUESTÕES	240
12. SOLDADURA POR EXPLOSÃO	241
12.1. Princípio do processo de soldadura por explosão	243
12.2. Parâmetros relacionados com a soldadura por explosão	245
12.3. Vantagens e limitações da soldadura por explosão	245
12.4. Aplicações da soldadura por explosão	246
QUESTÕES	247
13. SOLDADURA POR LASER	249
13.1. Princípio de geração do feixe laser	251
13.2. Tipos de laser usados em soldadura	252
13.2.1. Laser CO ₂	252
13.2.2. Laser Nd:YAG	253
13.2.3. Lasers de Fibra Ótica	253
13.3. Características do processo de soldadura laser	254
13.4. Parâmetros principais de operação na soldadura laser	255
13.5. Vantagens e limitações da soldadura laser	256
13.6. Aplicações	258
QUESTÕES	260
14. SOLDADURA POR FEIXE DE ELETRÕES	261
14.1. Princípio do processo	263
14.2. Variantes do processo de soldadura por feixe de eletrões	264
14.3. Equipamento de soldadura por feixe de eletrões	265
14.4. Vantagens e limitações do processo de soldadura por feixe de eletrões	266
14.5. Áreas de aplicação da soldadura por feixe de eletrões	268
QUESTÕES	270
15. SOLDADURA OXIACETILÉNICA	271
15.1. Soldadura tendo o gás como fonte de calor	273
15.2. Soldadura Oxiacetilénica	276
15.2.1. Princípio do processo de soldadura oxiacetilénica	276
15.2.2. O Acetileno e o Oxigénio	277
15.2.3. Equipamento necessário	278
15.2.4. Parâmetros associados ao processo de soldadura oxiacetilénica	279
15.2.5. Técnica operatória	280
15.2.6. Vantagens apresentadas pela soldadura oxiacetilénica	280

15.2.7. Aplicações	281
QUESTÕES	282
16. BRASAGEM	283
16.1. Princípio do processo	286
16.2. Formas de aquecimento	288
16.2.1. Ferro de soldar	289
16.2.2. Maçarico	289
16.2.3. Fornos	290
16.2.4. Indução/Alta-frequência	291
16.2.5. Feixe Laser	292
16.2.6. Resistência	292
16.3. Materiais de adição	292
16.3.1. Decapantes/Fluxos	293
16.4. Processo operatório	293
16.5. Soldobrasagem	294
16.6. Aplicações	295
QUESTÕES	296
17. DEFEITOS DE SOLDADURA	297
17.1. Breve resumo sobre as causas dos defeitos	299
17.2. Enquadramento normativo	300
17.3. Classificação principal dos defeitos	300
17.3.1. Defeitos geométricos	300
17.3.1.1. Distorção e encurvadura	300
17.3.1.2. Excesso de material	303
17.3.1.3. Sobreposição	305
17.3.1.4. Desalinhamento	305
17.3.1.5. Falta de preenchimento	307
17.3.1.6. Falta de penetração na raiz	308
17.3.1.7. Excesso de penetração na raiz	310
17.3.1.8. Convexidade excessiva	311
17.3.1.9. Concavidade excessiva	312
17.3.1.10. Cordão assimétrico	313
17.3.2. Defeitos intrínsecos	314
17.3.2.1. Salpicos/Projeções	314
17.3.2.2. Mordeduras e Bordos queimados	315
17.3.2.3. Inclusões de escória	317
17.3.2.4. Inclusões de Tungstênio	319
17.3.2.5. Porosidade	320
17.3.2.5.1. Ninhos de poros	322
17.3.2.5.2. Porosidade alinhada no centro do cordão	322
17.3.2.5.3. Porosidade uniformemente distribuída	323
17.3.2.6. Falta de fusão	324
17.3.2.7. Fissuração	325
17.3.2.7.1. Fissuração a quente	326
17.3.2.7.2. Fissuração a frio	327
QUESTÕES	331

18. CONTROLO DE DEFEITOS EM SOLDADURA	333
18.1. Controlo de juntas através de ensaios destrutivos	336
18.1.1. Análise metalográfica	336
18.1.2. Ensaio de Tração	336
18.1.3. Ensaio de Dureza	337
18.1.4. Ensaio de Impacto	337
18.1.5. Ensaio de Dobragem	337
18.1.6. Outros ensaios destrutivos	338
18.2. Controlo de juntas através de ensaios não destrutivos	339
18.2.1. Inspeção visual	339
18.2.2. Líquidos penetrantes	341
18.2.3. Magnetoscopia	342
18.2.4. Ultrassons	345
18.2.5. Raios-X	350
QUESTÕES	354
APÊNDICE A – EXEMPLOS COMPLEMENTARES DE SIMBOLOGIA UTILIZADA EM SOLDADURA	355
APÊNDICE B – CASOS DE ESTUDO SOBRE GABARITOS DE SOLDADURA	363
APÊNDICE C – QUESTÕES	387
APÊNDICE D – DIAGRAMA DE POSIÇÕES DE SOLDADURA	401
BIBLIOGRAFIA	403

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diversos tipos de união: (a) aparafusamento, (b) rebiteagem, (c) montagem rápida, (d) conformação plástica e (e) soldadura.....	6
Figura 2 - Bicicleta cujo quadro é fabricado em construção soldada.....	7
Figura 3 - Estrutura metálica, contendo construção soldada, nas estruturas do Aeroporto Francisco de Sá Carneiro (Porto).....	7
Figura 4 - “Chopper” onde os americanos tentam ir à perfeição, em termos de soldaduras e <i>design</i>	7
Figura 5 - Conceito de material de base e material de adição.....	10
Figura 6 - Representação esquemática de uma junta soldada e respetiva nomenclatura.....	10
Figura 7 - Representação esquemática de uma junta soldada com ângulos de bisel diferentes (Soldadura MIG-MAG em chapas de Aço com 16 mm de espessura e fio de material de adição de 1.6 mm de diâmetro).....	11
Figura 8 - Nomenclatura usada na definição geométrica dos cordões de soldadura.....	12
Figura 9 - Representação esquemática e nomenclatura referente a alguns dos tipos mais comuns de junta de soldadura.....	13
Figura 10 - Nomenclatura usada nas juntas mais correntes (Adaptado de www.substech.com).....	14
Figura 11 - Representação esquemática e respetiva nomenclatura de algumas juntas em soldadura.....	14
Figura 12 - Representação esquemática das principais posições de soldadura.....	15
Figura 13 - Exemplo das condições de operação na realização de uma junta na posição ao teto.....	16
Figura 14 - Nomenclatura relacionada com a geometria dos cordões de soldadura (Fonte: Modenesi).....	16
Figura 15 - Nomenclatura respeitante à penetração do cordão de soldadura no material de base (Fonte: Modenesi).....	17
Figura 16 - Algumas configurações para o tipo de preparação a efetuar com vista à realização de juntas soldadas.....	21
Figura 17 - Rebarbadora equipada de forma apropriada para a realização de chanfros em peças planas.....	22
Figura 18 - Equipamento apropriado para a abertura de chanfros em peças planas (Ananda Shipyard and Slipways, Ltd.).....	22
Figura 19 - Imagem do equipamento TRUMPF TruTool TKF 2000 para abrir chanfros até 20 mm de espessura.....	22
Figura 20 - Imagem do chanfro realizado numa virola (www.irvon.co.uk em 25.02.2013).....	22
Figura 21 - Representação esquemática e teórica da simbologia segundo a norma ISO 2553.....	24
Figura 22 - Simbologia correspondente à preparação das juntas, segundo a norma ISO 2553.....	25
Figura 23 - Simbologia suplementar correspondente à geometria da face dos cordões, segundo a norma ISO 2553.....	25
Figura 24 - Simbologia complementar para a identificação de situações particulares, segundo a norma ISO 2553.....	25
Figura 25 - Representação das dimensões do cordão, segundo a norma ISO 2553.....	26
Figura 26 - Simbologia utilizada em cordões intermitentes, segundo a norma ISO 2553.....	26
Figura 27 - Exemplo ilustrativo da aplicação da norma ISO 2553 e sua comparação com a norma AWS a2.4 (Gregory and Armstrong, 2005).....	27
Figura 28 - Dois exemplos simples da aplicação da norma ISO 2553 (Gregory and Armstrong, 2005).....	28
Figura 29 - Esquema comparativo entre a representação de uma junta segundo a norma ISO 2553 e AWS a2.4 (Gregory and Armstrong, 2005).....	28
Figura 30 - Representação esquemática de todas as indicações que a simbologia segundo a norma AWS a2.4 pode conter.....	29
Figura 31 - Representação da simbologia referente às juntas (Adaptado de Gregory and Armstrong, 2005).....	30
Figura 32 - Exemplo da representação de uma junta soldada de ambos os lados, com representação da preparação e da profundidade de penetração, segundo a norma AWS a2.4.....	31
Figura 33 - Representação da simbologia correspondente a uma soldadura em <i>fillet</i> , comparando as normas ISO 2553 e AWS a2.4 (Gregory and Armstrong, 2005).....	31

Figura 34 - Representação esquemática de um cordão interrompido e respetiva simbologia segundo as normas ISO 2553 e AWS a2.4 (Adaptado de Gregory and Armstrong, 2005).....	32
Figura 35 - Representação da simbologia correspondente a uma junta de dupla face com cordões interrompidos e distribuídos assimetricamente (Gregory and Armstrong, 2005).....	32
Figura 36 - Exemplo de mesa de soldadura padronizada, provida já de alguns calços e grampos próprios para fixação de componentes a soldar (Fonte: Forster Welding Systems, em 09.02.2016).....	33
Figura 37 - Exemplo de mesa de soldadura padronizada (Fonte: Weldingtables.co.uk, em 09.02.2016).....	34
Figura 38 - Exemplo de mesa de soldadura padronizada (Fonte: Weldingtables.co.uk, em 09.02.2016).....	34
Figura 39 - Exemplo de peça mais complexa montada em mesa de soldadura (Fonte: Bluco Corporation, em 05.02.2016).....	35
Figura 40 - Exemplo de peça mais complexa montada em mesa de soldadura.....	35
Figura 41 - Exemplo de um corrimão para uma rampa ou escada, montado em mesa de soldadura (Fonte: Siegmundusa.com, em 05.02.2016).....	36
Figura 42 - Exemplo de uma mesa de soldadura rotativa de acionamento manual (Fonte: Bluco.com, em 05.02.2016).....	36
Figura 43 - Exemplo de um posicionador rotativo de soldadura (Fonte: Forster Welding Systems, em 05.02.2016).....	37
Figura 44 - Exemplo de um posicionador rotativo de soldadura (Fonte: Liftechequip.com, em 05.02.2016).....	37
Figura 45 - Exemplo de um posicionador rotativo de grandes dimensões para a soldadura de tanques de grande porte (Fonte: Sideros.com, em 05.02.2016).....	38
Figura 46 - Exemplo de uma gama de posicionadores basculantes e rotativos (Fonte: Sideros.com, em 05.02.2016).....	38
Figura 47 - Exemplo de um posicionador basculante e rotativo de grande porte, com indicação dos eixos de rotação e translação que permite regular.....	39
Figura 48 - Exemplo de diferentes tipos de posicionadores acoplados a robôs de soldadura (Fontes: Fanuc.eu e Trumpf.com, em 05.02.2016).....	39
Figura 49 - Exemplo de um gabarito para soldadura com acionamento automático (Fonte: Dranindia.com, em 05.02.2016).....	40
Figura 50 - Exemplo de um gabarito para soldadura com inúmeras peças em cobre, o qual se encontra montado num posicionador rotativo (Fonte: FÖRSTER SCHWEISSTISCH SYSTEMS, em 05.02.2016).....	40
Figura 51 - Exemplo de um gabarito para soldadura de portas do Mitsubishi Pajero (Fonte: Gasgoo.com, em 11.02.2016).....	41
Figura 52 - Exemplo do projeto de um gabarito para soldadura de estruturas de assentos para automóveis (Fonte: Forcedesign.biz, em 11.02.2016).....	41
Figura 53 - Diagrama esquemático da projeção do arco elétrico sobre o material de base (Modenesi, 2001).....	46
Figura 54 - Diferentes geometrias usualmente assumidas pelos cordões de soldadura, em função da Potência Específica própria de cada processo e de cada conjunto de parâmetros (Modenesi, 2009).....	48
Figura 55 - Distribuição da dissipação da diferença de potencial ao longo do arco, entre o cátodo e o ânodo (<i>Introdução à Tecnologia da Soldadura I</i> , Luísa Quintino, ISQ).....	50
Figura 56 - Aspeto de um arco elétrico estável, com um comprimento do arco de 50 mm e uma intensidade de corrente de 500 A.....	51
Figura 57 - Variação da condutividade térmica dos diferentes gases e misturas gasosas utilizadas em soldadura em função da temperatura (<i>AWS – Welding Technology</i> , 1998).....	53
Figura 58 - Forma como se desenvolvem forças exterior que conduzem à deflexão do arco e respetivo efeito (Sopro Magnético) (L. Quintino, 2003).....	54
Figura 59 - Resenha histórica da evolução dos princípios da transformação e adaptação da corrente elétrica aos processos de soldadura por arco elétrico.....	55
Figura 60 - Representação esquemática de um transformador utilizado para soldadura por arco elétrico.....	56
Figura 61 - Retificação da corrente em “meia-onda”.....	57

Figura 62 - Retificação da corrente em “onda completa”	57
Figura 63 - Esquema representativo de uma ponte retificadora trifásica de onda completa, e do sistema trifásico de corrente alternada antes e após retificação	57
Figura 64 - Esquema elétrico de uma fonte de alimentação monofásica de onda completa, provida da adequada filtragem	58
Figura 65 - Esquemas elétricos genéricos para fontes de alimentação de corrente contínua para soldadura, baseadas em transístores e em tirístores	58
Figura 66 - Esquema elétrico de uma fonte de alimentação trifásica do tipo <i>Inverter DC</i>	59
Figura 67 - Esquema elétrico de uma fonte de alimentação do tipo <i>Inverter AC</i>	59
Figura 68 - Representação esquemática de duas formas de controlo da entrega térmica no processo de soldadura por arco, através de máquinas do tipo <i>Inverter</i>	60
Figura 69 - Características técnicas de uma máquina de soldadura ESAB	62
Figura 70 - Exemplo de uma placa de características de uma máquina de soldadura, e forma como a mesma deve ser interpretada	63
Figura 71 - Representação esquemática de curvas características de (a) Corrente Constante e de (b) Tensão Constante correspondentes a fontes de alimentação para soldadura	64
Figura 72 - Curva característica de uma fonte de alimentação para soldadura <i>versus</i> Curva de trabalho	65
Figura 73 - Diferentes Curvas de funcionamento para uma mesma Curva característica	65
Figura 74 - Configuração habitual das fontes de alimentação flexíveis, que permitem ser usadas na soldadura a eléctrodo revestido, MIG-MAG e TIG (Corrente alternada e contínua, com fornecimento simultâneo de gás e material de adição) (Fonte: FRONIUS, modelo <i>TranSteel</i>)	66
Figura 75 - Diagrama esquemático do processo de soldadura por arco eléctrico com eléctrodo revestido e forma como a operação de escorvamento do arco é levada a cabo (Adaptado de: weldwithvengeance.com)	72
Figura 76 - Constituição de eléctrodos revestidos: alma e revestimento	73
Figura 77 - Codificação da referência dos eléctrodos revestidos segundo a norma AWS	78
Figura 78 - Aspeto da forma como a referência dos eléctrodos está efetuada	80
Figura 79 - Aspeto de cordões de soldadura efetuados sobre o mesmo material e com os mesmos parâmetros, mas utilizando diferentes revestimentos	81
Figura 80 - Forma dos cordões de soldadura em função dos erros de regulação eventualmente cometidos sobre cada um dos parâmetros de soldadura	84
Figura 81 - Representação esquemática do posicionamento adequado do eléctrodo para as posições de soldadura (a) ao baixo, (b) na horizontal, (c) vertical ascendente e (d) vertical descendente (Modenesi)	87
Figura 82 - Campos magnéticos que geram o efeito de Sopro Magnético	88
Figura 83 - Efeito do Sopro Magnético na prática	89
Figura 84 - Diagrama esquemático do processo de soldadura semiautomático MIG-MAG	95
Figura 85 - Representação esquemática de uma tocha para soldadura MIG-MAG	97
Figura 86 - Diagrama esquemático da ponta de uma tocha MIG-MAG, com a indicação das distâncias a ter em consideração neste processo	98
Figura 87 - Influência mútua dos parâmetros reguláveis no processo MIG-MAG	98
Figura 88 - Diagrama esquemático de uma tocha completa para soldadura MIG-MAG	99
Figura 89 - Tochas para soldadura MIG-MAG refrigeradas a ar	99
Figura 90 - Tochas para soldadura MIG-MAG refrigeradas a água	99
Figura 91 - Diagrama esquemático de uma máquina de soldadura da marca sueca ESAB, destinada ao processo MIG-MAG	100
Figura 92 - Representação de um sistema de tração/alimentação do fio de material de adição num equipamento MIG-MAG	100
Figura 93 - Bobinas características do processo MIG-MAG e soldadura por Fio Fluxado	101
Figura 94 - Equipamento de soldadura multiprocesso com duplo alimentador de fio para o processo MIG-MAG (MILLER PipeWorx 400)	101

Figura 95 - Garrafas de gás tradicionais para o processo MIG-MAG e manómetros de pressão e reguladores de fluxo para o gás	102
Figura 96 - 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)	105
Figura 97 - 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)	105
Figura 98 - Representação esquemática dos diferentes modos de transferência possíveis de encontrar no processo de soldadura MIG-MAG	108
Figura 99 - Sequência de imagens correspondentes ao processo de transferência em curto-circuito no processo MIG-MAG	109
Figura 100 - Ciclos efetuados pela tensão e intensidade de corrente no processo de transferência por curto-circuito, na soldadura MIG-MAG	110
Figura 101 - Representação esquemática da forma como o material se transfere no modo pulsado	113
Figura 102 - Aspeto da soldadura de Alumínio (e = 0.3 mm) pelo processo TIG (AC) e MIG PULSADO (MILLER)	114
Figura 103 - Aspeto do arco no modo de transferência por Curto-Circuito no processo MIG-MAG (Fonte: AGA)	114
Figura 104 - Aspeto do arco no modo de transferência por Pulverização Axial no processo MIG-MAG (Fonte: AGA)	114
Figura 105 - Zonas típicas para cada modo de transferência em função da espessura do material de base e da intensidade de corrente utilizada (Fonte: AWS)	115
Figura 106 - Influência da intensidade de corrente na soldadura de Aço ao Carbono, no modo de transferência em Curto-Circuito e com 75% Árgon + 25% CO ₂ como gás de proteção. (Fonte: ESAB)	116
Figura 107 - Efeito da diferença de potencial na soldadura de Alumínio, no modo de transferência por pulverização axial, com 100% Árgon. (Fonte: ESAB)	117
Figura 108 - Efeito da velocidade de soldadura, em juntas soldadas de Alumínio, no modo de transferência por pulverização axial, utilizando 100% Árgon	118
Figura 109 - Influência da extensão livre do eletrodo na soldadura de Aço ao Carbono, no modo Curto-Circuito e com mistura gasosa de 75% Árgon + 25% CO ₂	119
Figura 110 - Diferentes posições da tocha de soldadura MIG-MAG, conduzindo a diferentes características dos cordões de soldadura	119
Figura 111 - Influência da posição da tocha na geometria do cordão de soldadura, no processo MIG-MAG	120
Figura 112 - Relação entre o diâmetro do fio-eléctrodo, intensidade de corrente e velocidade de alimentação do arame no processo MIG-MAG	121
Figura 113 - Diagrama esquemático do efeito de cada polaridade na geometria do cordão de soldadura no processo MIG-MAG	122
Figura 114 - Influência do desvio isolado de determinados parâmetros no aspeto dos cordões de soldadura no processo MIG-MAG	122
Figura 115 - Codificação do fio de soldadura no processo MIG-MAG, para os Aços ao Carbono ou de grão fino, segundo a norma EN ISO 14341-A	123
Figura 116 - Exemplo de aplicação da soldadura MIG-MAG (Fonte: Tecno-Daldature)	125
Figura 117 - Exemplo de aplicação da soldadura MIG-MAG a peças de construção metálica (Fonte: Tecno-Saldature)	125
Figura 118 - Exemplo de soldadura MIG-MAG em peças relativamente espessas	125
Figura 119 - Exemplo de soldadura MIG (AC) em peças de Alumínio	125
Figura 120 - Exemplo da soldadura de Aço inoxidável através de MIG Pulsado (Fonte: MUSTANGS)	125
Figura 121 - Sistema MIG-MAG para a soldadura em "Tandem" de jantes em Aço (Adaptada de LINCOLN ELECTRIC)	126
Figura 122 - Representação esquemática da soldadura por arco eléctrico com fio fluxado e proteção gasosa adicional (ESAB)	132
Figura 123 - Representação esquemática da soldadura por arco eléctrico com fio fluxado autoprottegido, sem proteção gasosa adicional (ESAB)	133

Figura 124 - <i>Layout</i> característico de uma instalação para soldadura com fio fluxado	133
Figura 125 - Influência da intensidade de correntes na geometria dos cordões de soldadura com fio fluxado (ESAB)	135
Figura 126 - Influência da diferença de potencial na geometria dos cordões de soldadura com fio fluxado (ESAB)	135
Figura 127 - Influência do gás de proteção na geometria dos cordões efetuados com fio fluxado (ESAB)	136
Figura 128 - Representação esquemática da geometria do cordão de soldadura no processo com fio fluxado em função do tipo de gás de proteção utilizado (ESAB)	137
Figura 129 - Representação esquemáticas dos quatro modos de transferência possíveis para os processos de soldadura por fio fluxado	138
Figura 130 - Representação esquemática do processo de fabrico do fio fluxado	139
Figura 131 - Representação esquemática da configuração interna de alguns fios fluxados	139
Figura 132 - Exemplo de codificação dos fios fluxados segundo a norma EN ISO 17632-A	144
Figura 133 - Processo de soldadura com fio fluxado aplicado à soldadura de reservatórios (ESAB)	145
Figura 134 - Representação esquemática do princípio do processo TIG	149
Figura 135 - Aspeto de uma soldadura TIG realizada com material de adição	150
Figura 136 - Representação esquemática dos diferentes equipamentos necessários à soldadura pelo processo TIG (MILLER)	151
Figura 137 - Equipamentos de soldadura multiprocesso com valências para soldadura TIG e por Eléctrodo Revestido (MILLER)	151
Figura 138 - Aspeto geral de uma tocha TIG	152
Figura 139 - Constituição de uma tocha TIG com arrefecimento natural (a ar)	153
Figura 140 - Constituição de uma tocha TIG com arrefecimento a água	153
Figura 141 - Conjunto de acessórios para tochas TIG e pormenor da tocha com um bocal de grandes dimensões para incremento da proteção gasosa (MONSTER TIG NOZZLE)	154
Figura 142 - Tocha para automatização do fornecimento do material de adição no processo TIG (TIGer Process)	154
Figura 143 - Eléctrodos não-consumíveis para a soldadura pelo processo TIG	156
Figura 144 - Aspeto da geometria de dois cordões de soldadura TIG efetuados com estados diferentes de afiamento do eléctrodo (Adaptado de Modenesi)	157
Figura 145 - Representação esquemática da forma correta e incorreta de afiar um eléctrodo não consumível no processo TIG (Modenesi)	158
Figura 146 - Forma como a extremidade de alguns eléctrodos TIG se apresenta após trabalho	158
Figura 147 - Aspeto da extremidade das varetas de material de adição (Aço Inoxidável AISI 316L e Aço ao Carbono E 70S3 cobreado) para o processo TIG manual (MIXANDI)	159
Figura 148 - Efeito da polaridade e da Corrente Alternada na geometria dos cordões obtidos pelo processo TIG	162
Figura 149 - Indicações breves sobre o posicionamento mais adequado da tocha TIG na soldadura em diversas posições (Modenesi)	165
Figura 150 - Aspeto da soldadura TIG utilizando a técnica <i>Keyhole</i> (Fonte: K-TIG)	166
Figura 151 - Aspeto da soldadura TIG utilizando a técnica <i>Keyhole</i> (Fonte: K-TIG)	168
Figura 152 - Princípio do processo de soldadura TIG por pontos (EWM Hightech Welding)	168
Figura 153 - Diferentes bocais especiais para a soldadura por pontos pelo processo TIG (EWM)	169
Figura 154 - Aspeto de uma tocha para soldadura por pontos TIG e aspeto da operacionalização do processo numa junta de canto (EMW Hightech Welding)	169
Figura 155 - Tocha/Pistola própria para o processo TIG por pontos (EMW Hightech Welding)	169
Figura 156 - Exemplo de aplicação da soldadura TIG ao quadro em liga de Alumínio de uma bicicleta	170
Figura 157 - Soldadura TIG com vareta de material de adição	170
Figura 158 - Exemplo de soldadura TIG mecanizada, onde é aproveitada a soldadura como fator estético num sistema de escape de uma moto (BikerHolic)	170

Figura 159 - Diagrama esquemático do princípio de funcionamento do processo de soldadura por plasma (Adaptada de www.substech.com)	175
Figura 160 - Representação esquemática dos dois tipos de arco possíveis de obter no processo plasma (Adaptado de <i>AWS - Welding Handbook, Vol. 2</i>)	177
Figura 161 - Aspeto da onda fornecida pelas fontes de alimentação <i>Inverter</i> e forma como a mesma pode ser regulada (Adaptado de <i>AWS - Welding Handbook, Vol. 2</i>)	178
Figura 162 - Aspeto de fontes de alimentação ligadas à soldadura por plasma, onde se destacam as duas botijas de gás	181
Figura 163 - Aspeto (a) das tochas para soldadura por plasma mecanizada e (b) da tocha para soldadura por plasma manual (www.prweb.com e EWM)	182
Figura 164 - Figura esquemática e imagem de tochas para a soldadura por plasma com alimentação automática do fio de metal de adição (www.freepapentsonline.com)	182
Figura 165 - Operação de soldadura por plasma efetuada manualmente (FRONIUS)	183
Figura 166 - Operação de soldadura por plasma efetuada através de sistemas mecanizados (FRONIUS)	183
Figura 167 - Diagrama esquemático da técnica operatória <i>Keyhole</i> na soldadura por plasma (AWS – <i>Welding Processes, Vol. 2, ISF Aachen</i>)	184
Figura 168 - Representação esquemática dos três modos de operação no processo de soldadura por plasma (www.metalica.com.br/)	184
Figura 169 - Gamas de espessura de diferentes materiais que podem ser trabalhadas pelas diferentes técnicas de soldadura por plasma, tendo em conta os materiais usualmente soldados por este processo (www.metalica.com.br/)	185
Figura 170 - Convenção de cores para os eléctrodos de Tungsténio usados no processo de soldadura por plasma (igual ao usado no TIG) (www.tungsten-electrodo.net)	186
Figura 171 - Exemplo da aplicação da soldadura por microplasma numa válvula de grandes dimensões (Empire - <i>Welding & Fabrication Co, Inc.</i>)	187
Figura 172 - Representação esquemática da soldadura por arco submerso	191
Figura 173 - Representação esquemática em corte do princípio do processo de soldadura por arco submerso	192
Figura 174 - Aspeto prático da realização da soldadura por arco submerso	192
Figura 175 - Realização da soldadura por arco submerso de um poste para telecomunicações, em que se pode ver a tocha, o aspirador do fluxo e o fácil destacamento da escória como o mostrado na figura 174	192
Figura 176 - Instalação de soldadura por arco submerso (www.tradekorea.com)	193
Figura 177 - Aspeto prático da soldadura em “Tandem” com dois eléctrodos	194
Figura 178 - Aspeto de equipamento de soldadura em “Tandem” com três fios de adição	194
Figura 179 - Exemplo de equipamento para soldadura por arco submerso, com a fonte de alimentação e o trator	194
Figura 180 - Pórtico para a soldadura automática de estruturas pelo processo de soldadura por arco submerso (MILLER)	195
Figura 181 - Representação esquemática da geometria dos cordões na soldadura por arco submerso de aço de baixa liga com um eléctrodo $\varnothing_E=5,6$ mm, $V=34$ Volt e $V_s=13$ mm/s	196
Figura 182 - Relação entre o diâmetro do fio-eléctrodo e a gama de intensidades de corrente possível de usar, assim como as respetivas taxas de deposição esperadas	196
Figura 183 - Variação da intensidade e taxa de deposição com o fio-eléctrodo utilizado	197
Figura 184 - Representação esquemática da influência da diferença de potencial no arco, na soldadura por arco submerso de aço de baixa liga com $\varnothing_E=5,6$ mm, $I=850$ A e $V_s=13$ mm/s	197
Figura 185 - 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	198
Figura 186 - 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	198
Figura 187 - Representação esquemática da forma como varia a geometria do cordão de soldadura em função da polaridade, no processo de soldadura por arco submerso, mantidos fixos os restantes parâmetros (Klas Weman, 2003)	199

Figura 188 - Aspeto dos diferentes grânulos de fluxo usados na soldadura por arco submerso	201
Figura 189 - Efeito da posição da tocha na geometria dos cordões, no caso da soldadura por arco submerso	201
Figura 190 - Soldadura por arco submerso aplicada na soldadura de virolas para silos (ESAB)	203
Figura 191 - Aplicação da soldadura por arco submerso a reservatórios em aço	203
Figura 192 - Soldadura por arco submerso aplicado à soldadura de postes de grandes dimensões (mechanicalengineeringblog)	203
Figura 193 - Somatório das resistências oferecidas à passagem da corrente pelos diversos componentes envolvidos na soldadura por resistência e forma como a temperatura se distribui ao longo do percurso da corrente elétrica, no fim do ciclo de soldadura. (Fonte: ccs)	207
Figura 194 - Diferentes etapas de realização de uma soldadura por pontos	209
Figura 195 - Diagrama de atuação da força e de passagem da corrente elétrica na soldadura por pontos	209
Figura 196 - Princípio do processo de soldadura por resistência/roletes e representação esquemática da forma como a soldadura por resistência/roletes é realizada. (Fonte: substech)	210
Figura 197 - Forma como a depressão é gerada para a soldadura por resistência/projeção (Fonte: RUUKKI)	210
Figura 198 - Forma como o fluxo de corrente atravessa uma junta de soldadura por resistência/projeção	211
Figura 199 - Princípio da soldadura por resistência/projeção (Fase 1: Posicionamento, Fase 2: Fim da soldadura)	211
Figura 200 - Diversas formas possíveis para efetuar a soldadura por resistência, (a) através de bossas pré-efetuadas, (b) por contacto pontual ou linear ou ainda (c) por maquinaria ou conformação de zonas pontuais de contacto	211
Figura 201 - Ciclo próprio da soldadura por resistência/projeção	212
Figura 202 - Diagrama Força/Corrente/Tempo para uma soldadura que inclui tratamento térmico durante o ciclo de trabalho	212
Figura 203 - Equipamentos de soldadura por resistência ("Pontos") (Fonte: CEA)	213
Figura 204 - Equipamento portátil de soldadura por resistência/pontos (Fonte: machines4u)	213
Figura 205 - Sistemas de soldadura por resistência ("Pontos") agregados a robô	213
Figura 206 - Equipamento de soldadura por resistência ("Costura")	214
Figura 207 - Equipamento de soldadura por resistência/projeção (Fonte: sureweld)	214
Figura 208 - Problemas ocorridos com a soldadura por resistência/pontos, (a) devido ao mau estado de um dos eletrodos ou (b) devido a deformação indevida das chapas a soldar na zona de atuação dos bicos de soldadura (Fonte: Modenesi)	217
Figura 209 - Soluções para situações especiais na soldadura por resistência (Fonte: Modenesi).....	221
Figura 210 - Métodos de teste da resistência de juntas soldadas através do processo de soldadura por resistência/pontos, dos quais se destacam (a) o método de arrancamento (<i>Peeling</i>), (b) ensaios de tração comuns e (c) testes de torção (Fonte: Modenesi, 2005)	223
Figura 211 - Diversas aplicações da soldadura por resistência	224
Figura 212 - Conjunto de pinos em aço cobreado soldados por resistência a uma chapa de aço	224
Figura 213 - Conjunto ao qual foram adicionadas duas porcas soldadas por projeção	224
Figura 214 - Aspeto de uma porca já dotada das "bossas" necessárias para a soldadura por projeção	225
Figura 215 - Diferentes fases do processo de soldadura por fricção (Fonte: bestinnovativesource.com, em 26.12.2013)	230
Figura 216 - Aspeto da soldadura por fricção de dois varões, na prática (Fonte: AWS - Conference on Friction Welding, 2007)	230
Figura 217 - Efeito exterior e interior (vista em corte) gerado pela soldadura por fricção num tubo espesso de aço (Fonte: TWI em 26.12.2013).....	230
Figura 218 - Diagrama típico da evolução de alguns parâmetros num ciclo de soldadura por fricção, em que a linha verde representa a posição das peças, uma relativamente à outra, a linha azul representa a velocidade de rotação e a linha vermelha representa a pressão axial exercida	231
Figura 219 - Soldadura por fricção através de movimento de translação, em peças que não possuem formato de revolução (Fonte: TWI em 26.12.2013)	232

Figura 220 - Compatibilidade de materiais similares na soldadura por fricção (Fonte: Forgetechin.com, em 28.12.2013)	234
Figura 221 - Equipamento de soldadura por fricção, capaz de exercer uma pressão de forjagem de 450 kN (Fonte: kuka-systems.com)	235
Figura 222 - Equipamento para soldadura por fricção de turbinas, peças para motores e outros componentes de grandes dimensões (Fonte: kuka-systems.com)	235
Figura 223 - Exemplos de casos práticos de aplicação da soldadura por fricção (Fonte: azom.com, em 28.12.2013)	235
Figura 224 - Exemplo de válvulas soldadas através de fricção (Fonte: azom.com, em 28.12.2013)	236
Figura 225 - Imagem ilustrativa das inúmeras aplicações que usam a soldadura por fricção como processo principal na realização da sua ligação (Fonte: dajieco.com, em 28.12.2013)	236
Figura 226 - Exemplo de hastes de cilindros hidráulicos soldados por fricção (Fonte: en.izumi-mfg.co.jp, em 28.12.2013)	237
Figura 227 - Diagrama esquemático do princípio da soldadura por fricção linear, internacionalmente designado por Fuction Stir Welding (Fonte: caranddriver.com, em 28.12.2013)	237
Figura 228 - Aspeto de uma ferramenta usada no processo de soldadura por fricção linear (Fonte: Stir welding process, em 28.12.2013)	238
Figura 229 - Diferentes formatos de pinos utilizados na soldadura por fricção linear (Fonte: Friction Stir Research Laboratory)	238
Figura 230 - Cordões de soldadura efetuados por soldadura por fricção linear em Alumínio AA 2519 - T87 por um pino em aço para ferramenta do tipo H13, com uma velocidade de rotação de 275 rpm e translação de 2"/min (esquerda) e 4"/min (direita) (Fonte: Kelvin Colligan, CTC company, U.S.A.)	238
Figura 231 - Exemplo prático da soldadura por fricção linear	239
Figura 232 - Princípio do processo de soldadura por explosão, onde poderemos observar (1) o segundo material, (2) a folga entre materiais, (3) o material de base, (4) a detonação, (5) o explosivo e (6) a frente de impacto (Fonte: wikimedia.org, em 28.12.2013)	243
Figura 233 - Efeito provocado pela explosão na interface de ligação entre os dois metais a unir (Fonte: regaltechnology.thomasnet.com, em 28.12.2013)	244
Figura 234 - Aspeto de conjuntos de chapas de liga ULTIMET (Crómio-Cobalto) e COBRE, soldados por explosão (Fonte: regaltechnology.thomasnet.com, em 28.12.2013)	244
Figura 235 - Aspeto da soldadura por explosão de uma placa de Titânio (5/8" de espessura) contra uma placa de aço SA516-70 2" de espessura) (Fonte: regaltechnology.thomasnet.com, em 28.12.2013)	244
Figura 236 - Compatibilidade entre materiais dissimilares na soldadura por explosão (Fonte: CUTTER, D. (2006))	246
Figura 237 - Princípio do processo de geração e concentração do feixe laser	251
Figura 238 - Diferentes modos de excitação dos Laser utilizados em soldadura e respetivo comprimento de onda (Fonte: Tim Morris, TRUMPF)	252
Figura 239 - Aspeto de um robô para soldadura laser por fibra ótica	254
Figura 240 - Diferentes modos de soldadura laser: (1) Condução, (2) Penetração e (3) <i>Keyhole</i> (Fonte: Unitek Myiachi Corporation, Inc.)	254
Figura 241 - Efeito da largura e intensidade do impulso, na secção do cordão, na soldadura laser pulsada (Fonte: Unitek Miyachi, Inc.)	256
Figura 242 - Diagrama comparativo da refletividade dos feixes de CO ₂ e de fibra em diferentes materiais	257
Figura 243 - Dispositivo médico-cirúrgico soldado por laser (Fonte: northeastlasermedical.com, em 30.12.2013)	258
Figura 244 - Imagem de um <i>pacemaker</i> soldado por laser (Fonte: SME.org, em 30.12.2013)	258
Figura 245 - Soldadura laser aplicada a pequenos componentes mecânicos (Fonte: amada.de, em 30.12.2013)	258
Figura 246 - Diferentes soldaduras efetuadas por laser na carroçaria automóvel (Fonte: comau.com, em 29.12.2013)	258

Figura 247 - Célula robotizada para soldadura laser, dotada de posicionador (Fonte: vac-machines.be, em 30.12.2013)	259
Figura 248 - Célula de corte e soldadura laser da TRUMPF (Fonte: trumpf-laser.com, em 30.12.2013)	259
Figura 249 - Princípio de funcionamento da soldadura por feixe de eletrões (Adaptado de: personal.psu.edu, em 30.12.2013)	263
Figura 250 - Princípio de atuação do processo de soldadura por feixe de eletrões (Fonte: Steigerwald Strahltechnik, GmbH)	264
Figura 251 - Imagens comparativas das dimensões de cordões efetuados (a) pelo processo TIG e (b) por Feixe de Eletrões (Adaptado de: ebpglobal.com, em 02.01.2014)	265
Figura 252 - Imagem da soldadura de topo de duas membranas extremamente delgadas por feixe de eletrões (Fonte: commons.wikipedia.org, em 02.01.2014)	265
Figura 253 - Aspeto de uma câmara e equipamento de soldadura por feixe de eletrões para soldar no vácuo (Fonte: Steigerwald Strahltechnik, GmbH)	266
Figura 254 - Aspeto do equipamento de soldadura por feixe de eletrões para soldar à pressão atmosférica (Fonte: Precision Technologies, Inc. – ptreb.com, em 02.01.2014)	266
Figura 255 - Exemplo de uma engrenagem helicoidal cônica usada em helicópteros, sujeita a elevada rotação e cargas muito elevadas, onde a soldadura tem que estar isenta de defeitos (Fonte: Precision Technologies, Inc. – ptreb.com, em 02.01.2014)	268
Figura 256 - Exemplo de uma turbina de um sistema de compressão de ar para motor automóvel, sujeita a elevada rotação, fadiga e onde são soldados dois materiais dissimilares, em que a soldadura tem que ser isenta de defeitos (Fonte: Precision Technologies, Inc. – ptreb.com, em 02.01.2014)	269
Figura 257 - Exemplo de uma tampa de uma câmara de combustão de reator de produção de energia, onde se efetua a mistura ar/combustível, e que está sujeita a fortes ciclos térmicos (Fonte: Precision Technologies, Inc. – ptreb.com, em 02.01.2014)	269
Figura 258 - Manómetros para gases de soldadura (Fonte: shop.berner.eu, em 04.01.2014)	273
Figura 259 - Maçarico para soldadura com mistura gasosa (Fonte: toolstop.co.uk, em 04.01.2014)	274
Figura 260 - Diferentes zonas da chama e curva de temperatura (Fonte: e-ducativa.catedu.es, em 04.01.2014)	274
Figura 261 - Diferentes tipos de chama: (a) neutra, (b) oxidante e (c) carburante (Fonte: theiiwmumbai.8m.com, em 04.01.2014)	275
Figura 262 - Aspeto das varetas de material de adição normalmente utilizadas na soldadura oxiacetilénica (Fonte: ewm-sales.co.uk, em 04.01.2014)	276
Figura 263 - Material essencial à soldadura oxiacetilénica (Fonte: hsslivehire.com, em 04.01.2014)	279
Figura 264 - Relação entre os principais parâmetros associados à soldadura oxiacetilénica (Fonte: theiiwmumbai.8m.com, em 04.01.2014)	279
Figura 265 - Soldadura oxiacetilénica de uma réplica de um esqueleto de dinossauro (Fonte: paleofire.com/LarryWilliamsWelding.jpg, em 04.01.2014)	280
Figura 266 - Exemplo da aplicação da soldadura oxiacetilénica na ligação de tubagens em ligas não-ferrosas (Fonte: harrisproductsgroup.com, em 04.01.2014)	281
Figura 267 - Aspeto geral da realização de uma operação de brasagem utilizando maçarico	285
Figura 268 - Aspeto de um avanço de bicicleta ligado por brasagem	285
Figura 269 - Aspeto de um permutador de placas ligado por brasagem	285
Figura 270 - Detalhes das juntas de um quadro de bicicleta ligado através de brasagem	286
Figura 271 - Observação metalográfica de uma junta realizada através de brasagem e zona do Diagrama de Fases, do qual se tira normalmente proveito para a obtenção de ligas de material de adição para brasagem (Fonte: www.aluminium.matter.org.uk)	286
Figura 272 - Princípio do processo de ligação por brasagem (Fonte: www.globalspec.com)	287
Figura 273 - Intervalo de temperatura de fusão característico para diversas ligas utilizadas como material de adição em brasagem (Fonte: azom.com)	288
Figura 274 - Aspeto comum dos ferros de soldar utilizados na ligação por brasagem de produtos elétricos	289
Figura 275 - Imagem de um maçarico usado habitualmente em processos de ligação por brasagem	289

Figura 276 - Imagem de uma operação de brasagem (Fonte: Sulzer.com, em 04.01.2014)	289
Figura 277 - Aspeto de um forno atmosférico para a ligação por brasagem	290
Figura 278 - Aspeto de um forno de atmosfera controlada utilizado na brasagem de peças de elevada responsabilidade	290
Figura 279 - Princípio de funcionamento do sistema de aquecimento por indução e aspeto de um equipamento de indução destinado exclusivamente à brasagem	291
Figura 280 - Sistema de aquecimento localizado, por indução, utilizado na brasagem (Fonte: inductionheating.com, em 23.03.2013)	291
Figura 281 - Materiais de adição (fios, fitas, arames, pré-formas), fluxos e decapantes utilizados na brasagem	292
Figura 282 - Insertos em Diamante CVD ligados ao suporte da ferramenta por brasagem em Alto-Vácuo	295
Figura 283 - Mó abrasiva em que os grânulos de diamante são agregados à base da ferramenta através de brasagem (Fonte: diamondcbn.cn)	295
Figura 284 - Principais causas para o aparecimento de defeitos de soldadura (Fonte: ASME)	299
Figura 285 - Principais defeitos geométricos (Fonte: kobelco-welding.jp, em 06.01.2014)	300
Figura 286 - Técnica operatória que permite antecipar o efeito de distorção angular (coluna da direita) e a mesma soldadura, efetuada sem preocupações de compensação desse efeito (coluna da esquerda) (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014)	301
Figura 287 - Técnicas que permitem antecipar o efeito de distorção angular (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014)	302
Figura 288 - Técnicas de fixação para evitar a distorção (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014)	302
Figura 289 - Sequência de passes para evitar a distorção (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014)	302
Figura 290 - Efeito de contração registado numa soldadura topo-a-topo de duas chapas de aço, em que é possível observar o efeito de dupla encurvadura, isto é, tanto no sentido longitudinal como transversal (Fonte: hera.org.nz, em 06.01.2014)	303
Figura 291 - Diagrama esquemático de excesso de material de adição no topo da junta de soldadura (Adaptado de: twi.co.uk, em 06.01.2014)	304
Figura 292 - Diagrama esquemático da medição de excesso de material de adição com um comparador	304
Figura 293 - Detecção de excesso de material através de Raios-X	304
Figura 294 - Diagrama esquemático de sobreposição na parte superior da junta (Adaptado de: twi.co.uk, em 06.01.2014)	305
Figura 295 - Diagrama esquemático de desalinhamento (Adaptado de: twi.co.uk, em 06.01.2014)	306
Figura 296 - Aspeto de um desalinhamento, visto numa observação da secção reta de uma junta soldada	306
Figura 297 - Desalinhamento de uma junta soldada, detetada através de Raios-X. (Fonte: ndt-ed.org, em 07.01.2014)	306
Figura 298 - Diagrama esquemático de uma falta de preenchimento (Adaptado de: twi.co.uk, em 06.01.2014)	307
Figura 299 - Falta de preenchimento detetada numa observação da secção reta de um cordão	307
Figura 300 - Representação esquemática do defeito de falta de penetração (Fonte: twi.co.uk, em 07.01.2014)	308
Figura 301 - Defeito de falta de penetração em diferentes tipologias de junta	308
Figura 302 - Defeito de falta de penetração detetado por Raios-X numa junta topo-a-topo (Fonte: ndt-ed.org, em 07.01.2014)	309
Figura 303 - Defeito de falta de penetração numa junta sobreposta (Fonte: exponente.com, em 07.01.2014)	309
Figura 304 - Defeito de falta de penetração numa junta de canto (Fonte: weldingtipsandtricks.com, em 07.01.2014)	310
Figura 305 - Representação esquemática do defeito de excesso de penetração/material de adição na raiz (Fonte: twi.co.uk, em 07.01.2014)	310
Figura 306 - Imagem que ilustra o excesso de penetração numa junta soldada a laser (Fonte: twi.co.uk, em 07.01.2014)	310
Figura 307 - Defeito de excesso de penetração detetado por Raios-X numa junta topo-a-topo (Fonte: ndt-ed.org, em 07.01.2014)	311

Figura 308 - Representação esquemática do defeito de excesso de convexidade numa junta em canto (Fonte: twi.co.uk, em 07.01.2014)	311
Figura 309 - Diagrama esquemático da medição de excesso de material num cordão de canto	312
Figura 310 - Representação esquemática do cordão de canto côncavo (Fonte: twi.co.uk, em 07.01.2014)	312
Figura 311 - Representação esquemática da medição, da possível concavidade de um cordão de canto, através de comparador	313
Figura 312 - Representação esquemática da medição, da possível assimetria do cordão, através de escantilhão	314
Figura 313 - Aspeto dos salpicos/projeções em torno do cordão (Fonte: millerwelds.com)	314
Figura 314 - Fissura criada pelo efeito de uma projeção volumosa (Fonte: bhlintl-welding.blogspot.com, em 11.01.2014)	315
Figura 315 - Representação esquemática do defeito de mordedura ou bordos queimados ((Fonte: twi.co.uk, em 11.01.2014)	316
Figura 316 - Imagem do defeito de mordedura num dos bordos da junta (Fonte: arboristsite.com, em 11.01.2014)	316
Figura 317 - Aspeto da observação por Raios-X de um defeito de mordedura (Fonte: ndt-ed.org, em 11.01.2014)	317
Figura 318 - Aspeto do efeito de uma mordedura, numa vista em corte (Adaptado de: twi-global.co.uk, em 11.01.2014)	317
Figura 319 - Diagrama esquemático do defeito de inclusão de escória (Fonte: Paulo Modenesi, 2001)	318
Figura 320 - Inclusão de escória numa junta soldada, efetuada em diversas passagens, vista em corte (Adaptado de: twi.co.uk, em 11.01.2014)	318
Figura 321 - Aspeto da observação por Raios-X de um defeito de inclusão de escória (Fonte: ndt-ed.org, em 11.01.2014)	319
Figura 322 - Aspeto da observação por Raios-X de inclusões de Tungsténio (Fonte: ndt-ed.org, em 11.01.2014)	320
Figura 323 - Aspeto da observação de porosidade na secção transversal de um cordão de soldadura (Fonte: exponente.com, em 11.01.2014)	321
Figura 324 - Observação de ninhos de poros na superfície de cordões de soldadura	321
Figura 325 - Aspeto da observação por Raios-X de um ninho de poros (Fonte: ndt-ed.org, em 11.01.2014)	322
Figura 326 - Aspeto de uma situação de aparecimento de poros alinhados num cordão de soldadura (Fonte: pirate4x4.com, em 11.01.2014)	323
Figura 327 - Aspeto de uma situação de aparecimento de poros distribuídos ao longo de um cordão de soldadura (Fonte: spatter-nix.com, em 11.01.2014)	323
Figura 328 - Aspeto de uma situação de aparecimento de poros alinhados num cordão de soldadura (Fonte: pirate4x4.com, em 11.01.2014)	324
Figura 329 - Aspeto de uma falha de fusão na parede lateral (Fonte: twi.co.uk, em 11.01.2014)	325
Figura 330 - Representação de uma parte das fissuras que poderão ocorrer em torno de um cordão de soldadura numa ligação do tipo topo-a-topo (Fonte: isadikin.wordpress.com, em 11.01.2014)	326
Figura 331 - Fissura formada a quente (Fonte: practicalmachinist.com, em 11.01.2014)	326
Figura 332 - Fissura formada a quente (Fonte: mez.co.uk, em 11.01.2014)	326
Figura 333 - Exemplo claro de fissura formada a quente	327
Figura 334 - Fissura por Hidrogénio na ZTA junto à raiz (Fonte: twi.co.uk, em 12.01.2014)	328
Figura 335 - Conjugação de fenómenos necessários à ocorrência de fissuração a frio (Fonte: twi.co.uk, em 12.01.2014)	328
Figura 336 - Fissura por fragilização por Hidrogénio na ZTA (Fonte: twi.co.uk, em 12.01.2014)	329
Figura 337 - Nível de Hidrogénio potencialmente introduzido na junta por alguns dos consumíveis utilizados nos processo de soldadura por arco mais vulgares (Fonte: twi.co.uk, em 12.01.2014)	330
Figura 338 - Exemplo de lápis térmicos (esquerda) e de pirómetro digital (direita)	336

Figura 339 - Subdivisão de uma amostra em diferentes provetes para os ensaios de tração de uma junta (Fonte: twi.co.uk, em 12.01.2014)	337
Figura 340 - Diferentes tipologias de realização para o ensaio de dobragem	338
Figura 341 - Aspeto de amostras após o ensaio de dobragem (Fonte: twi.co.uk, em 12.01.2014)	338
Figura 342 - Utensílios e ferramentas necessárias à inspeção visual de juntas soldadas	340
Figura 343 - Imagem exemplificativa do processo de verificação dimensional do cordão com escantilhões	340
Figura 344 - Sequência de fases no processo de controlo por líquidos penetrantes (Fonte: Paulo Modenesi)	341
Figura 345 - Sequência de fases no processo de controlo por líquidos penetrantes: (a) peça a controlar, (b) aplicação do líquido penetrante, (c) líquido de limpeza, (d) limpeza, (e) aplicação do revelador e (f) observação de defeitos sob luz própria (Fonte: ISQ)	342
Figura 346 - Sequência de fases no processo de controlo por magnetoscopia (Fonte: Paulo Modenesi)	343
Figura 347 - Princípio de aplicação do campo magnético e concentração de partículas em defeitos, através do processo de controlo por magnetoscopia	343
Figura 348 - Exemplo de aplicação de partículas magnéticas por via seca (esquerda) e por via húmida (direita)	344
Figura 349 - Diferentes sistemas de aplicação do campo magnético às peças a controlar (Fonte: Paulo Modenesi, 2001)	344
Figura 350 - Diferentes formas de aplicação do campo magnético às peças a controlar, com vista a maximizar o efeito de perturbação do campo magnético por defeitos (Fonte: Paulo Modenesi, 2001)	344
Figura 351 - Aspeto de um equipamento de controlo não destrutivo fixo, por magnetoscopia (Fonte: MAGWERKS)	345
Figura 352 - Aspeto de um equipamento de controlo não destrutivo portátil (Yoke), por magnetoscopia (Fonte: MAGWERKS)	345
Figura 353 - Princípio de funcionamento do controlo não destrutivo por ultrassons	346
Figura 354 - Esquema da envolvente necessária ao controlo não destrutivo por ultrassons	346
Figura 355 - Princípio de calibração do processo de controlo não destrutivo por ultrassons	347
Figura 356 - Imagens do princípio de funcionamento de uma sonda a 45°	347
Figura 357 - Diferentes formas de apresentação dos defeitos, consoante o uso de diferentes de equipamentos do tipo A (esquerda), B (centro) e C (direita)	348
Figura 358 - Aspeto de uma sonda angular de feixe único para controlo não destrutivo por ultrassons (Fonte: DOPPLER)	348
Figura 359 - Aspeto de uma sonda para controlo não destrutivo por ultrassons (Fonte: OLYMPUS-IMS)	348
Figura 360 - Equipamento de controlo por ultrassons: aspeto do monitor em operação (Fonte: akkersrolls.com, em 14.01.2014))	349
Figura 361 - Equipamento de controlo por ultrassons: aplicado ao controlo de condutas, de médio diâmetro, usando sonda de duplo cristal (Fonte: olympus-ims.com, em 14.01.2014)	349
Figura 362 - Princípio básico do processo de controlo por Raios-X (Fonte: Paulo Modenesi)	350
Figura 363 - Princípio da absorção de energia no controlo por Raios-X em função da espessura em análise (Fonte: Paulo Modenesi)	351
Figura 364 - Princípio da absorção de energia no controlo por Raios-X em função da densidade do material em análise (Fonte: Paulo Modenesi)	351
Figura 365 - Radiografia a uma junta soldada, onde poderão ser observadas algumas fissuras transversais, nas zonas assinaladas	352
Figura 366 - Atlas com a forma como é previsível que cada defeito apareça numa radiografia	353
Figura 367 - 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	357
Figura 368 - Representação em corte do cordão produzido (à esquerda) e respetiva simbologia segundo a norma ISO 2553 (à direita)	357
Figura 369 - Representação em corte dos cordões produzidos (à direita) e respetiva simbologia segundo a norma ISO 2553 (à esquerda)	358

Figura 370 - Representação em corte e vista de cima dos pontos de soldadura produzidos (à direita e em baixo, respetivamente) e respetiva simbologia segundo a norma ISO 2553 (à esquerda)	359
Figura 371 - Representação em corte dos cordões produzidos (à direita) e respetiva simbologia segundo a norma ISO 2553 (à esquerda)	359
Figura 372 - Representação esquemática dos cordões produzidos (à esquerda) e respetiva simbologia segundo a norma ISO 2553 (à direita)	360
Figura 373 - Representação esquemática dos cordões produzidos (à esquerda) e respetiva simbologia segundo a norma ISO 2553 (à direita)	360
Figura 374 - Representação em corte dos cordões produzidos (à direita) e respetiva simbologia segundo a norma AWS a2.4 (à esquerda)	361
Figura 375 - Representação em corte do cordão produzido (à direita) e respetiva simbologia segundo a norma AWS a2.4 (à esquerda)	361
Figura 376 - Representação em corte do cordão produzido (à esquerda) e respetiva simbologia segundo a norma AWS a2.4 (à direita)	362
Figura 377 - Desenho 3D da peça que se pretende obter por soldadura	365
Figura 378 - Aspeto dos cinco acessórios que, montados na mesa normalizada, constituem o gabarito de soldadura da peça indicada na figura anterior	366
Figura 379 - Aspeto da montagem da primeira flange no gabarito	366
Figura 380 - Aspeto da montagem do primeiro tubo no gabarito	366
Figura 381 - Aspeto da montagem da segunda flange no gabarito	367
Figura 382 - Aspeto da montagem do segundo tubo no gabarito	367
Figura 383 - Aspeto da montagem da primeira cantoneira em "L" no gabarito	367
Figura 384 - Aspeto da montagem da segunda cantoneira em "L" no gabarito	368
Figura 385 - Aspeto da montagem do primeiro reforço entre tubos no gabarito	368
Figura 386 - Aspeto da montagem do segundo reforço entre tubos no gabarito	368
Figura 387 - Aspeto da soldadura possível de realizar em uma das faces do conjunto	369
Figura 388 - Rotação de 180º do conjunto no gabarito, para permitir pingar e soldar na face contrária	369
Figura 389 - Soldadura possível de realizar na face contrária do conjunto	370
Figura 390 - Extração do conjunto completamente pingado ou soldado em grande parte	370
Figura 391 - Desenho 3D da peça que se pretende obter por soldadura	371
Figura 392 - Desenho 3D da base do gabarito, assente na mesa normalizada de soldadura	371
Figura 393 - Aspeto da inserção do primeiro componente do conjunto a obter: a primeira flange	372
Figura 394 - Aspeto da inserção do segundo componente: o tubo principal	372
Figura 395 - Aspeto da inserção dos reforços longitudinais e respetiva fixação para pingagem	373
Figura 396 - Aspeto do deslocamento dos posicionadores rotativos, para facilitar a pingagem/soldadura junto à flange inferior	373
Figura 397 - O tubo principal está pingado à flange e os reforços estão pingados ao tubo principal	373
Figura 398 - Retirada do tubo já parcialmente construído	374
Figura 399 - Colocação da flange contrária e inserção do tubo parcialmente construído	374
Figura 400 - Preparação e posicionamento para a pingagem da segunda flange	374
Figura 401 - Garantia de posicionamento da nova flange relativamente aos reforços	375
Figura 402 - Abertura dos posicionadores rotativos, com vista a libertar o conjunto já pingado	375
Figura 403 - Extração do conjunto já soldado	376
Figura 404 - Aspeto da peça que se pretende produzir	376
Figura 405 - Aspeto da montagem das peças que dão corpo ao gabarito que irá permitir montar e soldar os diferentes componentes da peça a produzir	377
Figura 406 - Aspeto dos calços que garantem o correto posicionamento da chapa de base	378
Figura 407 - Posicionamento da chapa de base	378
Figura 408 - Posicionamento da primeira chapa vertical principal	379
Figura 409 - Posicionamento da primeira chapa vertical principal	379

Figura 410 - Forma como a base e a primeira chapa principal são posicionadas com rigor	380
Figura 411 - Posicionamento da chapa central de reforço	380
Figura 412 - Posicionamento da segunda chapa principal	381
Figura 413 - Accionamento do segundo cilindro de encosto da segunda chapa principal à chapa de base	381
Figura 414 - Colocação da primeira chapa de reforço lateral	382
Figura 415 - Acionamento dos grampos sobre a primeira chapa de reforço lateral e colocação da segunda chapa de reforço lateral.....	382
Figura 416 - Acionamento dos grampos sobre a segunda chapa de reforço lateral e aspeto da forma como será inserido o tubo superior	382
Figura 417 - Aspeto da peça pronta a ser pingada e soldada	383
Figura 418 - Aspeto da peça já soldada	383
Figura 419 - Forma como a peça já soldada deverá ser extraída	384
Figura 420 - Aspeto da peça a ser rodada para que possa ser soldada na face inversa	384
Figura 421 - Aspeto da peça já soldada também na face inversa	385
Figura 422 - Posições de soldadura de acordo com a norma DIN EN ISO 6947.....	402

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos processos de soldadura segundo o estado dos materiais de base e de adição.....	8
Tabela 2 - Classificação dos processos de soldadura segundo o modo de proteção da soldadura.....	8
Tabela 3 - Classificação dos processos de soldadura segundo a fonte de calor utilizada.....	8
Tabela 4 - Adequabilidade dos processos de soldadura a cada uma das ligas metálicas mais usuais Adaptado de AWS – Welding Processes, Vol. 2)	9
Tabela 5 - Simbologia para os tipos mais comuns de chanfros para juntas soldadas	21
Tabela 6 - Vários exemplos de grampos para fixação em soldadura (Fonte: amf.de e stronghandtools.com, em 05.02.2016)	42
Tabela 7 - Vários exemplos de grampos para fixação de tubos ou perfis em esquadria (Fonte: northern.com e stronghandtools.com, em 05.02.2016)	43
Tabela 8 - Gama de Potência Específica característica de cada processo de soldadura (Adaptado de Modenesi, 2001)	47
Tabela 9 - Valores de referência para o comprimento do arco e diferenças de potencial no arco, para o processo MIG-MAG (Modenesi, 2009)	50
Tabela 10 - Funções agregadas ao revestimento dos elétrodos	73
Tabela 11 - Relação entre os materiais utilizados no revestimento e as funções procuradas	74
Tabela 12 - Tabela-resumo das propriedades principais patenteadas pelos elétrodos revestidos de Rutílicos, Celulósicos e Básicos	78
Tabela 13 - Codificação complementar dos elétrodos que permite associar à referência o tipo de corrente mais apropriado	79
Tabela 14 - Quadro comparativo dos parâmetros de operação e taxas de deposição obtidas para diferentes tipos de elétrodos revestidos (Fonte: ESAB).....	83
Tabela 15 - Efeitos sentidos no cordão de soldadura por uma regulação deficiente da intensidade de corrente (Is), tensão em vazio (Va) e velocidade de avanço (Vo) na soldadura a elétrodo revestido.....	84
Tabela 16 - Intensidade de corrente a utilizar em função da espessura do material de base e do diâmetro do elétrodo (mm)	85
Tabela 17 - Síntese das dificuldades eventualmente sentidas na soldadura por arco elétrico com elétrodo revestido, e suas possíveis causas	90
Tabela 18 - Campos de aplicação dos gases e misturas gasosas de proteção na soldadura MIG-MAG	105
Tabela 19 - Seleção do gás ou mistura gasosa em função do material de base e modo de transferência (Adaptada de LINCOLN ELECTRIC).....	106
Tabela 20 - Características da soldadura em função do material de base, sua espessura, modo de transferência e gás de proteção.....	107
Tabela 21 - Valores de referência para a intensidade de corrente de transição para a passagem do modo globular para o <i>spray</i>	112
Tabela 22 - Tensão à saída da fonte de alimentação (em Volt), tendo em consideração o material de base a soldar e o modo de transferência pretendido (valores indicativos).....	117
Tabela 23 - Quadro-Resumo da forma como cada parâmetro pode influenciar os diversos fatores que caracterizam o cordão de soldadura no processo MIG-MAG.....	123
Tabela 24 - Referência, composição e principais características dos elétrodos TIG não consumíveis mais comuns (Adaptada de LITTY)	156
Tabela 25 - Tipo de corrente e polaridade mais indicadas para cada tipo de elétrodo não-consumível destinado ao processo TIG (Adaptado de LITTY).....	157
Tabela 26 - Proteção gasosa em função da aplicação e espessura das peças	160
Tabela 27 - Intervalos de intensidade de corrente admissíveis para cada tipo de corrente, tipo e diâmetro de elétrodo (Modenesi).....	162

Tabela 28 - Condições típicas para a soldadura TIG de juntas topo-a-topo de liga de Alumínio, utilizando Corrente Alternada (Modenesi)	163
Tabela 29 - Condições típicas para a soldadura de Aço ao Carbono em juntas topo-a-topo (Modenesi)	163
Tabela 30 - Ângulo da extremidade do elétrodo em função do tipo de junta	164
Tabela 31 - Parâmetros típicos para a soldadura de Alumínio com 6.4 mm de espessura, pelo processo plasma, em diferentes posições	179
Tabela 32 - Condições típicas para a soldadura de aço inoxidável topo-a-topo por plasma, sem preparação (<i>AWS – Welding Processes, Vol. 2</i>)	179
Tabela 33 - Condições típicas para a soldadura de aço inoxidável segundo diferentes tipologias por plasma com baixa intensidade de corrente (<i>AWS – Welding Processes, Vol. 2</i>)	179
Tabela 34 - Condições típicas para a soldadura topo-a-topo de aço ao carbono ou de baixa liga, por plasma, sem preparação (<i>AWS – Welding Processes, Vol. 2</i>)	180
Tabela 35 - Parâmetros típicos para a soldadura de algumas ligas de Alumínio, usando a técnica <i>Keyhole</i> na soldadura por plasma (Adaptado de TWI)	185
Tabela 36 - Densidade de corrente necessária para diferentes materiais, na soldadura por resistência/pontos	216
Tabela 37 - Parâmetros de soldadura por resistência/pontos para chapa de aço laminada a frio (Fonte: RUUKKI)	218
Tabela 38 - Conjunto de parâmetros usuais para a soldadura por resistência/pontos de chapa de aço galvanizada a quente (Fonte: RUUKKI)	218
Tabela 39 - Quadro-resumo dos parâmetros usuais para a soldadura por resistência/projeção de diferentes materiais	219
Tabela 40 - Mapeamento da adequabilidade do processo de soldadura por resistência aos diferentes tipos de materiais (Fonte: Modenesi)	220
Tabela 41 - Temperaturas usuais para diversas misturas gasosas (Fonte: Ar Líquido)	277
Tabela 42 - Temperaturas calculadas e medidas para os diversos tipos de chama oxiacetilénica (compilado de diversos autores)	277
Tabela 43 - Causas e possíveis soluções para defeitos geométricos	303

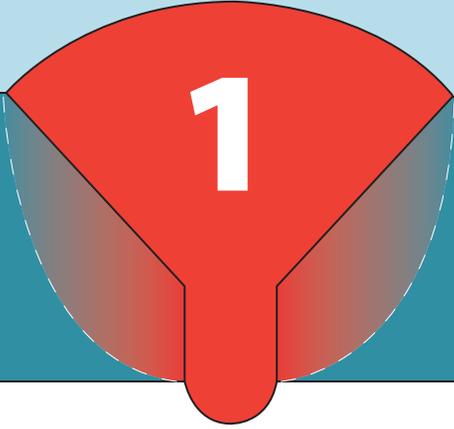
LISTA DE SÍMBOLOS E DE ABREVIATURAS

Símbolos

A	Ampere	m ³	Metro cúbico
Ar	Árgon	mm	Milímetro
°C	Grau Celsius	mm ²	Milímetro quadrado
cm	Centímetro	mm ³	Milímetro cúbico
cm ²	Centímetro quadrado	MPa	Mega Pascal
e	Espessura do material	Nd	Neodímio
f	Folga	nm	Nanometro
He	Hélio	p	Penetração
J	Joule	Pol	Polegada
kg	Quilograma	"	Polegada
kV	Quilovolt	t	Talão
kW	Quilowatt	W	Watt
l	Largura	V	Volt
lb	Libras	α	Ângulo do chanfro
m	Metro	β	Ângulo de biselamento
m ²	Metro quadrado	μm	Micrometro

Abreviaturas

AC	Corrente Alternada (<i>Alternating Current</i>)	IIW	Instituto Internacional de Soldadura (<i>International Institute of Welding</i>)
ASME	Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos (<i>American Society of Mechanical Engineers</i>)	ISO	<i>International Standard Organization</i>
AWS	Sociedade Americana de Soldadura (<i>American Welding Society</i>)	Laser	<i>Light Amplification by Simulated Emission of Radiation</i>
BS	Norma Inglesa (<i>British Standard</i>)	LV	<i>Baixo-Vácuo (Low Vacuum)</i>
CBN	Nitreto de Boro Cúbico (<i>Cubic Boron Nitride</i>)	MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
CI	Corrente Constante (<i>Constant Intensity</i>)	MAG	<i>Metal Active Gas</i>
CNC	Controlo Numérico Computorizado (<i>Computerized Numerical Control</i>)	MV	<i>Médio-Vácuo (Medium Vacuum)</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono	Nd:YAG	Neodímio-Cristal de Ítrio e Alumínio
CRT	Tubo de Raios Catódicos (<i>Cathode Ray Tube</i>)	PD	Polaridade Direta (Eléctrodo ligado ao polo negativo)
CV	Tensão constante (<i>Constant Voltage</i>)	PI	Polaridade Inversa (Eléctrodo ligado ao polo positivo)
CVD	Deposição Química na Fase de Vapor (<i>Chemical Vapour Deposition</i>)	PVD	Deposição física na Fase de Vapor (<i>Physical Vapour Deposition</i>)
DC	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)	RF	Rádio-Frequência
DCEN	Corrente Contínua – Ligação ao Eléctrodo Negativo	TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
DCEP	Corrente Contínua – Ligação ao Eléctrodo Positivo	V ₀	Tensão em Vazio (Volt)
EBW	Soldadura por Feixe de Electrões (<i>Electron Beam Welding</i>)	VPPA	Onda quadrada com polaridade variável (<i>Square Wave AC with Variable Polarity</i>)
EN	Norma Europeia (<i>European Normalization</i>)	WC	Carboneto de Tungsténio (<i>Tungsten Carbide</i>)
EUA	Estados Unidos da América	zl	Zona de Ligação
FM	Fator de Marcha	zf	Zona Fundida
HV	Alto-Vácuo (<i>High Vacuum</i>)	ZTA	Zona termicamente afetada
icc	Intensidade de Corrente de Curto-Circuito (Ampere)		



1

INTRODUÇÃO À SOLDADURA

1.1

Introdução aos processos
de ligação

1.2

A soldadura

1.3

Classificação dos processos
de soldadura

1.4

Nomenclatura usada
na soldadura

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.

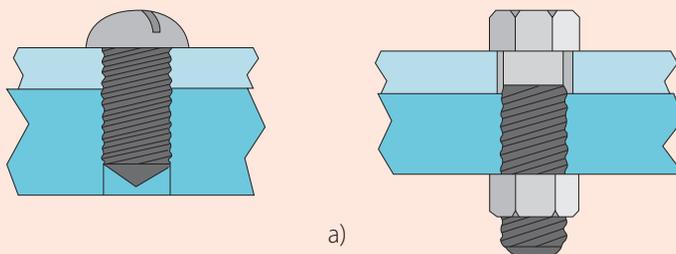
As tecnologias sumativas têm como ponto de partida formas normalizadas, bastante simples, sendo a forma complexa requerida pelo produto final construída através da junção de diversas formas simples. Neste caso, são utilizados muitas vezes semiprodutos, tais como chapas, barras, cantoneiras ou tubos, 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.



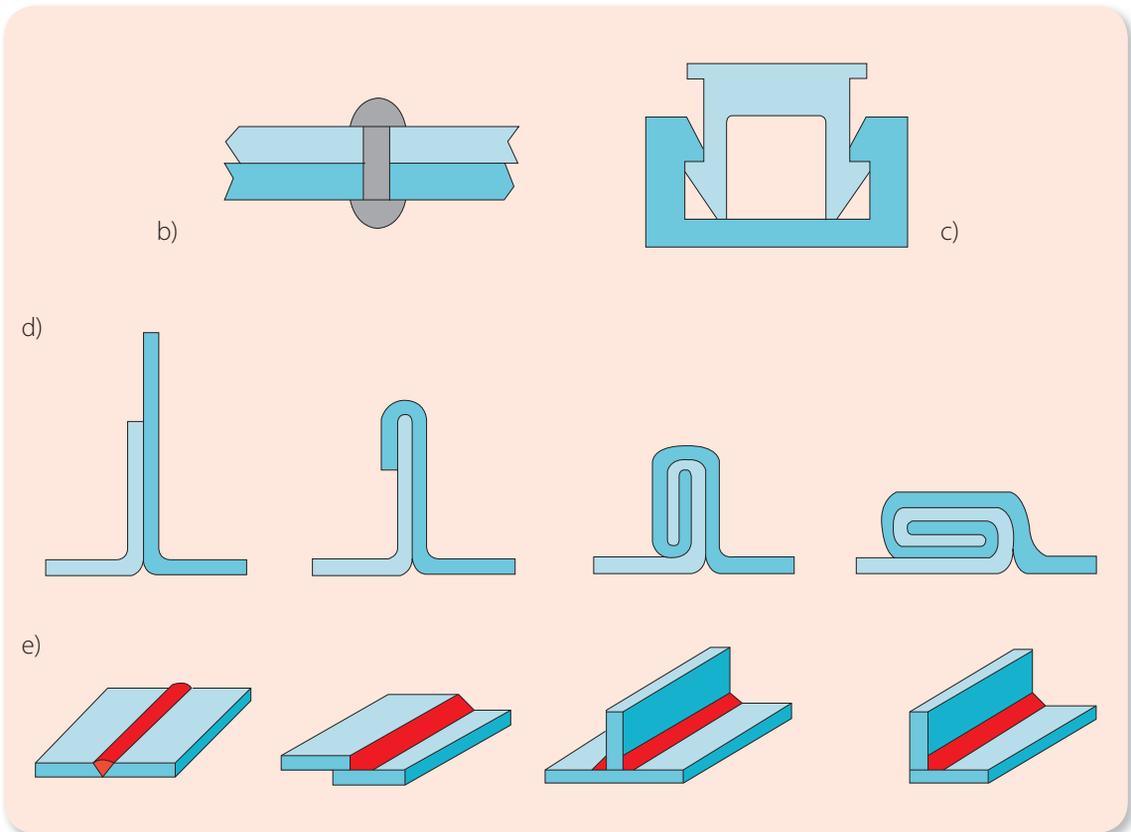


Figura 1 - Diversos tipos de união: (a) aparafusamento, (b) rebitagem, (c) montagem rápida, (d) conformação plástica e (e) soldadura.

1.2. A Soldadura

Na presença de um leque variado de processos de união, poderá colocar-se uma questão: Porquê usar a soldadura como método de ligação?

Esta questão tem algumas respostas evidentes:

- É um dos processos de junção de peças metálicas com uma melhor relação custo – benefício;
- Permite a ligação de uma grande gama de espessuras: desde algumas décimas de milímetro, até algumas dezenas de centímetros;
- É extremamente versátil, podendo ser aplicada a uma variada gama de materiais, formas e dimensões.

As juntas produzidas por soldadura:

- São inamovíveis e permanentes;
- Normalmente ultrapassam a resistência patenteada pelos materiais de base ligados;
- Asseguram a continuidade metálica;
- São reprodutíveis;
- Podem ser inspecionadas por técnicas não – destrutivas;
- Podem ser realizadas em oficina ou em estaleiro, unindo materiais sob a forma de chapas, tubos, placas, perfis, etc.

Pelas razões atrás referidas, e ainda por razões económicas e de processo, a soldadura é fortemente utilizada na construção metalomecânica, na construção naval e ferroviária e na construção civil. Em Portugal, a construção soldada assume hoje particular relevância em muitos edifícios públicos, grandes superfícies comerciais e também em naves industriais.

A soldadura por fusão é um dos processos mais seguros (quando devidamente realizado) e mais comumente utilizado. No entanto, devido aos fenómenos metalúrgicos que se desenvolvem num curto espaço de tempo, o processo torna-se complexo, sendo necessário um apertado controlo de todas as variáveis envolvidas na sua realização.



Figura 2 - Bicicleta cujo quadro é fabricado em construção soldada.



Figura 3 - Estrutura metálica, contendo construção soldada, nas estruturas do Aeroporto Francisco de Sá Carneiro (Porto).



Figura 4 - "Chopper" onde os americanos tentam ir à perfeição, em termos de soldaduras e *design*.

No essencial, a soldadura poderá recorrer a dois processos de base relativamente simples para poder ser realizada:

- a fusão, através de energia fornecida por via elétrica ou pela queima de um gás ou mistura gasosa, dando origem à união pela mistura dos materiais fundidos (material de base e material de adição);
- através de energia mecânica, por vezes auxiliada também pelo calor, provocando, neste caso, um caldeamento do material. Neste caso, recorre-se normalmente ao atrito ou ao impacto para atingir os objetivos pretendidos.

1.3. Classificação dos Processos de Soldadura

Existindo uma enorme variedade de processos de soldadura, torna-se necessário proceder a uma organização dos mesmos, classificando-os. Sucede porém que os processos de soldadura poderão ser divididos em classes tendo em conta diversos fatores.

Assim, é apresentado de seguida um quadro que visa proceder a uma classificação, segundo o critério de estado do material de base e material de adição, respetivamente, durante a ligação:

Tabela 1 - Classificação dos processos de soldadura segundo o estado dos materiais de base e de adição.

Líquido/Líquido	Sólido/Líquido	Sólido/Sólido
Fusão	Brasagem / Soldobrasagem	Pressão
Eléctrodo Revestido	Brasagem Fraca	Explosão
MIG – MAG	Brasagem Forte	Difusão
Fios Fluxados		Fricção
TIG		Ultrassons
Plasma		Pressão a Frio
Arco Submerso		Rolamento
Resistência		Indentação
Oxiacetilénica		Pressão com Chama
Eletroescória		Forjagem
Eletrogás		Estampagem
Laser		
Feixe de Electrões		

No entanto, os processos de soldadura também se podem classificar segundo o modo de protecção da soldadura durante a sua realização. Isso mesmo pode ser observado na tabela seguinte:

Tabela 2 - Classificação dos processos de soldadura segundo o modo de protecção da soldadura.

Protecção Gasosa	Protecção Sólida	Protecção Mista	Sem Protecção
Gás ou Mistura Gasosa	Escória	Gás + Escória	
MIG – MAG	Eléctrodo Revestido	Fio Fluxado	Resistência
TIG	Arco Submerso		Fricção
Plasma			Laser
			Feixe de Electrões

A soldadura poderá também ser classificada segundo a fonte de energia necessária para a fusão do material de adição e do material de base (quando aplicável). Essa classificação está patente na tabela seguinte.

Tabela 3 - Classificação dos processos de soldadura segundo a fonte de calor utilizada.

Electricidade	Gás	Mecânica
Eléctrodo Revestido	Oxi - Acetilénica	Fricção
MIG – MAG	Brasagem Forte	Explosão
Fio Fluxado		Indentação
TIG		Ultrassons
Arco Submerso		
Plasma		
Resistência		
Laser		
Feixe de Electrões		
Brasagem Fraca		

Por vezes, a aplicabilidade de alguns processos está restrita a alguns materiais, não podendo ser aplicado de forma universal. Para além disso, a própria espessura do material base também condiciona a aplicação de alguns processos. Ambas as restrições acima descritas têm como principais problemas dois fatores: a capacidade de cada processo passar o calor para a junta e as propriedades físicas do material de base: temperatura de fusão e condutividade térmica. Na tabela seguinte poderão ser observadas algumas restrições existentes.

Tabela 4 - Adequabilidade dos processos de soldadura a cada uma das ligas metálicas mais usuais
(Adaptado de AWS – *Welding Processes*, Vol. 2).

MATERIAIS	Espessura (mm)	PROCESSOS DE SOLDADURA												
		ELÉTRODO REVESTIDO	MIG-MAG	FIO FLUXADO	TIG	PLASMA	ARCO SUBMERSO	RESISTÊNCIA	OXIACETILÉNICA	BRASAGEM	FRICÇÃO	LASER	FEIXE DE ELETRÕES	DIFUSÃO
Aço ao Carbono	<3	S	S	--	S	--	S	S	S	S	S	S	S	--
	3-6	S	S	S	S	--	S	S	S	S	S	S	S	--
	6-19	S	S	S	--	--	S	S	S	S	S	S	S	--
	>19	S	S	S	--	--	S	--	S	--	S	--	S	--
Aço de Baixa Liga	<3	S	S	--	S	--	S	S	S	S	S	S	S	S
	3-6	S	S	S	S	--	S	S	--	S	S	S	S	S
	6-19	S	S	S	--	--	S	--	--	S	S	S	S	S
	>19	S	S	S	--	--	S	--	--	S	S	--	S	S
Aço Inoxidável	<3	S	S	--	S	--	S	S	S	S	S	S	S	S
	3-6	S	S	S	S	S	S	S	--	S	S	S	S	S
	6-19	S	S	S	--	S	S	--	--	S	S	S	S	S
	>19	S	S	S	--	S	S	--	--	--	S	--	S	S
Ferro Fundido	<3	--	--	--	--	--	--	--	S	S	--	--	--	--
	3-6	S	--	--	--	--	--	--	S	S	--	--	--	--
	6-19	S	S	S	--	--	S	--	S	--	--	--	--	--
	>19	S	S	S	--	--	S	--	--	--	--	--	--	--
Alumínio e suas ligas	<3	S	S	--	S	S	--	S	--	S	S	S	S	S
	3-6	S	S	--	S	--	--	S	--	S	S	S	S	S
	6-19	S	S	--	S	--	--	--	--	S	S	--	S	--
	>19	S	S	--	--	--	--	--	--	--	S	--	S	--
Cobre e suas ligas	<3	S	S	--	S	S	--	--	S	S	S	--	S	--
	3-6	S	S	--	--	S	--	--	--	S	S	--	S	--
	6-19	S	S	--	--	--	--	--	--	S	S	--	S	--
	>19	S	S	--	--	--	--	--	--	S	S	--	--	--
Níquel e suas ligas	<3	S	S	--	S	S	--	S	S	S	S	S	S	--
	3-6	S	S	--	S	S	S	S	--	S	S	S	S	--
	6-19	S	S	--	--	S	S	--	--	S	S	--	S	--
	>19	S	S	--	--	--	--	--	--	--	S	--	S	--
Titânio e suas ligas	<3	--	S	--	S	S	--	S	--	--	S	S	S	S
	3-6	--	S	--	S	S	--	--	--	--	S	S	S	S
	6-19	--	S	--	S	S	--	--	--	--	S	S	S	S
	>19	--	S	--	--	--	--	--	--	S	S	--	S	S

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.

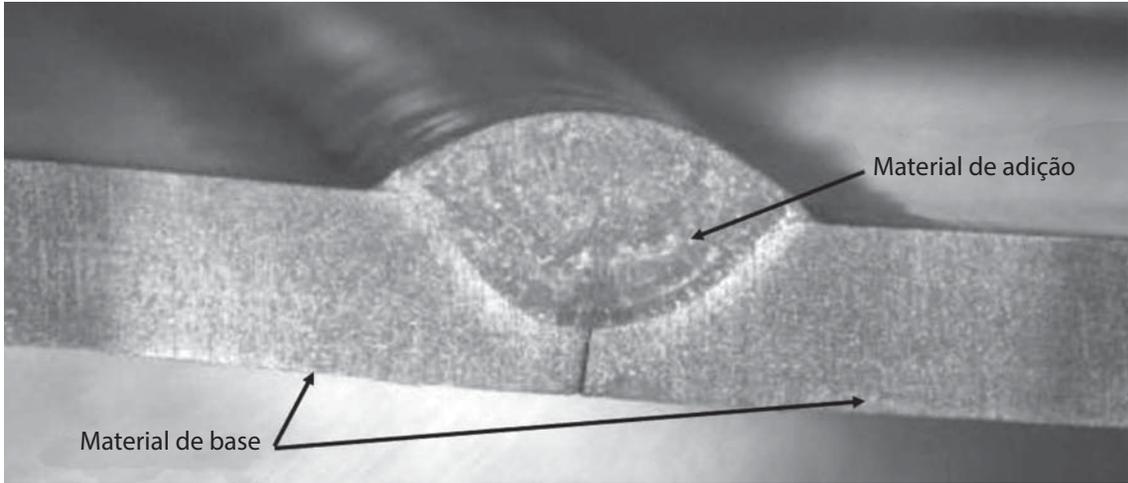


Figura 5 - Conceito de material de base e material de adição.

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.

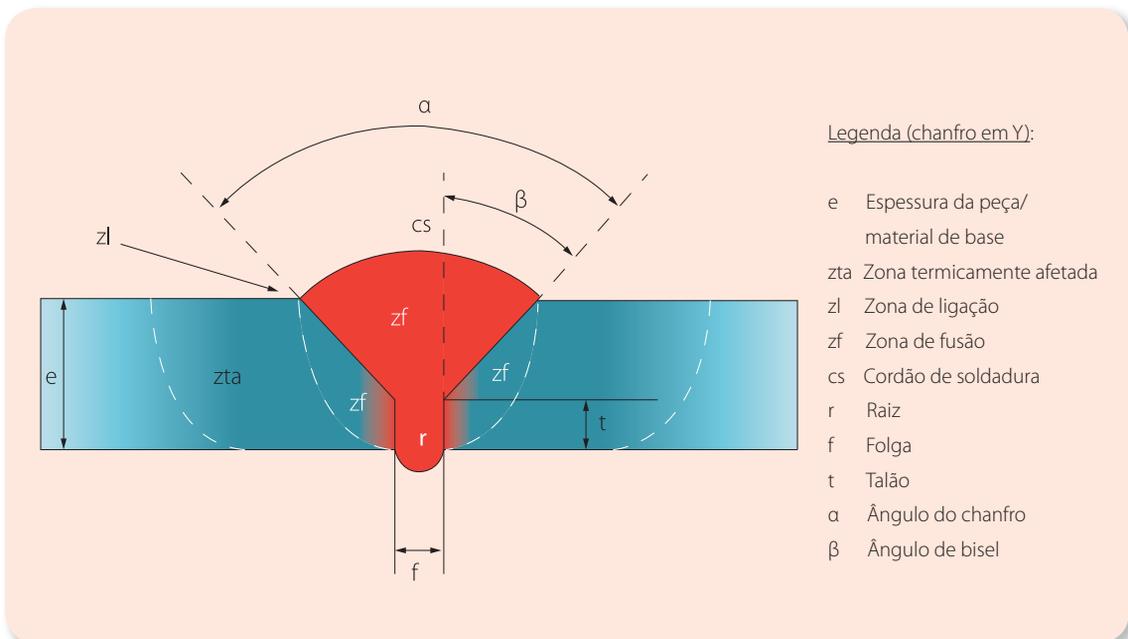
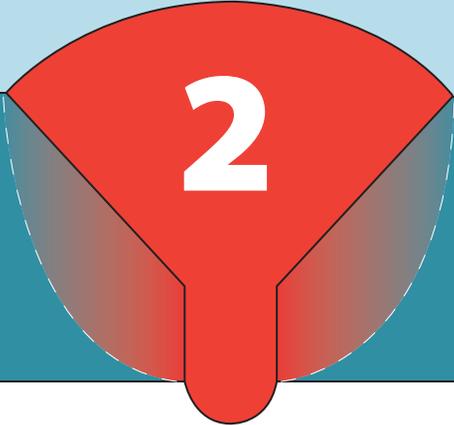


Figura 6 - Representação esquemática de uma junta soldada e respetiva nomenclatura.



2

PREPARAÇÃO E CODIFICAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS

2.1

Preparação de juntas soldadas

2.2

Simbologia de soldadura

2.3

Sistemas de apoio à soldadura

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.

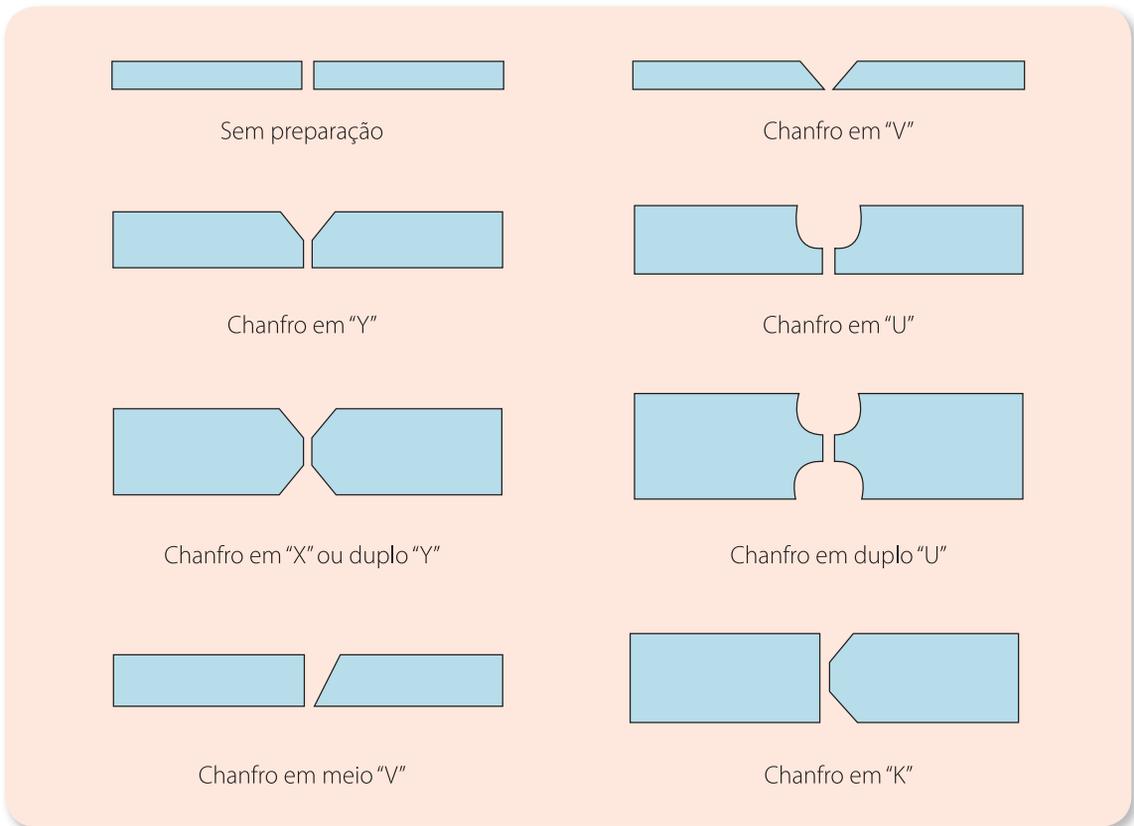
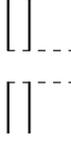
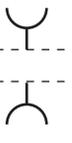
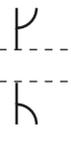
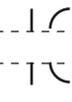


Figura 16 - Algumas configurações para o tipo de preparação a efetuar com vista à realização de juntas soldadas.

Tabela 5 - 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
							

Depois da abertura dos chanfros, deverá ser efetuada outra limpeza das superfícies a unir, garantindo que não ficam rebarbas ou arestas vivas (prejudiciais à soldadura), assim como resíduos provenientes do processo de arranque de apara (limalhas, aparas, óleos de corte, etc.).



Figura 17 - Rebarbadora equipada de forma apropriada para a realização de chanfros em peças planas.



Figura 18 - Equipamento apropriado para a abertura de chanfros em peças planas (Ananda Shipyard and Slipways, Ltd.).



Figura 19 - Imagem do equipamento TRUMPF TruTool TKF 2000 para abrir chanfros até 20 mm de espessura.



Figura 20 - Imagem do chanfro realizado numa virola (www.irvon.co.uk em 25.02.2013).

As imagens mostradas nas figuras anteriores permitem perceber quão importante este tipo de operação é, tanto pelo rigor exigido como pela quantidade de situações em que é necessário, ao ponto de existirem equipamentos dedicados unicamente a este fim, como é o caso do TRUMPF TruTool TKF 2000, preparado para abrir chanfros em chapas, tanto em linha reta como em superfícies curvilíneas, até 20 milímetros de profundidade numa única passagem. A necessidade de abrir chanfros tanto em placas lisas como onduladas, retas ou curvilíneas, em placas planas ou em tubos, foi dando origem ao aparecimento de uma diversidade enorme de equipamentos que, ainda se torna maior pelas dificuldades impostas ao corte por alguns materiais. Assim, existem sistemas de corte por arranque de apara e sistemas de gás, que apresentam uma enorme versatilidade da cabeça de corte, até sistemas de corte laser que, dado estarem normalmente agregados a sistemas CNC e facilmente possuírem mais de 3 eixos, tornam-se também extremamente versáteis para este fim, principalmente para placas e tubos mais espessos, embora o preço seja ainda algo elevado.

Para materiais de corte mais difícil, como os Aços inoxidáveis, Aços duplex, ligas de Níquel e ligas de Titânio, quando a espessura o justifica, deixa-se de usar a maquinagem para passarmos a utilizar o corte por plasma. No corte de Aço comum (ao Carbono ou de baixa liga), o oxicorte nem sempre deixa a superfície suficientemente lisa, sendo necessário rebarbagem posterior.

2.1.2. Limpeza

Após a execução do chanfro nas peças a soldar, é frequente ficarem algumas rebarbas nas superfícies onde se vai realizar a soldadura. Para além disso, é comum as chapas de Aço possuírem camadas de Óxidos mais ou menos profundas, dependendo do tempo e condições de armazenamento. É ainda frequente existirem películas gordurosas junto às superfícies onde o material de adição vai ser depositado. Todos estes fatores interferem negativamente na operação de soldadura, podendo provocar defeitos mais ou menos graves na resistência da junta. Assim, torna-se necessário executar algumas operações prévias de limpeza antes de realizar a soldadura.

Estas operações deverão consistir essencialmente nas seguintes etapas:

- Limpeza de rebarbas: esta operação é efetuada normalmente com uma lima, a qual é passada com vigor ao longo das arestas da junta, por forma a remover as referidas rebarbas, principalmente em peças de pequeno porte. Em peças mais pesadas ou volumosas, é comum proceder-se ao esmerilhamento ou granalhagem das mesmas;
- Limpeza de óxidos, a qual pode ser efetuada de duas formas distintas:
 - » Com uma escova de arame, a qual é friccionada com força ao longo das superfícies a ligar, até que a superfície esteja completamente liberta dos óxidos, situação que se pode controlar visualmente através da avaliação da cor da superfície. Esta operação, apesar de menos poluente e mais expedita, poderá não ser totalmente satisfatória, dependendo da perícia do operador;
 - » Com produtos químicos próprios, tais como o Ácido Sulfúrico (Cobre), Ácido Nítrico (Latão), Ácido Clorídrico (Aços ao Carbono ou inoxidáveis) ou Hidróxido de Sódio (Alumínio). Desde a aplicação destes produtos até à completa remoção da camada de Óxidos, existe um período de tempo que se torna necessário respeitar. Também é comum proceder-se à imersão das peças nesses produtos, otimizando assim o processo. Como estes produtos químicos e os produtos resultantes da sua ação são nefastos aos metais de base e à ligação propriamente dita, torna-se necessário proceder à sua limpeza em água quente, seguida de secagem em corrente de ar quente. Deve no entanto referir-se que estes processos químicos são mais frequentemente utilizados na remoção de películas gordurosas presentes nas superfícies;
- Limpeza de gorduras: o procedimento é semelhante ao anterior, utilizando-se produtos tais como o Tetracloreto de Carbono, o Tricloreto de Etileno e detergentes alcalinos como o Fosfato Trisódico ou o Silicato de Sódio, seguindo-se uma lavagem em água e secagem em ar quente.

2.2. Simbologia de Soldadura

A simbologia é extremamente útil na soldadura, tal como qualquer outro meio de referência usado no projeto mecânico. No fundo, trata-se de um código que, de uma forma simples, traduz a ideia do projetista a quem tem que realizar a obra, permitindo ainda que o trabalho seja facilmente controlado por terceiros, no que toca à geometria.

Em termos mundiais existem vários códigos, consoante as normas vigentes em cada país. No entanto, existem dois códigos, correspondentes às normas ISO e AWS que se destacam, devido à universalização do seu uso, a primeira mais usada na Europa, enquanto a segunda se utiliza mais na América (tanto nos EUA e Canadá, como na América do Sul). A norma ISO tem como referência a norma BS EN 22553 e tem a referência ISO 2553, enquanto a norma AWS possui a referência AWS a2.4. Na maior parte dos projetos que circulam no Espaço Europeu, é utilizada a norma ISO, pelo que lhe será dado destaque. No entanto, a norma AWS, devido ao seu uso corrente em países como o Brasil, será também abordada.

Os conceitos diferem entre elas, pelo que é necessário entender perfeitamente qual a norma que se está a interpretar. Embora existam algumas outras diferenças, será de salientar essencialmente duas que, pela sua importância e frequência, são dignas de registo:

- Interpretação do lado da junta: na norma ISO 2553 é necessário ter em atenção que a linha a cheio (contínua) representa o lado pelo qual é efetuada a soldadura (lado para onde aponta a seta), enquanto a linha a tracejado representa o lado contrário àquele pelo qual é realizada a soldadura (lado contrário àquele para onde aponta a seta).

Resumindo, do lado da linha a cheio representa-se a simbologia relativa ao lado para onde aponta a seta, enquanto do lado da linha a tracejado se representa a simbologia do cordão a efetuar do lado contrário àquele para onde aponta a seta. De referir que a linha a tracejado é normalmente representada por baixo da linha a cheio, mas poderão existir situações em que o projetista possa representar a linha a tracejado por cima da linha a cheio. O raciocínio anterior mantém-se: a simbologia sobre a linha a tracejado diz respeito ao lado contrário para onde aponta a seta, enquanto a simbologia agregada à linha a cheio corresponde à soldadura a efetuar do lado da seta;

- Na norma AWS, como só existe uma linha a cheio, tudo o que está representado por cima da linha diz respeito ao lado contrário da junta para onde aponta a seta, enquanto a simbologia colocada pela parte inferior da linha a cheio diz respeito à soldadura a produzir do lado da junta para onde aponta a seta;
- Nas juntas compridas com cordões interrompidos, a forma de indicar o comprimento dos cordões e o intervalo entre eles também é significativamente diferente. Na norma ISO indica-se o número de cordões, o comprimento dos mesmos e a distância que medeia dois cordões consecutivos, enquanto na norma AWS se indica apenas o comprimento de cada cordão e o passo entre cordões (distância entre dois pontos homólogos de cordões consecutivos).

Neste texto serão abordados essencialmente os aspetos teóricos de cada uma das simbologias, sendo apresentados ainda alguns exemplos. Recomenda-se ainda a leitura das referidas normas, as quais apresentam inúmeros exemplos que permitirão consolidar os conhecimentos nesta matéria.

De salientar que este texto não pretende substituir as normas aqui referidas, pelo que é aconselhada a leitura detalhada das mesmas, principalmente a todos os que possam ter necessidades específicas de interpretação de projetos.

2.2.1. Simbologia segundo a norma ISO 2553

Na figura seguinte poderá ser observada a disposição das diferentes indicações segundo a norma ISO 2553 (BS EN 22553). Logo à partida, poderá verificar-se que a seta possui a linha auxiliar a tracejado, indicando que:

- As indicações que estão por cima dizem respeito ao cordão a ser efetuado do lado para onde aponta a seta;
- As indicações na parte inferior, ou seja, abaixo da linha da seta e do lado da linha a tracejado, dizem, respeito ao cordão de soldadura que deverá ser realizado no lado contrário àquele para onde aponta a seta.

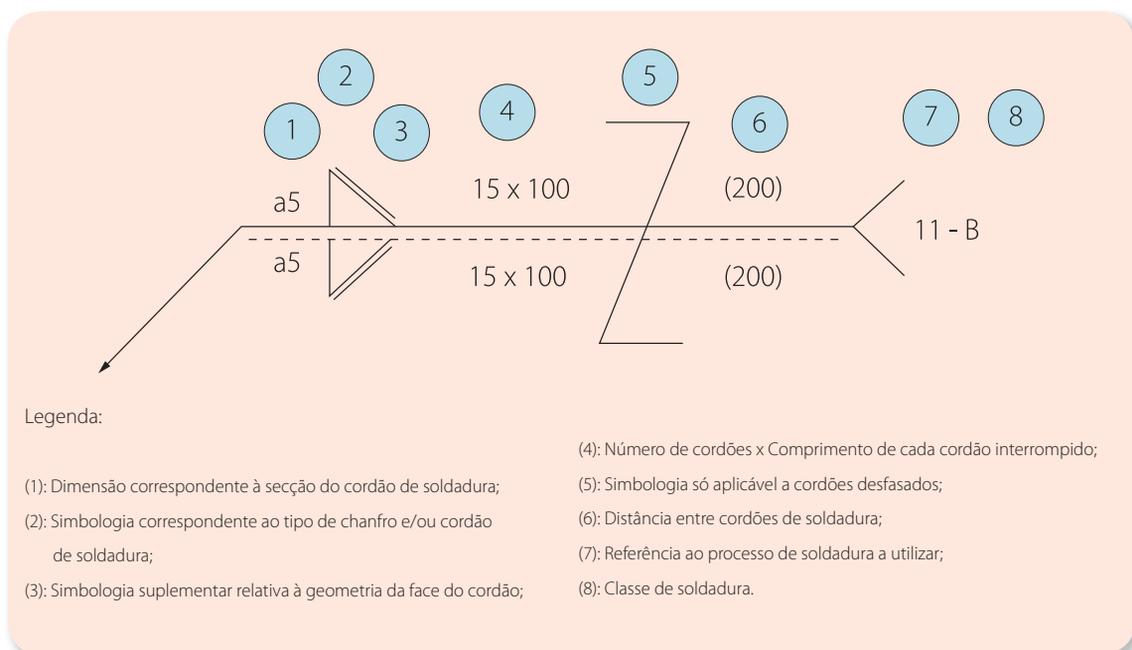


Figura 21 - Representação esquemática e teórica da simbologia segundo a norma ISO 2553.

A figura anterior é ainda acompanhada por outras tabelas auxiliares que visam complementar e sistematizar a informação contida nos símbolos usados. Estas tabelas são mostradas seguidamente, com o intuito de permitir uma correta interpretação da simbologia ISO 2553.

A Figura 22 complementa a informação já anteriormente referida, enquanto a Figura 23 está associada à geometria da face do cordão, a qual pode ser muito importante em determinadas situações, onde um cordão convexo perturbaria, por exemplo, o deslizamento de outro componente sobre a sua superfície.

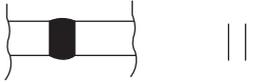
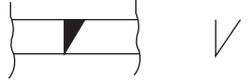
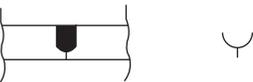
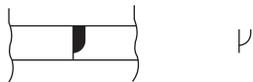
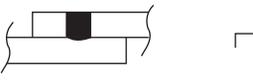
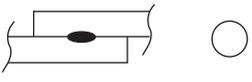
Símbolos de Soldadura		
<p>Sem preparação</p> 	<p>Chanfro em V</p> 	<p>Chanfro em meio-V</p> 
<p>Chanfro em U</p> 	<p>Chanfro em J ou meio-U</p> 	<p>Passe de confirmação</p> 
<p>Cordão em fillet</p> 	<p>Preenchimento</p> 	<p>Ponto de soldadura</p> 

Figura 22 - Simbologia correspondente à preparação das juntas, segundo a norma ISO 2553.

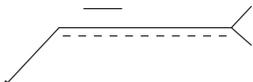
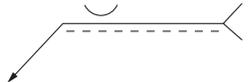
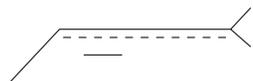
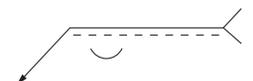
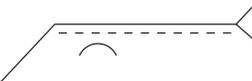
Símbolos Suplementares		
Cordão Plano	Cordão Convexo	Cordão Côncavo
<p>Lado mais próximo</p> 	<p>Lado mais próximo</p> 	<p>Lado mais próximo</p> 
<p>Lado mais afastado</p> 	<p>Lado mais afastado</p> 	<p>Lado mais afastado</p> 

Figura 23 - Simbologia suplementar correspondente à geometria da face dos cordões, segundo a norma ISO 2553.

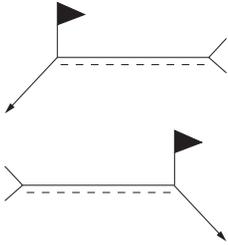
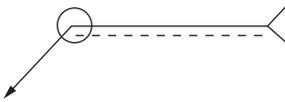
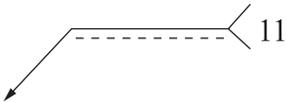
Símbolos Complementares para a Soldadura		
Soldadura em Estaleiro	Soldadura a toda a volta	Identificação do processo
		

Figura 24 - Simbologia complementar para a identificação de situações particulares, segundo a norma ISO 2553.

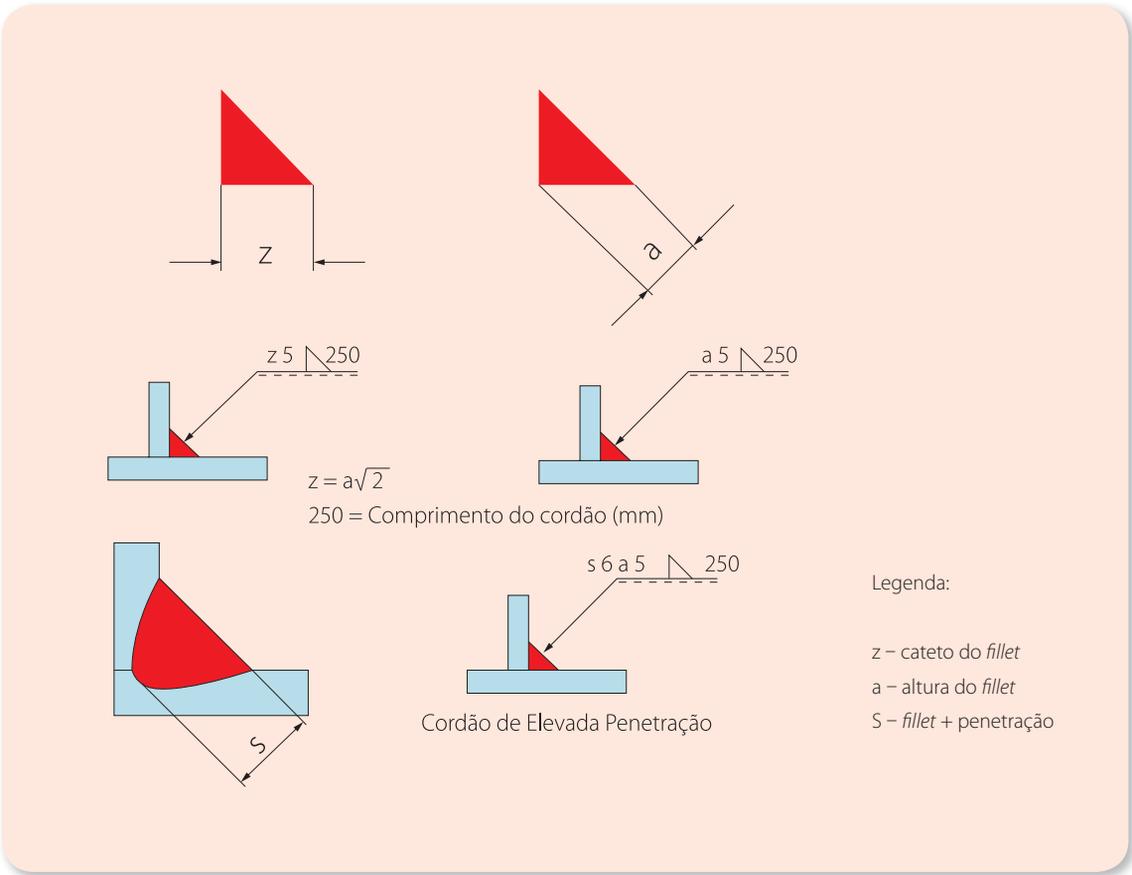


Figura 25 - Representação das dimensões do cordão, segundo a norma ISO 2553.

Seguidamente serão apresentados alguns exemplos que podem ajudar à aplicação e interiorização dos conceitos descritos nas figuras esquemáticas anteriores.

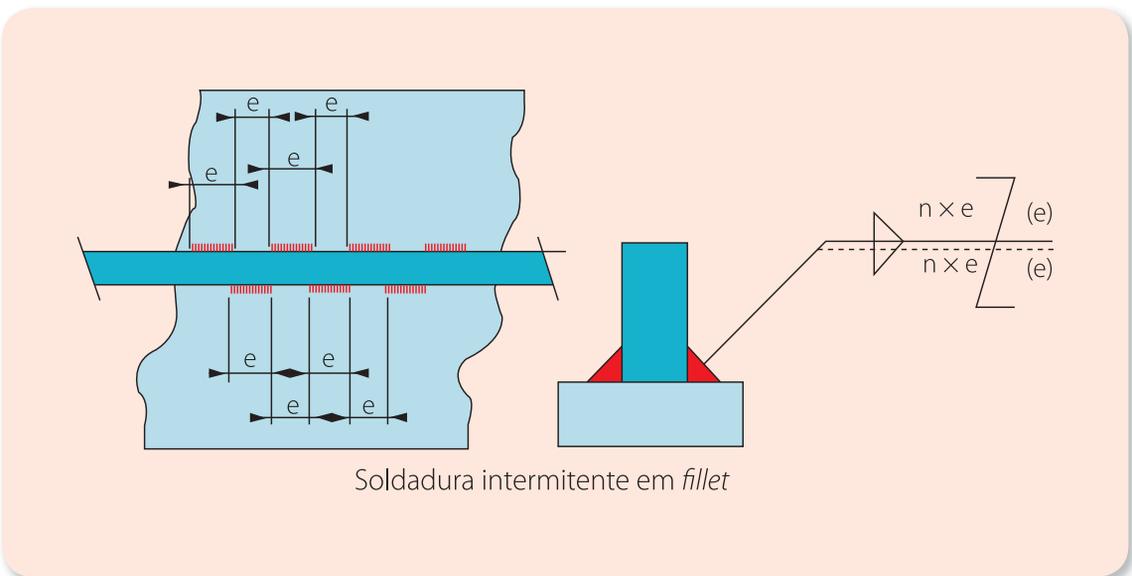


Figura 26 - Simbologia utilizada em cordões intermitentes, segundo a norma ISO 2553.

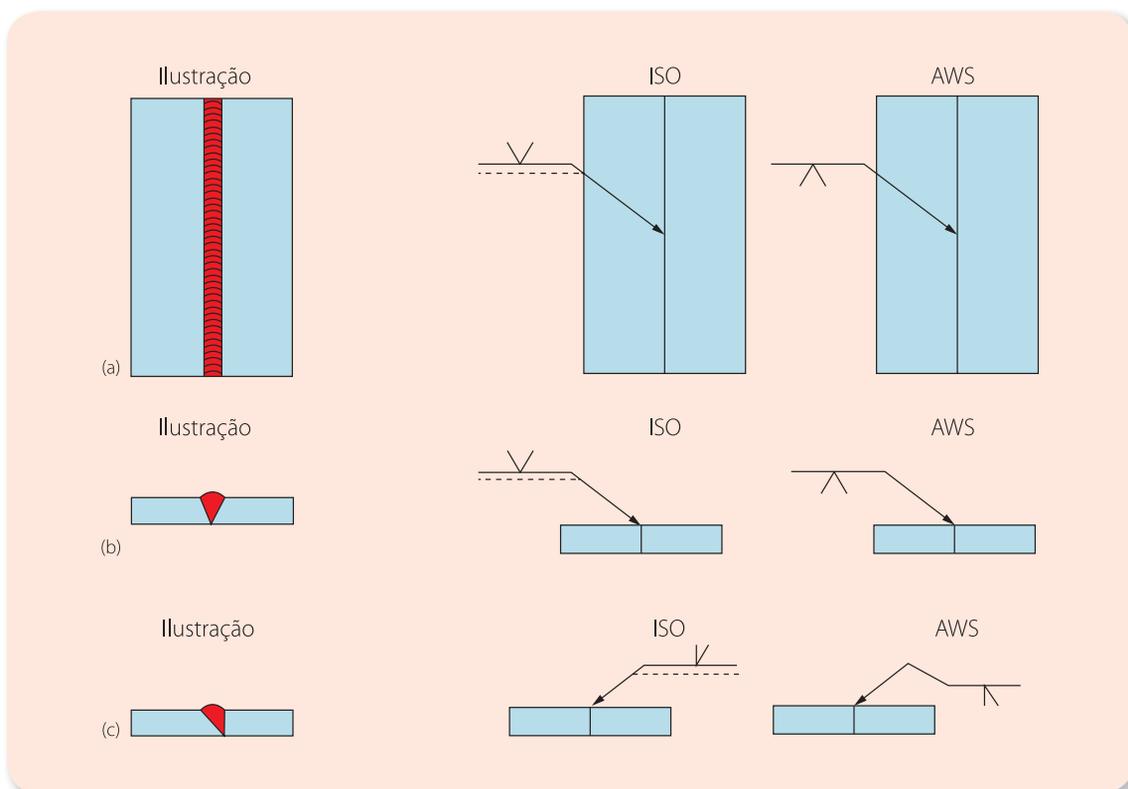


Figura 27 - Exemplo ilustrativo da aplicação da norma ISO 2553 e sua comparação com a norma AWS a2.4 (Gregory and Armstrong, 2005).

Atendendo à primeira linha da Figura 27, etiquetada com a letra (a) e correspondente a uma vista superior, verificamos que na representação da simbologia ISO 2553, a linha a cheio está por cima e a linha a tracejado por baixo. Se a simbologia está colocada sobre a linha a cheio, indica que a soldadura deverá ser realizada no lado para onde aponta a seta (a linha a tracejado representa o lado contrário), o que indica que terá que ser efetuado um chanfro em “V”, cuja raiz ficará no lado contrário da chapa, enquanto a maior abertura do “V” ficará na face superior da chapa (conferir na representação da linha (b)). Já na representação AWS, a simbologia terá que estar do lado inferior à linha da seta, pois é este o lado que indica que a soldadura deverá estar no lado para onde aponta a seta. A linha (b) representa a mesma peça, mas com vista de perfil. O exemplo da linha (c) destina-se apenas a consolidar conhecimentos, já que representa as mesmas peças, mas agora com uma preparação diferente.

Observando a linha (c), há mais um pormenor a assinalar: quando as preparações são efetuadas em apenas uma das duas peças a ligar, a seta deverá apontar para a peça que vai sofrer a preparação. Daí a seta estar a apontar da direita para a esquerda, indicando que a peça da esquerda é que sofrerá a preparação em “meio V”.

O mesmo poderá ser observado na Figura 28 (a1), embora, nestes casos, a preparação seja sempre realizada na peça que se vai entroncar com a peça principal (a vertical). De referir ainda nesta figura a cota assinalada. De facto, a Figura 28 (a1) refere como cota “z6”, o que nos informa que o cateto do cordão é de 6 milímetros. Se nos indicasse “a6”, a medição teria que ser efetuada de outra maneira, e as dimensões do cordão seriam outras, em termos de secção reta, ou seja, estaríamos a referir-nos à altura do cordão (ver figura 25).

De referir ainda que na Figura 28 estão descritos dois exemplos, um dizendo respeito às imagens (a) e (a1), e outro referente às imagens (b) e (b1), usando sempre a norma ISO 2553. Deverá ainda ser observado que a representação de um chanfro em “meio V” se faz de forma diferente de uma soldadura em *fillet*.

Em complemento, deverá ainda ser referido que a Figura 28 (a) contempla cordões que preenchem o chanfro, mas, simultaneamente, produzem um cordão em *fillet*, no exterior. Isso leva a que seja necessária uma dupla representação para cada um dos lados da peça adjacente, ou seja, a simbologia correspondente ao chanfro em “meio V” e o símbolo de *fillet* por

7

SOLDADURA TIG

7.1

Princípio do processo

7.5

Gases de proteção no processo TIG

7.9

Vantagens e limitações do processo

7.2

Equipamento necessário à soldadura pelo processo TIG

7.6

Parâmetros de soldadura

7.10

Soldadura TIG através do método *Keyhole*

7.3

Os elétrodos de Tungsténio

7.7

Tensão no arco

7.11

Soldadura por pontos através do processo TIG

7.4

Material de adição no processo TIG

7.8

Técnica operativa

7.12

Aplicações do processo TIG

O processo TIG (*Tungst Inert Gas*) segue, em geral, os princípios atrás referidos para os outros processos baseados no arco elétrico. No entanto, tanto em termos técnicos como operatórios, o processo assume diferenças significativas, as quais serão descritas de forma pormenorizada neste texto. Conforme o nome indica, o processo utiliza apenas gás inerte e assenta num eléctrodo de Tungsténio não-consumível para estabelecer e manter o arco necessário à soldadura. No que concerne à produtividade e materiais ao qual se aplica, existem também diferenças assinaláveis, conforme poderá ser observado mais adiante. É um processo que, quando devidamente utilizado, proporciona elevados níveis de qualidade e soldaduras com um aspeto bastante característico.

7.1. Princípio do processo

Tal como os processos anteriormente referidos, este utiliza também um arco elétrico como fonte de calor para proceder à fusão do material de base e de adição (quando necessário), numa atmosfera protetora de gás inerte. No entanto, existem desde logo algumas particularidades que tornam este processo bastante diferente daqueles que até agora foram vistos, nomeadamente:

- Até ao momento, o eléctrodo portador da corrente elétrica era simultaneamente o material de adição, o qual se ia consumindo e passando para o banho de fusão. No caso do TIG, o eléctrodo de Tungsténio, apelidado de eléctrodo não-consumível, serve única e exclusivamente para conduzir a corrente elétrica até à formação do arco, permitindo o seu estabelecimento e manutenção;
- O material de adição pode ou não ser utilizado. Este processo permite que, para espessuras relativamente baixas, se efetue a soldadura sem material de adição (normalmente até 2mm de espessura);
- Quando é utilizado material de adição, este é adicionado ao processo quase sempre de forma manual, e através de uma vareta, que é inserida na zona do arco e vai sendo fundida;
- Este processo só utiliza gás inerte como proteção, ao contrário dos outros até agora vistos.

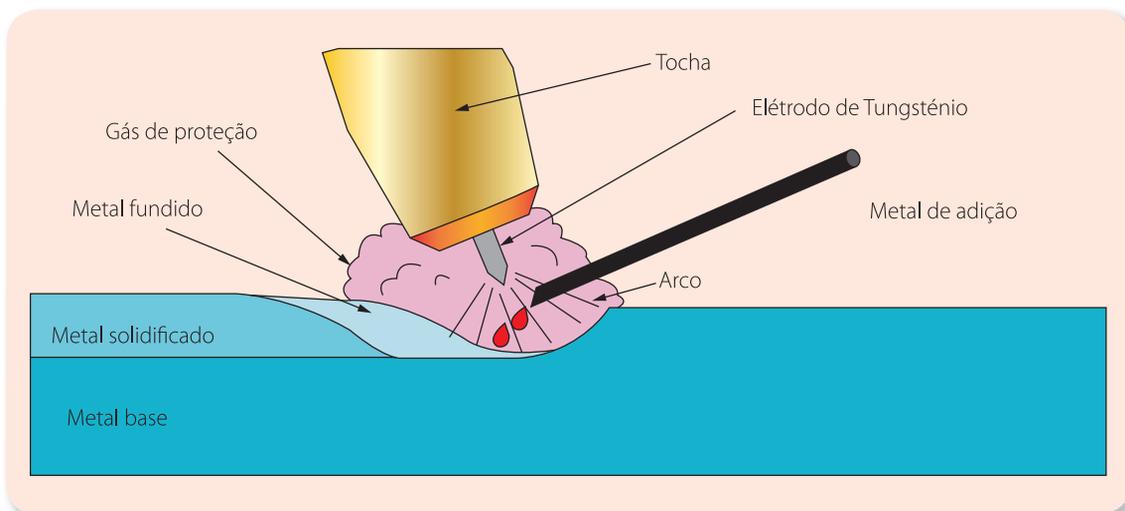


Figura 134 - Representação esquemática do princípio do processo TIG.

Tal como pode ser observado na Figura 134, o material de adição, quando necessário, é inserido na zona de influência do arco sob a forma de vareta nua (ou cobreada, para não oxidar), fundindo e depositando-se na junta, estando as gotículas em trânsito protegidas por uma atmosfera gasosa inerte.

O calor intenso, desenvolvido no processo, permite a utilização de velocidades de soldadura relativamente elevadas. Em muitas aplicações, o processo TIG não utiliza material de adição, recorrendo apenas à fusão do material de base para proceder à sua união. Para a soldadura de espessuras superiores a 8 mm são utilizados normalmente outros processos, já que este deixa de ser competitivo.

O arco elétrico produz-se pela passagem da corrente elétrica através de um gás inerte ionizado. Os átomos ionizados do gás perdem eletrões e adquirem carga positiva. Os iões gasosos carregados positivamente dirigem-se do polo positivo para o negativo do arco, enquanto os eletrões viajam em sentido contrário. A potência posta em jogo no arco (em Watt) é igual ao produto da intensidade de corrente (em Amperes) pela diferença de potencial dissipada no arco (em Volt), à semelhança dos outros processos que utilizam o arco elétrico como fonte de calor para a soldadura.

O arco, além de assegurar o calor necessário à fusão dos materiais, tem também por missão proceder à limpeza da superfície do banho de fusão e do material de base adjacente, assim como de Óxidos superficiais, não sendo necessária a adição de fluxos suplementares destinados a esse efeito. O Tungsténio foi o material eleito para a realização destes elétrodos, devido à sua elevada temperatura de fusão (redução do desgaste a altas temperaturas) e à sua elevada emissividade (escorvamento e ionização facilitados). O gás de proteção deverá mesmo ser inerte, para que a não contaminação do elétrodo de Tungsténio esteja assegurada.

Devido à técnica operatória necessária neste processo, principalmente quando usa material de adição, provoca um aspeto característico da soldadura, conforme poderemos observar na Figura 135, onde cada gota de material fundido a partir da vareta, forma um círculo quando chega ao banho de fusão, misturando-se neste mas, devido à diferença de tempo que medeia o depósito de duas gotas consecutivas, houve já um início de solidificação da gota prévia, o que impede uma maior miscibilidade da gota subsequente no banho. Apesar do aspeto poder indiciar alguma descontinuidade, deverá ser referido o seguinte:

- Mesmo nestas condições, a soldadura possui características mecânicas excelentes;
- O processo caracteriza-se por uma elevada entrega térmica, facto que até exige especificações especiais para o bocal da tocha;
- Apesar da elevada entrega térmica, os cordões são normalmente mais finos do que no processo MIG-MAG ou Elétrodo Revestido, dependendo a Zona Termicamente Afetada da velocidade de soldadura e da regulação dos restantes parâmetros;
- A regularidade do aspeto do cordão dependerá, essencialmente, da perícia do soldador e da regularidade com que este irá provocar a fusão de mais uma gota.



Figura 135 - Aspeto de uma soldadura TIG realizada com material de adição.

7.2. Equipamento necessário à soldadura pelo processo TIG

À semelhança do processo MIG-MAG, o processo TIG também necessita de uma fonte de alimentação (geralmente de corrente contínua), de uma pinça de massa e de uma tocha, a qual, neste caso, serve de suporte ao elétrodo de Tungsténio, fazendo chegar a este a corrente elétrica necessária ao arco e o fluxo de gás necessário à proteção do

arco e banho de fusão. Além disso, torna-se ainda necessária a respetiva garrafa de gás de proteção, bem como os manorredutores a ela associados. De uma forma esquemática, poderemos ver na figura seguinte o conjunto de equipamentos necessários a este processo.

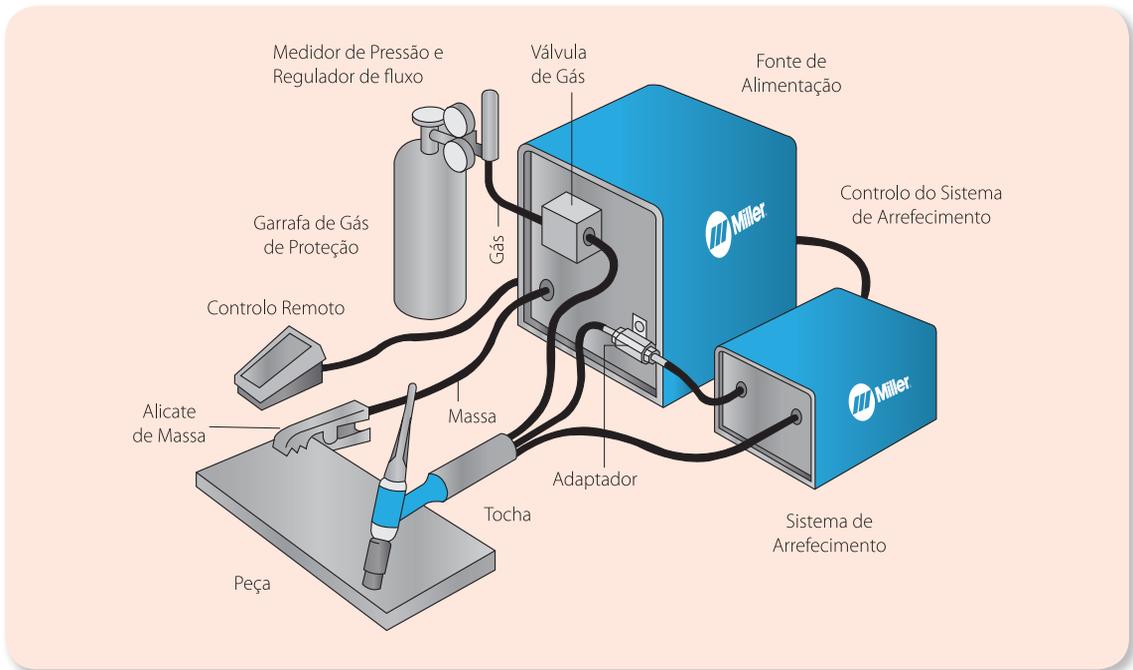


Figura 136 - Representação esquemática dos diferentes equipamentos necessários à soldadura pelo processo TIG (MILLER).

Na prática, os equipamentos para a soldadura TIG poderão possuir potências relativamente limitadas e ser portáteis, ou apresentar grandes dimensões e destinarem-se a postos de trabalho bem delimitados no setor fabril, podendo, mesmo assim, possuir a mobilidade necessária para estarem junto de obras maiores. Tal como referido anteriormente, as fontes são comuns à soldadura com Eléctrodo Revestido e possuem curva característica de Corrente Constante, podendo ser apenas de Corrente Contínua ou possuírem capacidade de fornecimento de Corrente Alternada, para a soldadura de Alumínio, por exemplo. Se forem do tipo *Inverter*, poderão fornecer Corrente Pulsada.



Figura 137 - Equipamentos de soldadura multiprocesso com valências para soldadura TIG e por Eléctrodo Revestido (MILLER).

Na maior parte dos casos, as fontes de alimentação para o processo TIG possuem uma unidade de alimentação de Alta Frequência, que auxilia o processo no escorvamento, principalmente na soldadura de materiais que apresentam tendência à criação de camadas de Óxido na superfície. Nestes casos, um sinal de Alta Frequência sobrepõe-se à corrente de alimentação quando o soldador promove o escorvamento, sendo depois cortado o sinal de Alta-Frequência e continuando a alimentação elétrica normal do processo. O sinal de Alta-Frequência visa essencialmente “furar” a camada de óxidos, que pode ter temperatura de fusão muito superior à patenteada pelo material de base que se pretende soldar, como é o caso do Alumínio e suas ligas.

Existem essencialmente dois tipos de tochas: as que se destinam à soldadura manual e as que se destinam à soldadura automática. Dentro do primeiro grupo, existem as que possuem refrigeração por ar (destinadas a peças de espessura inferior a 2 mm e intensidade de corrente inferior a 200 A) e por água (destinadas a elétrodos com diâmetro até 6 mm e intensidades de corrente que poderão atingir os 700 A em regime intermitente).

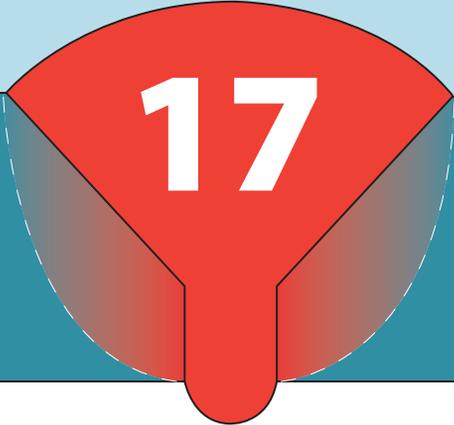
Para efetuar soldadura TIG é ainda necessária uma caixa de comandos, constituída por elétroválvulas, circuito de água, temporizadores de escoamento de gás e comandos de alta-frequência para escorvamento do arco, dispositivos que estão normalmente incorporados na fonte de alimentação.

Os bocais das tochas são normalmente fabricados em material refratário, devido às elevadas temperaturas desenvolvidas no processo, podendo também ser fabricadas em Cobre quando munidas de uma boa refrigeração a água. Enquanto as tochas destinadas a sistemas automáticos não possuem qualquer manípulo de comando, as tochas destinadas a sistemas manuais possuem um botão destinado à ligação da energia elétrica, comando de abertura do gás de proteção e sistema de refrigeração por água.



Figura 138 - Aspeto geral de uma tocha TIG.

As tochas TIG, à semelhança das tochas MIG-MAG, são constituídas por vários acessórios, cada um dos quais com a sua função bem definida: proteger o elétrodo e delimitar a ação do gás (bocal), distribuir o gás pelo bocal (difusor de gás), passar a corrente elétrica para o elétrodo e guiar esse mesmo elétrodo (pinça), isolamento elétrico e térmico (isoladores), fixação e regulação do elétrodo de Tungsténio (pena), punho de trabalho (corpo da tocha), etc.



17

DEFEITOS DE SOLDADURA

17.1

Breve resumo sobre as causas dos defeitos

17.2

Enquadramento normativo

17.3

Classificação principal dos defeitos

A soldadura, apesar de ser um processo largamente utilizado e com benefícios enormes para a indústria metalomecânica no seu global, é um processo extremamente suscetível à geração de defeitos, os quais podem acarretar consequências extremamente graves em serviço. Isso implica que a aplicação da soldadura nem sequer seja equacionada em alguns tipos de produtos, dadas as dificuldades em se obter peças com um elevado nível de confiabilidade, sem a necessidade de passar por um rigoroso controlo de qualidade. Estão neste grupo as indústrias aeroespacial e aeronáutica.

Apesar de algumas indústrias usarem fortemente o processo de soldadura para a fabricação dos seus produtos, as exigências normativas em termos de qualidade exigem controlos certificados a 100%, evitando assim qualquer descuido e falha catastrófica do componente ou produto, o qual pode acarretar frequentemente a perda de vidas humanas. Está incluída neste caso a indústria de colunas para geradores de energia eólica, onde, apesar de serem usados processos automatizados (arco submerso, normalmente), os cordões têm que ser inspecionados cuidadosamente pois, a falha de um equipamento destes, certamente acarretaria enormes prejuízos materiais e, possivelmente, também humanos. Também os reservatórios sujeitos a pressão, caldeiras, permutadores de calor, cisternas e outros produtos afins, estão sujeitos a forte controlo, normalmente efetuado por entidades externas. Mas, antes disso, já teve que existir um forte trabalho na preparação de todos os procedimentos de soldadura, assim como na preparação dos meios necessários para que o processo seja levado a cabo com êxito.

Na maior parte dos processos, a componente de destreza do operador e conhecimento de todos os procedimentos de soldadura são essenciais para que a ligação seja levada a bom termo com pleno sucesso. Assim, não será de estranhar que as necessidades de formação adequada nesta área sejam cada vez maiores em número, e mais exigentes em termos de qualidade de resultados, pois o mercado e as exigências de qualidade efetuadas pelos clientes são cada vez maiores.

Poderá dizer-se que as preocupações acima descritas redundaram no aparecimento de um número particularmente elevado de normas, que regulam quase tudo o que diz respeito à soldadura, desde o material de adição a utilizar, limpeza e preparação das superfícies a unir, até à formação exigida ao soldador, passando ainda por inúmeros itens igualmente importantes, como a simbologia a utilizar ou os procedimentos de realização dos ensaios de verificação.

Os problemas relacionados com a soldadura são normalmente divididos em dois grandes grupos: descontinuidades e defeitos.

As descontinuidades são interrupções na estrutura típica de um material (neste caso, juntas soldadas) nas suas características geométricas, mecânicas, metalúrgicas ou físicas. Uma descontinuidade não é necessariamente um defeito.

Por outro lado, poderá afirmar-se que os defeitos de soldadura são falhas cujo efeito leva um determinado componente a não cumprir com os requisitos mínimos aplicáveis, previamente especificados e normalizados. Estes defeitos irão conduzir à necessidade de reparação do componente ou à sua rejeição.

17.1. Breve resumo sobre as causas dos defeitos

Segundo Clifford Matthews, da ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), entre as causas mais comuns para o aparecimento de defeitos de soldadura figuram as fracas condições na execução do projeto (45%), os erros do operador, onde se inclui a má parametrização do processo (32%), a má execução do processo no que diz respeito à sua técnica e processo selecionado (12%), má conjugação do binómio material base e material de adição (10%), e ainda a má preparação da junta (5%).



Figura 284 - Principais causas para o aparecimento de defeitos de soldadura (Fonte: ASME).

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.

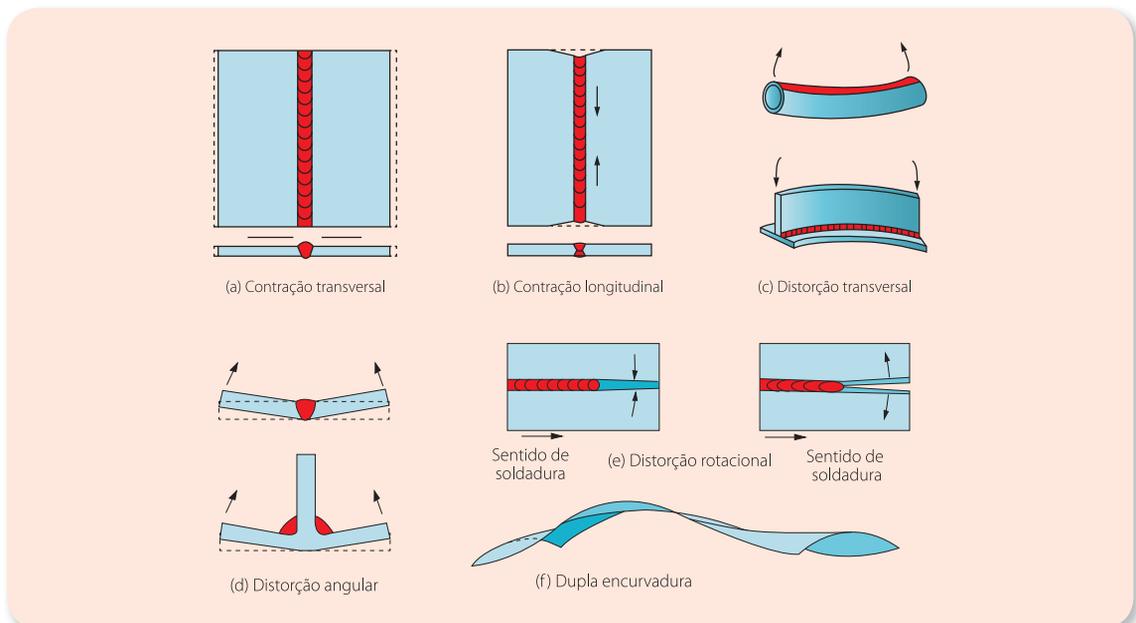


Figura 285- Principais defeitos geométricos (Fonte: kobelko-welding.jp, em 06.01.2014).

Tanto os soldadores inexperientes, como até os mais experientes, têm dificuldade em evitar estes tipos de defeitos. São inúmeras as razões que levam a estas deformações geométricas, mas a mais crítica é o efeito provocado pela expansão e contração do material ao ser soldado. Durante o ciclo de aquecimento e arrefecimento, verifica-se a dilatação e posterior contração do metal, as quais, por não assumirem exatamente as mesmas proporções, dão lugar à deformação. Este tipo de defeito é difícil de evitar, principalmente em peças com maior dimensão e onde não se proceda a um cuidadoso plano de execução de cordões interrompidos. A mudança das propriedades estruturais do material durante o processo de soldadura é um dos fatores que propiciam este tipo de comportamento. De maneira a prevenir ou minimizar a distorção, devem ser adotados os seguintes procedimentos:

- Não preencher em demasia o cordão de soldadura: quanto maior for a deposição de material de adição, maior será a força de contração;
- Usar passes intermitentes: os passes intermitentes podem reduzir o material de adição necessário até 75% e, no entanto, mantêm a resistência necessária à coesão;
- Usar técnica operatória adequada: efetuar cordões parciais alternados, relativamente distanciados, por forma a evitar um aquecimento exagerado da zona de soldadura, a qual se vai refletir numa maior deformação associada;
- Usar o menor número de passes: o uso de um elétrodo de maior diâmetro dá à união das peças soldadas a mesma robustez, comparativamente a vários passes com um elétrodo de menor diâmetro, sendo evitados alguns ciclos térmicos de expansão e contração do material;
- Antecipar a distorção angular: prever o comportamento do material durante o processo permite definir a estratégia adequada para minimizar o efeito de distorção angular. O que se pretende neste caso, é dotar a junta de um pré-posicionamento que antecipará a tendência de deformação da peça a soldar de forma a atingir, no final do processo, a geometria pretendida, sem necessidade de reparação.

A antecipação dos fenómenos de distorção angular poderá ser observado na figura seguinte, onde, na coluna da esquerda são efetuados todos os cordões de um lado da junta, e só depois são efetuados os cordões do outro lado, enquanto na coluna da direita os cordões são efetuados alternadamente de um lado e do outro da junta, promovendo uma deformação alternada, que se vai compensando, e que permite chegar ao fim da soldadura com um equilíbrio geométrico muito melhor, ou seja, aquele que é habitualmente requerido.

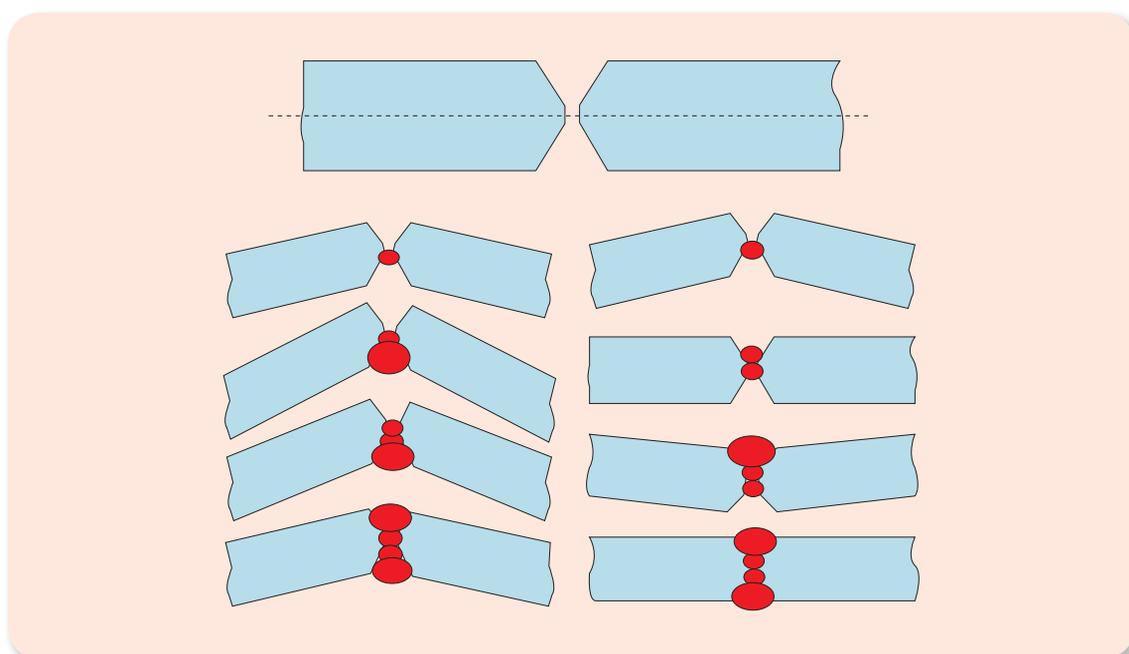


Figura 286 – Técnica operatória que permite antecipar o efeito de distorção angular (coluna da direita) e a mesma soldadura, efetuada sem preocupações de compensação desse efeito (coluna da esquerda) (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014).

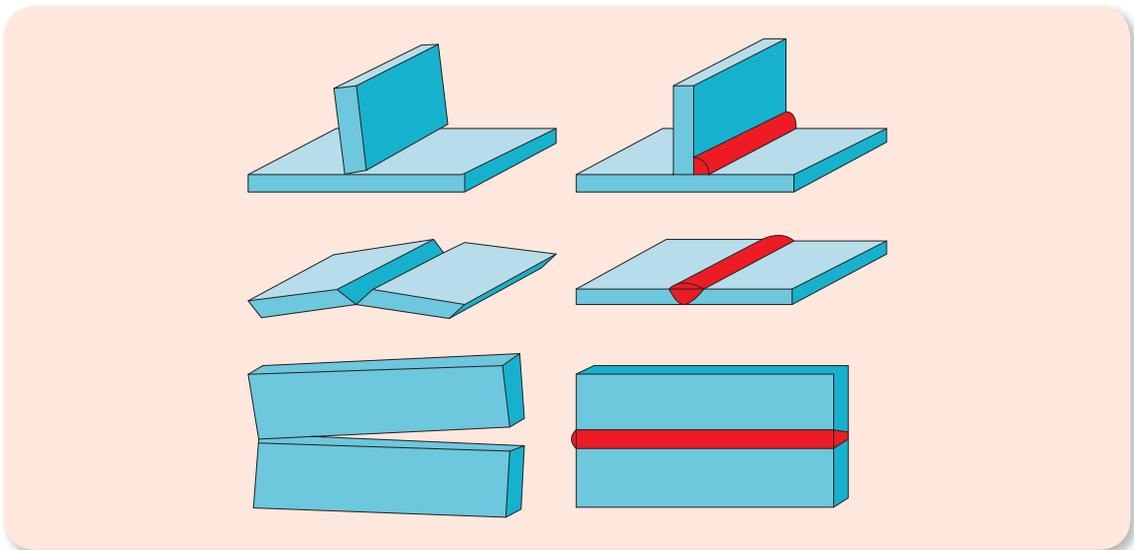


Figura 287 – Técnicas que permitem antecipar o efeito de distorção angular (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014).

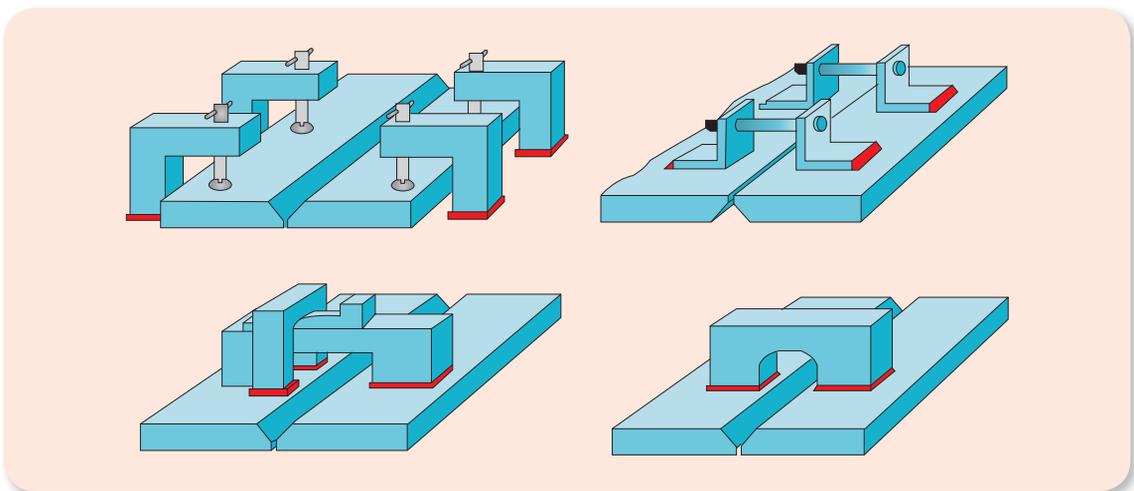


Figura 288 – Técnicas de fixação para evitar a distorção (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014).

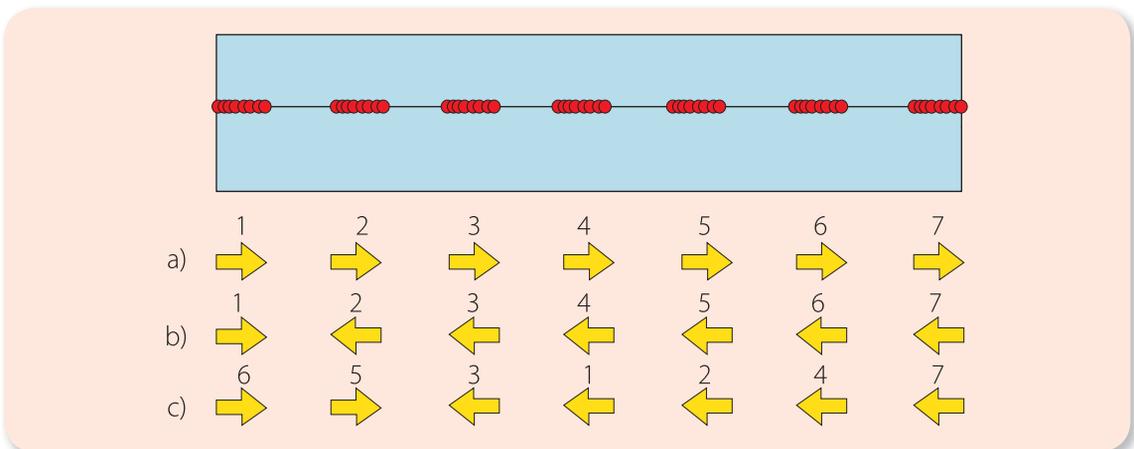


Figura 289 – Sequência de passes para evitar a distorção (Fonte: twi.co.uk, em 06.01.2014).



Figura 290 – Efeito de contração registado numa soldadura topo-a-topo de duas chapas de aço, em que é possível observar o efeito de dupla encurvadura, isto é, tanto no sentido longitudinal como transversal (Fonte: hera.org.nz, em 06.01.2014).

Os defeitos, possíveis causas e eventuais soluções são descritos na tabela abaixo. No entanto, importa salientar que a experiência e técnica do operador, no que diz respeito ao planeamento da operação, são preponderantes para o sucesso da mesma. Podem ser evitados em grande parte, se forem elaborados os respetivos procedimentos de soldadura onde a sequência, método, material de adição e os restantes parâmetros, se encontrarem convenientemente definidos para a correta execução da soldadura.

Tabela 43 – Causas e possíveis soluções para defeitos geométricos.

DEFEITO	CAUSAS	SOLUÇÕES
Distorção angular Contração	• Soldadura em excesso.	<ul style="list-style-type: none"> • Pré-deformação. • Utilização de gabaritos. • Diminuir o calor entregue no processo, ajustando os parâmetros. • Escolha correta dos chanfros e da sequência de soldadura. • Controlar o arrefecimento da peça. • Escolher o consumível (elétrodo ou fio) adequado para o trabalho que está a realizar.
	• Inexperiência do operador.	
	• Excesso de calor aplicado no processo.	
	• Sequência de soldadura incorreta.	
	• Elevado número de passes.	
	• Velocidade de soldadura lenta.	
Flexão/Torção	<ul style="list-style-type: none"> • Além das causas da distorção angular e da contração, salienta-se o uso de material de base com espessuras reduzidas. 	

17.3.1.2. Excesso de material

O defeito de excesso de material verifica-se quando é fundido material de adição em demasia na junta, verificando-se que sobeja, tanto na raiz como no topo do cordão, o qual resulta, normalmente, de má técnica operatória. O excesso de material de adição causa uma zona favorável à concentração de tensões, que por sua vez resulta numa quebra da resistência à fadiga do cordão de soldadura.

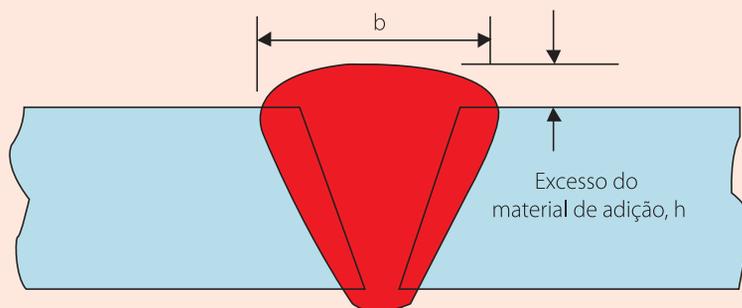


Figura 291 – Diagrama esquemático de excesso de material de adição no topo da junta de soldadura (Adaptado de: twi.co.uk, em 06.01.2014).

A detecção visual deste defeito poderá ser realizada com o auxílio de um comparador. No entanto, também é possível recorrer ao uso de radiografia como método de detecção deste defeito. Nas duas imagens seguintes poderá observar-se a forma de controlo deste defeito.

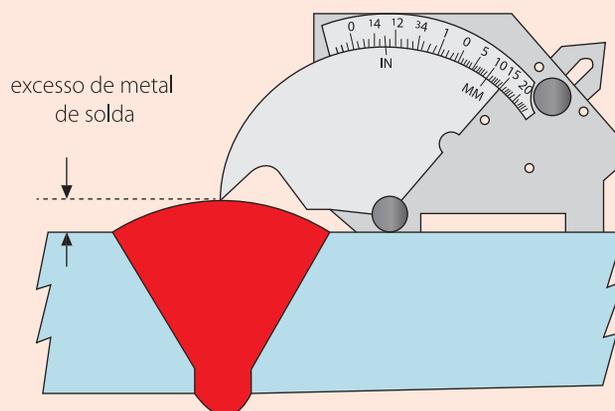


Figura 292 – Diagrama esquemático da medição de excesso de material de adição com um comparador.

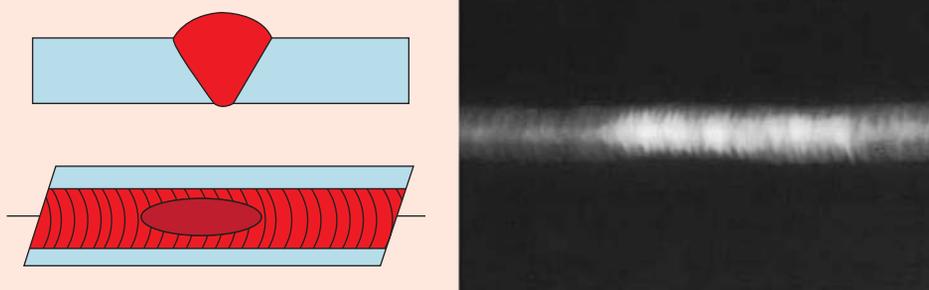


Figura 293 – Detecção de excesso de material através de Raios-X.

Sobre o livro

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 Eléctrodo 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

Concluiu em 2002 o Doutoramento em Engenharia Mecânica na FEUP e em 1997 o Mestrado em Engenharia Mecânica – Materiais e Processos de Fabrico na mesma faculdade. Em 1992 licenciou-se em Engenharia Mecânica no ISEP e, em 1988 finalizou o Bacharelato de 4 anos em Engenharia Mecânica no mesmo Instituto Superior. Concluiu ainda com êxito uma Especialização em Materiais e Processos de Fabrico (INEGI/FEUP) em 1990. Atualmente, é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto (ISEP), onde exerce a sua atividade profissional desde dezembro de 1995. É diretor do Mestrado em Engenharia Mecânica do ISEP desde novembro de 2014, Diretor da Pós-Graduação em Maquinagem Avançada também no ISEP (edições de 2015 e 2016), Subdiretor do Departamento em Engenharia Mecânica (2014-2016), Responsável do Grupo de Docentes de Materiais e Processos de Fabrico no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP desde 2014. 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, 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, orientando e coorientando alunos de mestrado e doutoramento, no ISEP e na FEUP, quase sempre no âmbito de protocolos celebrados com a indústria, 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.

É Co-Editor-in-Chief de duas revistas internacionais, revisor de várias revistas internacionais conceituadas e autor e coautor de várias dezenas de artigos científicos em revistas de elevado fator de impacto, na área da Engenharia Mecânica.

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.

Patrocínios:



ISBN: 978-989-723-062-2

www.engebook.com

