

TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

**UMA ABORDAGEM AO MUNDO
DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS**

JORGE ALEXANDRE SILVA

AUTOR

Jorge Alexandre dos Santos Pinheiro da Silva

TÍTULO

Tratamentos Térmicos dos Aços

— Uma abordagem ao mundo dos tratamentos térmicos

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

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

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

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados

Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: info@booki.pt · www.booki.pt

REVISÃO TÉCNICA

Prof. Altino de Jesus Roque Loureiro

DESIGN

Delineatura – Design de Comunicação · www.delineatura.pt

APOIOS

ALPHATHERM – High Performance Furnaces

TRATERME – Tratamentos Térmicos

WELDOTHERM GmbH

GH INduction

NEWINTEC QUALITY SYSTEMS, S.L.

IMPRESSÃO

Novembro, 2020

DEPÓSITO LEGAL

462307/19



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

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2020 | Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

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

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

CDU

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

ISBN

Papel: 9789898927910

Ebook: 9789898927927

Catálogo da publicação

Família: Engenharia Mecânica

Subfamília: Materiais/Metalúrgica

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	XI
NOTA DE ABERTURA	XIII
PREFÁCIO	XV
1. INTRODUÇÃO	19
1.1. O ferro	19
1.2. Constituição da matéria.....	20
1.3. Solidificação dos metais.....	22
1.4. Estruturas cristalinas	23
1.5. Formas alotrópicas do ferro	24
1.6. Soluções sólidas intersticiais	26
1.7. Estrutura dos grãos.....	27
1.8. Difusão dos átomos.....	27
2. DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO OU DE FASES.....	31
2.1. Breve introdução aos diagramas de equilíbrio.....	31
2.2. Ligas ferro-carbono	34
2.2.1. Diagrama de equilíbrio das ligas ferro-carbono.....	34
2.2.2. Estudo de arrefecimento de uma liga com 0,4% de carbono.....	35

3. CONSTITUINTES MICROSCÓPICOS DOS AÇOS.....	41
3.1. Aços recozidos	41
3.1.1. Ferrite (ferro α).....	41
3.1.2. Cementite (Fe ₃ C)	42
3.1.3. Perlite.....	42
3.1.4. Austenite (ferro γ).....	43
3.2. Aços temperados.....	43
3.2.1. Austenite residual.....	44
3.2.2. Martensite	45
3.2.3. Bainite.....	47
3.2.4. Carbonetos.....	49
3.2.5. Trostite.....	49
3.2.6. Sorbite.....	50
3.2.7. Ledeburite	50
4. INFLUÊNCIA DE DIVERSOS FATORES NA TÊMPERA DOS AÇOS.....	53
4.1. Influência da composição química.....	54
4.1.1. Influência dos elementos de liga	57
4.1.2. Temperabilidade	64
4.1.2.1. Curvas em U	65
4.1.2.2. Procedimento de Grossmann.....	66
4.1.2.3. Ensaio Jominy.....	68
4.2. Influência do tamanho de grão.....	71
4.3. Influência da dimensão das peças.....	77
4.4. Influência do meio de arrefecimento.....	78
5. ALTERAÇÃO DE VOLUME E DEFORMAÇÃO DOS AÇOS NOS TRATAMENTOS TÉRMICOS	81
5.1. Alterações dimensionais.....	82
5.1.1. Mudanças de volume por dilatação e contração térmica.....	82
5.1.2. Mudança de volume devido à modificação dos constituintes.....	82
5.1.3. Variações na forma e dimensões das peças devido às deformações plásticas a quente e devido ao arrefecimento rápido das peças	82
5.2. Exemplos de deformações na têmpera dos aços	83
5.2.1. Arrefecimento em água em apenas uma zona de uma peça em aço com 30% de níquel.....	83
5.2.2. Arrefecimento em água de um redondo de 25 mm de aço austenítico com 30% de níquel	84
5.2.3. Têmpera em água de um redondo de 15 mm de aço de ferramenta ao carbono	85

5.2.4.	Têmpera em água de um cubo de aço ao carbono com 0,90% de carbono.....	86
5.2.5.	Têmpera de anéis de aço por jato de água pelo interior.....	86
5.2.5.1.	No caso de um aço austenítico com 30% de níquel.....	86
6.	TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS.....	89
6.1.	Noções de base.....	89
6.1.1.	Transformação isotérmica da austenite.....	90
6.1.2.	Transformação em arrefecimento contínuo da austenite.....	92
6.1.3.	Prática de tratamentos térmicos.....	94
6.1.3.1.	Posicionamento da carga no forno.....	94
6.1.3.2.	Temperatura de enformamento.....	94
6.1.3.3.	Taxa de aquecimento, temperatura e duração do estágio.....	95
6.1.3.4.	Lei de arrefecimento.....	95
6.1.3.5.	Uniformidade de temperaturas.....	95
6.2.	Tratamento térmico de têmpera.....	96
6.2.1.	A execução do tratamento térmico de têmpera.....	96
6.2.2.	Meios de arrefecimento.....	100
6.2.2.1.	Algumas características dos principais meios de arrefecimento.....	103
6.2.2.2.	Técnicas de têmpera.....	113
6.3.	Tratamento térmico de revenido.....	116
6.3.1.	Etapas de revenido.....	117
6.3.1.1.	Primeira etapa – entre os 80 °C e 200 °C.....	117
6.3.1.2.	Segunda etapa – entre os 200 ° e 300 °C.....	118
6.3.1.3.	Terceira etapa – entre os 300 °C e 400 °C.....	118
6.3.1.4.	Quarta etapa – entre os 400 °C e A1.....	119
6.3.1.5.	Quinta etapa para os aços ligados – endurecimento secundário.....	119
6.3.2.	Influência da temperatura e tempo de revenido.....	120
6.3.3.	Fragilização por revenido.....	123
6.3.3.1.	Fragilização ao azul (260 a 370 °C).....	124
6.3.3.2.	Fragilização Krupp (400 a 570 °C).....	125
6.3.3.3.	Fragilização dos aços rápidos (500 a 570 °C).....	126
6.4.	Tratamento térmico de recozimento.....	127
6.4.1.	Recozimento de homogeneização.....	128
6.4.2.	Recozimento de amaciamento.....	128
6.4.2.1.	Recozimento de amaciamento sem austenitização.....	128
6.4.2.2.	Recozimento de amaciamento com austenitização.....	129
6.4.3.	Recozimento de recristalização.....	130
6.4.4.	Recozimento de redução de tensões residuais.....	130
6.5.	Tratamento térmico de normalização.....	131

7. TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DOS AÇOS.....	135
7.1. Tratamento térmico de têmpera por indução.....	135
7.1.1. Aços próprios para têmpera por indução	142
7.1.2. Vantagens e limitações do endurecimento superficial por indução	144
7.1.3. Indutores	145
7.1.4. Problemas práticos no processo de têmpera por indução	146
7.2. Tratamentos termoquímicos dos aços.....	151
7.2.1. Atmosferas.....	151
7.2.2. Cementação	155
7.2.2.1. Cementação a baixa pressão e cementação iônica	161
7.2.2.2. Aços de cementação	162
7.2.3. Nitração.....	163
7.2.3.1. Nitração iônica.....	166
7.2.3.2. Aços próprios para nitrurar	168
7.2.3.3. Vantagens e limitações da nitração	169
7.2.4. Nitrocarburação.....	170
7.2.4.1. Comparação entre nitrocarburação e nitração	171
7.2.5. Carbonitração	174
7.2.6. Determinação de capas.....	178
8. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS.....	181
8.1. Classificação quanto à composição química.....	182
8.2. Classificação quanto ao teor em carbono	183
8.2.1. Teor em carbono relativamente ao eutectoide.....	183
8.2.2. Teor real em carbono	183
8.3. Classificação quanto ao grau de desoxidação.....	183
8.4. Classificação quanto ao modo de processamento	184
8.5. Classificação quanto à sua constituição estrutural	184
8.5.1. Ferríticos	185
8.5.2. Perlíticos	185
8.5.3. Austeníticos.....	185
8.5.3.1. Austeníticos estáveis.....	185
8.5.3.2. Austeníticos instáveis.....	186
8.5.4. Martensíticos	186
8.5.5. Ledeburíticos	187
8.6. Classificação quanto à sua aplicação.....	187
8.6.1. Aços para construção	187
8.6.2. Aços para ferramentas.....	188
8.6.3. Aços especiais	188

8.7. Classificação quanto à sua dureza no estado recozido.....	188
8.8. Designação normalizada dos aços	189
8.8.1. Sistema americano (AISI-SAE)	189
8.8.2. Sistema alemão (DIN)	190
8.8.2.1. Sistema de abreviatura DIN	191
8.8.3. Sistema francês (AFNOR – NF).....	192
8.8.3.1. Aços não ligados.....	193
8.8.3.2. Aços não ligados especiais.....	193
8.8.3.3. Aços não ligados finos.....	194
8.8.3.4. Aços fracamente ligados.....	194
8.8.3.5. Aços fortemente ligados.....	195
8.8.4. Sistema europeu/português (EN).....	195
9. DESIGNAÇÃO CONVENCIONAL DAS CARACTERÍSTICAS E TRATAMENTOS PARA METAIS FERROSOS	197
10. TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLDADURAS.....	201
10.1. A soldadura e os seus efeitos	202
10.1.1. A soldadura dos aços – aspetos metalúrgicos.....	202
10.2. Tipos de tratamento térmico associados.....	204
10.2.1. Pré-aquecimento	205
10.2.2. Pós-aquecimento.....	212
10.2.3. Tratamento térmico após soldadura (PWHT) / Alívio de tensões.....	213
10.3. Equipamento e procedimentos.....	219
10.4. Tratamento por resistências elétricas.....	224
10.5. Isolamento.....	225
10.6. Tratamento por combustão (gás) e por indução.....	227
10.6.1. Tratamento térmico com recurso à tecnologia de combustão (gás).....	227
10.6.2. Tratamento térmico com recurso à tecnologia de indução.....	228
10.7. Ciclo de tratamento térmico e referenciais normativos.....	230
11. MEDIÇÃO E CONTROLO DE TEMPERATURAS.....	237
11.1. Termopares	237
11.1.1. Tubos de proteção.....	238
11.1.2. Calibração de termopares.....	241
12. CONTROLO DE QUALIDADE NOS TRATAMENTOS TÉRMICOS	245
12.1. Introdução ao conceito de qualidade	246

12.2. A qualidade nos tratamentos térmicos.....	247
12.2.1. Requisitos base	247
12.2.2. Recursos humanos.....	249
12.2.3. Inspeção.....	252
12.2.4. Equipamento para a realização dos tratamentos térmicos.....	252
12.2.5. Estudo e medição da uniformidade da temperatura dos fornos de tratamento térmico	259
12.2.6. Controlo de registos e documentos.....	264
12.2.7. Atividade de tratamentos térmicos.....	265
12.2.8. O procedimento e especificação de tratamento térmico	265
12.2.9. Instruções de trabalho.....	266
12.2.10. Número de pontos de medição	266
12.2.11. Regras gerais para o tratamento térmico localizado (PWHT) de soldaduras em tubagem.....	267
12.2.12. Registos de tratamento térmico.....	268
12.2.13. Não conformidades e ações corretivas.....	275
12.2.14. Registos da qualidade	277

13. ALUSÕES GERAIS À IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE NOS PROCESSOS DE TRATAMENTO279

ANEXOS	CCLXXXIII
BIBLIOGRAFIA.....	CCXCV
ÍNDICE DE FIGURAS	CCCVII
ÍNDICE DE TABELAS	CCCXV
ÍNDICE REMISSIVO	CCCXIX

1. INTRODUÇÃO

1.1. O ferro

O ferro puro não tem aplicação industrial, pois não possui resistência mecânica apreciável. Aparece, por sua vez, formando ligas. O principal elemento de liga do ferro é o carbono. Nas ligas de ferro, o carbono pode estar dissolvido no ferro, como acontece no caso dos aços, ou então encontrar-se em agregados atômicos mais ou menos vastos, constituindo a grafite, como é o caso dos ferros fundidos. Isto é dependente da quantidade de carbono na liga e de fatores de arrefecimento. Assim, chamaremos aços a todas as ligas de ferro-carbono em que o teor de carbono é inferior a 2,11%.

As ligas ferro-carbono com mais de 2,11% de carbono são designadas por ferros fundidos.

Antes de avançarmos para o estudo das ligas ferro-carbono, será feita uma pequena introdução à constituição da matéria.

1.5. Formas alotrópicas do ferro

Existem na natureza elementos que têm a propriedade de se apresentarem com várias redes cristalinas. A esta propriedade chamamos alotropia. A alotropia é um fenômeno associado à ocorrência de um mesmo elemento em distintas formas denominadas modificações alotrópicas ou elementos alótropos.

Geralmente, a alotropia ocorre devido a estruturas cristalinas diferentes no sólido e é particularmente predominante nos grupos 14, 15 e 16 da tabela periódica.

A título de exemplo, poderemos referir o oxigênio com duas formas alotrópicas: o oxigênio (O_2) e o ozônio (O_3). Estes dois alótropos possuem configurações moleculares diferentes.

Um dos elementos em que a alotropia também se torna evidente é o carbono, que pode apresentar-se sob diversas formas, como é demonstrado na figura 1.4., embora o único elemento existente nos três casos seja o carbono, a razão das grandes diferenças encontra-se no arranjo dos átomos.

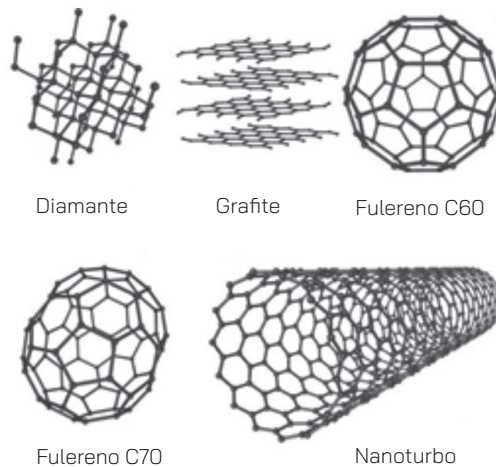


Figura 1.4. Representação esquemática dos alótropos de carbono.

O ferro puro também apresenta variedades alotrópicas dependentes totalmente da temperatura (enantiotropia):

2. DIAGRAMAS DE EQUILÍBRIO OU DE FASES

2.1. Breve introdução aos diagramas de equilíbrio

Os diagramas de equilíbrio ou de fases são representações gráficas que indicam, para diferentes temperaturas, pressões e composições, quais as fases presentes num sistema material. Estes diagramas são determinados em condições de arrefecimento lento. Na maioria dos casos o equilíbrio é quase atingido, mas nunca completamente.

Estes diagramas permitem assim o estudo do comportamento dos metais no processo de fusão e de solidificação. De igual forma fornecem informação quanto ao comportamento dos cristais acabados de formar, à composição da mistura, bem como quanto às proporções relativas em cada momento da solidificação, como veremos de seguida.

O estado de equilíbrio termodinâmico das ligas metálicas é estudado por intermédio destes diagramas.

O teor de ferrite vai aumentando com o decréscimo da temperatura (zona 4 da figura 2.5.), conseqüentemente o teor em carbono existente na austenite começa a aumentar e depressa atinge o ponto eutectóide. Nesse caso, usamos o sufixo -oide (“semelhante a”) para indicar que o equilíbrio ocorre entre fases sólidas. A austenite restante transforma-se em perlite, estrutura que se manterá até o aço atingir a temperatura ambiente.

É importante salientar que na bibliografia o ponto eutectóide apresenta algumas variações entre autores, sendo que vulgarmente corresponde a valores entre 0,77%, 0,8% e 0,86% C e a uma temperatura entre 723 e 727 °C.

Considerando o teor em carbono de uma liga com 0,86% C, o aço também solidifica em cristais de austenite, os quais, após completa difusão do carbono, formam uma solução homogênea no ferro α (zona 8 da figura 2.5.), que se manterá até à temperatura de 723 °C, à qual começa a transformação em perlite (zona 9 da figura 2.5.). O carbono é expulso da solução e precipita sob a forma de carbonetos. Abaixo dessa temperatura todo o aço se encontra com uma estrutura com lamelas estreitamente unidas às da ferrite que constituem, no seu conjunto, a estrutura perlítica (zona 10 da figura 2.5.), que se manterá até à temperatura ambiente.

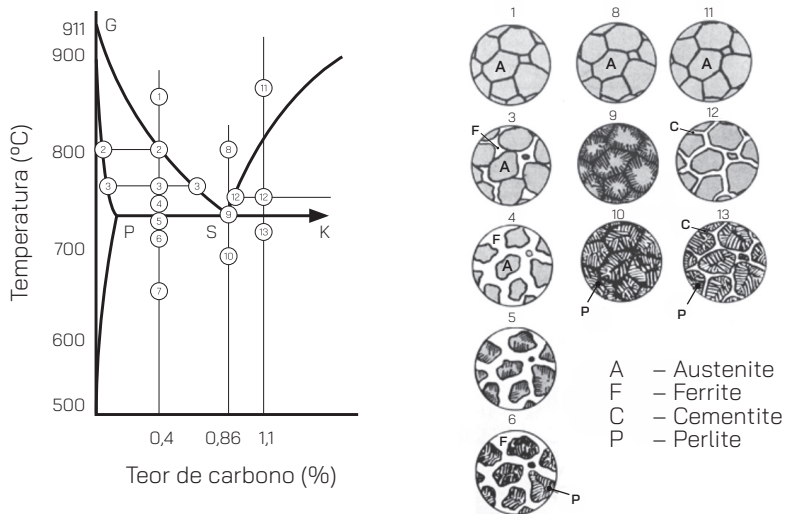


Figura 2.5. Representação esquemática dos processos de transformação durante o arrefecimento a partir do domínio austenítico, para três ligas Fe-C (0,4% – 0,86% – 1,1%).

3. CONSTITUINTES MICROSCÓPICOS DOS AÇOS

3.1. Aços recozidos

Para o conhecimento dos constituintes microscópicos dos aços é importante saber o estado em que se encontra o aço. Neste capítulo abordaremos os constituintes dos aços em estado recozido.

3.1.1. Ferrite (ferro α)

Na realidade, a solubilidade do carbono no ferro α não é nula, sendo que à temperatura ambiente 0,006% C dissolve-se no ferro α . Essa quantidade aumenta com a temperatura até aos 0,02-0,03%. Diminui novamente a partir dos 723 °C até aos 911 °C. O ferro com 0,006% poderia ser designado por ferro puro.

A grande importância para os tratamentos térmicos é que, face ao exposto, o ferro α não pode manter o carbono em solução, sendo que o ferro γ pode.

A ferrite é ferro quase puro que pode ter em solução pequenas quantidades de silício, enxofre e outras impurezas.

Em aços de alto teor em carbono ou alta liga, temperados a altas temperaturas, por vezes a austenite não se transforma toda em martensite, podendo ficar com cerca de 30% de austenite residual, conforme mostra a figura 3.2.

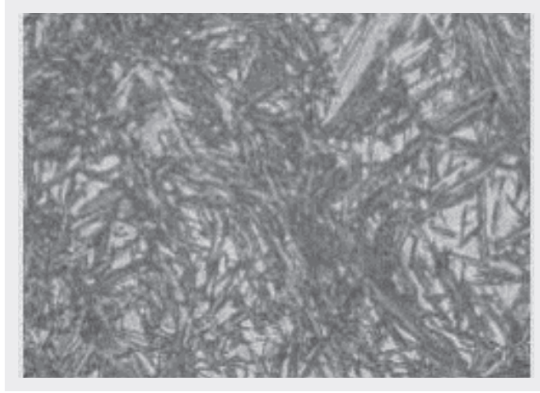


Figura 3.2. Estrutura da martensite (agulhas) e austenite residual.

A martensite cristaliza no sistema tetragonal e é instável sendo a sua retícula elementar constituída por um paralelepípedo de corpo centrado do ferro α , como mostra a figura 3.3. A microestrutura da martensite é de aspeto acicular formando agulhas em *zigzag*.

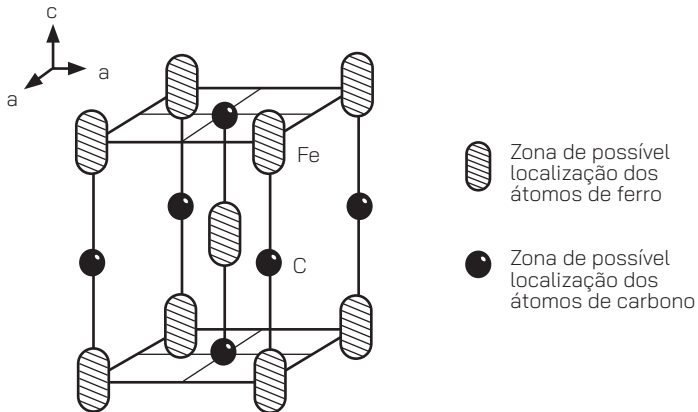


Figura 3.3. Microestrutura provável da martensite.

4. INFLUÊNCIA DE DIVERSOS FATORES NA TÊMPERA DOS AÇOS

Para temperar os aços estes devem ser aquecidos a uma temperatura superior à temperatura crítica superior e de seguida arrefecidos, mais ou menos rapidamente, sendo que a velocidade de arrefecimento deve estar de acordo com os fatores que regulam o fenómeno de têmpera.

O interesse tecnológico das microestruturas temperadas (e revenidas em geral) reside na sua:

- Elevada dureza;
- Elevada resistência à tração;
- Elevada relação $R_{0,2} / R_m$;
- Elevada resistência à fadiga (geralmente em aços com endurecimento superficial);
- Elevada resistência ao desgaste;
- Elevada resistência ao choque (após revenido a alta temperatura).

Estas propriedades permitem projetar componentes que atingem os valores pretendidos de resistência mecânica com uma secção resistente mínima, otimizando a relação entre desempenho em serviço real e massa, possibilitando, em simultâneo, economias de material e de energia. É de realçar que uma microestrutura martensítica pode ser processada de modo a apresentar resistências mecânicas e ductilidade elevadas, tornando-se aparente exceção à regra geral enunciada de que um aumento da resistência mecânica implica uma degradação da ductilidade.

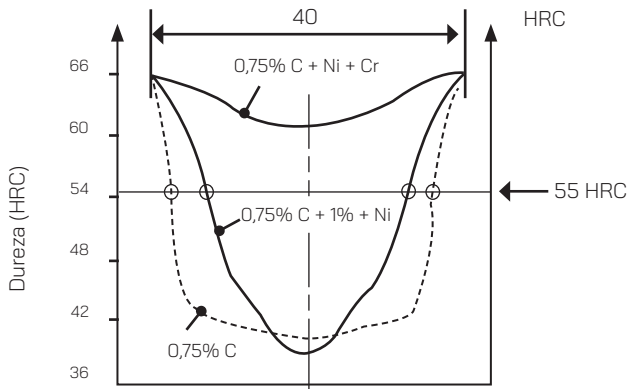


Figura 4.3. Curvas em U após têmpera para três aços com iguais teores em carbono e variações na adição de elementos de liga.

A figura 4.4. representa a variação da dureza com a distância da superfície ao núcleo de vários redondos, de diversos diâmetros e respetiva curva U associada.

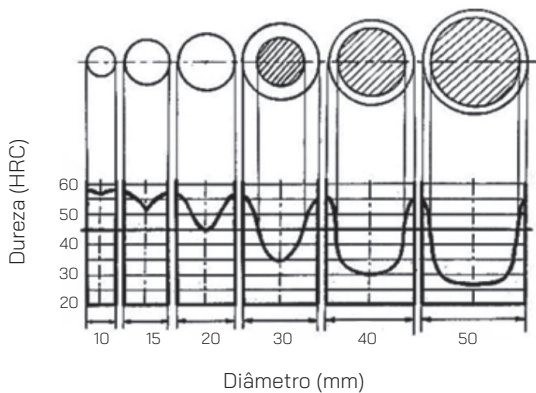


Figura 4.4. Curvas em U que representam a variação da dureza com a distância da superfície ao núcleo de vários redondos.

4.1.2.2. Procedimento de Grossmann

O procedimento de Grossmann assume algumas simplificações no sentido de modelizar o processo de têmpera:

- A transferência de calor entre a superfície de uma peça e o meio de arrefecimento da mesma obedece à lei de Newton, sendo proporcional à respetiva diferença de temperatura;

5. ALTERAÇÃO DE VOLUME E DEFORMAÇÃO DOS AÇOS NOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Durante os tratamentos térmicos, os aços sofrem deformações importantes, algumas delas irreversíveis. As deformações mais relevantes são promovidas por um ou vários fatores, sendo os mais relevantes:

- Tensões residuais que causam variação de forma ao excederem a tensão de cedência do material, o que poderá acontecer durante o aquecimento devido à perda de resistência;
- Tensões causadas por uma expansão diferencial devido a gradientes térmicos;
- Variações de volume devido a transformações de fase;
- Fluência.

ambiente para os mesmos esforços este não se deforma. Deste modo, as peças quando aquecidas podem ficar com deformações permanentes desde que o esforço seja superior ao limite de elasticidade do aço para a temperatura a que se encontra. Por outro lado, existem ainda as deformações provenientes do arrefecimento desigual nos diferentes pontos das peças (arrefecimento mais rápido na periferia do que no núcleo), criando assim tensões que tendem a modificar as suas dimensões e a sua forma, podendo, em caso extremo, provocar fissuras nas peças.

5.2. Exemplos de deformações na têmpera dos aços

5.2.1. Arrefecimento em água em apenas uma zona de uma peça em aço com 30% de níquel

Este aço, à temperatura ambiente, é austenítico e não tem pontos críticos. Isto é, dilata e contrai segundo as leis de dilatação e contração térmica, não sofrendo transformações de microestrutura, tanto no aquecimento, como no arrefecimento. Quando se aquece uma peça deste aço a 800 °C e se arrefece rapidamente só uma das faces da peça, verificam-se diversas alterações na sua forma e dimensão (*vide* figura 5.1.). Por conseguinte, a face inferior arrefeceu rapidamente e contraiu mais do que a face superior, pois o arrefecimento desta foi mais lento. Isto provoca tensões diferentes entre as duas faces já que a face inferior, depois de fria, mantém a sua forma e dimensão e que a face superior, ainda numa fase plástica, é repuxada.

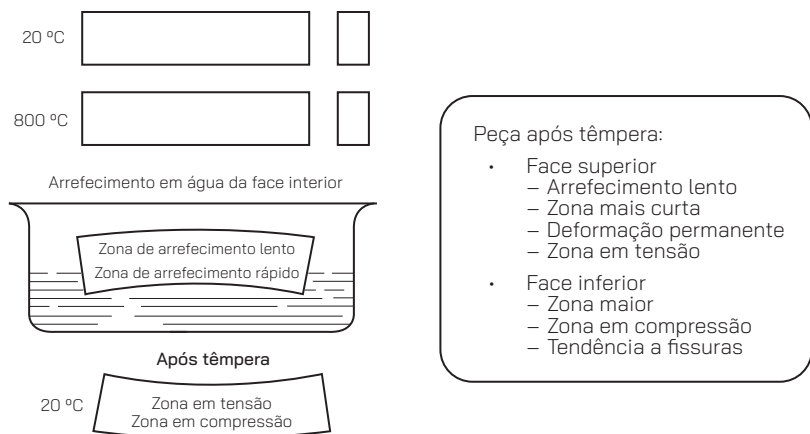


Figura 5.1. Modificações de forma e dimensão de uma peça em aço austenítico arrefecida de forma desigual.

6. TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

6.1. Noções de base

Os tratamentos térmicos têm por objetivo melhorar as propriedades características dos aços, submetendo-os à ação de ciclos térmicos apropriados (aquecer e manter as peças a temperaturas e tempos adequados e arrefecê-las em condições controladas e convenientes) a fim de lhes conferir propriedades particulares adaptadas à sua conformação ou utilização.

Os objetivos essenciais dos tratamentos térmicos podem-se resumir nos seguintes pontos:

- Produzir modificações da natureza dos constituintes presentes, sem alteração da composição química global;
- Produzir alterações microestruturais da dimensão, da forma e da repartição dos constituintes, sem modificar a sua natureza;
- Promover a formação de microestruturas favoráveis, por exemplo à maquinagem ou à conformação por deformação a frio;
- Eliminar ou reduzir tensões internas próprias ou modificar a sua repartição, com modificação de microestrutura;
- Estabilizar dimensionalmente elementos a maquinar.

6.2.2. Meios de arrefecimento

A têmpera é executada através da austenitização total ou parcial dos aços (conforme eles são hipoeutectóides ou hipereutectóides) seguida de um arrefecimento, em geral, num meio líquido, salientando-se como meios utilizados os seguintes:

- Água;
- Soluções aquosas de cloreto de sódio;
- Soluções aquosas de hidróxido de sódio;
- Óleos minerais;
- Soluções aquosas de polímeros;
- Banhos de sais fundidos;
- Gases sob pressão; Nevoeiro;
- O próprio ar.

O objetivo principal de um meio de têmpera é produzir transformações metalúrgicas que promovam as propriedades físicas necessárias de um dado componente em serviço, tais como dureza, resistência e tenacidade. Não obstante, deve prevenir a fissuração, bem como minimizar a distorção através de taxas de arrefecimento controladas durante o processo de têmpera.

A figura 6.8. ilustra, de forma gráfica, as transformações que podem ocorrer num aço durante o processo de têmpera, conforme o meio de arrefecimento.

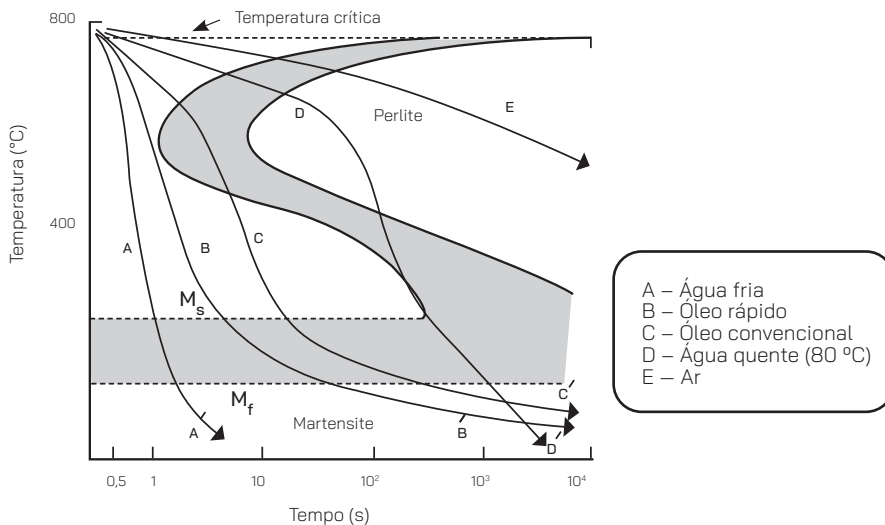


Figura 6.8. Diagrama de transformação de um aço de baixa liga com curvas de arrefecimento para vários meios de arrefecimento.

7. TRATAMENTOS SUPERFICIAIS DOS AÇOS

Estes tratamentos permitem melhorar as propriedades de uso da peça, por endurecimento superficial, mas conservando na zona mais interior da peça as propriedades mecânicas do aço de origem.

Poderemos ter tratamentos superficiais sem alteração da composição química, ou com alteração da composição química, denominados de tratamentos termoquímicos.

7.1. Tratamento térmico de têmpera por indução

No aquecimento por indução a peça (ou induzido) é introduzida no campo magnético alterno gerado por uma bobine (ou indutor) percorrida por uma corrente elétrica alterna. A alternância do campo magnético gera correntes elétricas superficiais na peça (correntes de Eddy) que provocam o respetivo aquecimento muito rápido, por efeito de joule. Assim, este tratamento consiste em aquecer muito rapidamente uma fina camada superficial da peça de aço e em arrefecê-la imediatamente, de forma a que o calor não tenha tempo de se transmitir para o interior.

As temperaturas de austenitização, dependendo do aço, podem situar-se entre os 50 e 200 °C acima dos valores habituais. A figura 7.4. apresenta um exemplo da variação de A_{c3} em função da velocidade de aquecimento para o aço AFNOR 41Cr4, considerando diferentes estados iniciais do aço.

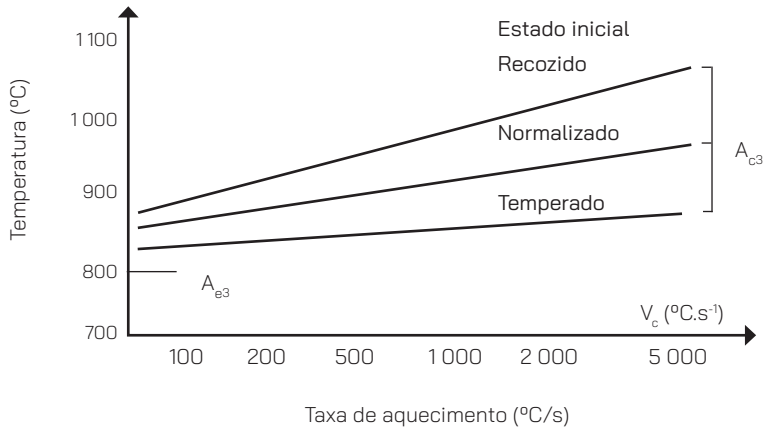


Figura 7.4. Variação de A_{c3} em função da velocidade de aquecimento para o aço 41Cr4.

A figura 7.5. apresenta a sequência de um aquecimento, na posição vertical, de uma peça de aço sujeita ao aquecimento por indução.



Figura 7.5. Exemplo de um aquecimento por indução.

O sistema é constituído por um gerador, um oscilador, um transformador e um indutor. A figura 7.6. apresenta várias gamas de frequência e potência e o tipo de equipamento a ser aplicado.

8. CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

O ferro é o segundo metal mais abundante na crosta terrestre, sendo o primeiro o alumínio.

O aço apresenta uma enorme versatilidade de adaptação ao processo industrial sendo vazável, endurecível, soldável e deformável.

A sua principal limitação é a resistência à corrosão, que pode ser melhorada com recurso a revestimentos (cromagem, galvanização, niquelagem, entre outros) ou através da adição de elementos de liga (aço inoxidável).

Os aços podem ser classificados de diversas formas:

- Classificação quanto à sua composição química;
- Classificação quanto ao seu teor em carbono;
- Classificação quanto ao grau de desoxidação;
- Classificação quanto ao modo de processamento;
- Classificação quanto à sua constituição estrutural;
- Classificação quanto à sua aplicação;
- Classificação quanto à sua dureza no estado recozido.

9. DESIGNAÇÃO CONVENCIONAL DAS CARACTERÍSTICAS E TRATAMENTOS PARA METAIS FERROSOS

Em diferentes estudos, normas e bibliografia técnica, surgem designações e simbologias relacionadas com os tratamentos térmicos, cujo significado é importante conhecer.

A tabela 9.1. apresenta a designação utilizada para caracterizar metais ferrosos.

Tabela 9.1. Designação das características e tratamentos para metais ferrosos.

Designação	Significado
T0	Sem tratamento
T1	Encruado
T2	Recozido ou normalizado
T3	Tratado para 80 a 100 kg/mm ²
T4	Tratado para 100 a 120 kg/mm ²
T5	Tratado para 120 a 140 kg/mm ²

10. TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLDADURAS

A soldadura é um dos processos com maior aplicação na ligação de materiais metálicos e cuja aplicabilidade se pode traduzir desde pequenas estruturas para o consumidor doméstico até exigentes e complexas aplicações industriais. Não entrando na abrangência supra, este trabalho pretende incidir na ligação soldada dos aços.

Em diversas circunstâncias, o processo de união, *per se*, não é suficiente para garantir o resultado final expectável, sendo necessário o recurso à aplicação de tratamentos térmicos. A operação de soldadura introduz nos materiais modificações de carácter metalúrgico, localizadas numa zona restrita onde estão adjacentes variações de propriedades e microestrutura díspares do material base, tendo em conta que as mesmas estão dependentes dos processos e *modus operandi*. De igual forma, pode originar tensões locais nas peças dado que a zona de soldadura, devido ao aquecimento, tende a dilatar, dilatação esta que é dificultada pelos componentes adjacentes que, estando a uma temperatura inferior, não correspondem no mesmo sentido. Desta forma, criam-se tensões residuais, distorções na geometria das peças, podendo até originar deformações plásticas.

A avaliação destes aspetos, em componentes soldados, é de grande necessidade dado que é fulcral garantir que, no final do processo, fica assegurada a integridade do conjunto em serviço.

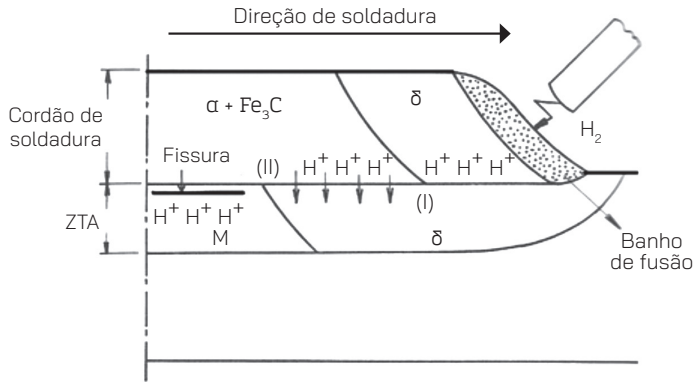


Figura 10.5. Esquema de fragilização por hidrogênio no processo de soldadura. O pré-aquecimento diminui a taxa de arrefecimento, após soldadura, permitindo a libertação do hidrogênio por difusão².

As temperaturas do pré-aquecimento podem atingir os 800 °C (por exemplo, nos aços-crômio), sendo usual que sejam mantidas no valor mínimo durante o processo de soldadura, de forma a evitar que sejam alteradas as propriedades mecânicas ou as condições de soldadura estabelecidas. Contudo, poderá ser especificada uma tolerância, geralmente 100-150 °C acima do mínimo da temperatura de pré-aquecimento, em gamas na ordem dos 350 °C. A figura 10.6. apresenta de forma muito esquemática a influência do pré-aquecimento e da normalização.

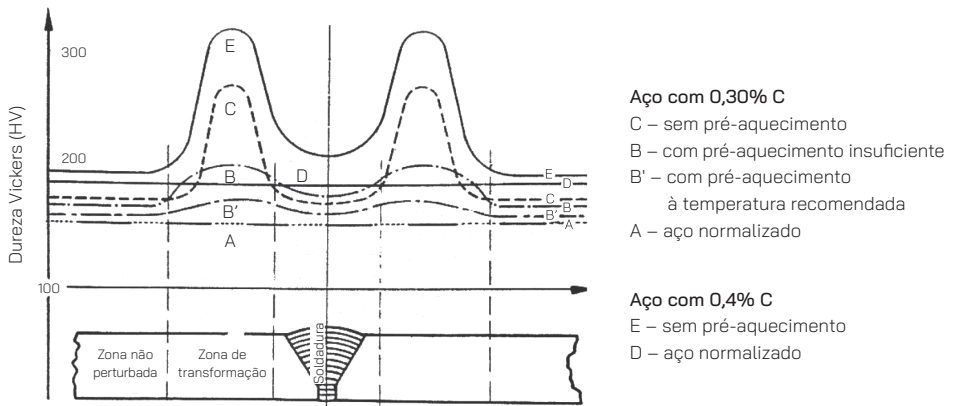


Figura 10.6. Secção transversal de uma soldadura topo a topo por fusão, que apresenta a influência do pré-aquecimento e da normalização, em dois aços ao carbono, nas durezas HV.

² Para melhor compreensão deste fenómeno recomenda-se a consulta da obra *Welding Steels Without Hydrogen Cracking* de N. Bailey, F. R. Coe, T. G. Gooch, P. H. M. Hart, N. Jenkins e R. J. Pargeter, publicado por Woodhead Publishing, em 1993.

11. MEDIÇÃO E CONTROLO DE TEMPERATURAS

Dado que todo o processo de tratamentos térmicos está intimamente relacionado com a temperatura, é fulcral que o seu controlo seja rigoroso para o sucesso das operações. Como tal, deverá ser uma exigência primordial estabelecer um sistema adequado e fiável de todo o equipamento de medição de temperatura da instalação, de forma a que se possa evitar falhas operacionais graves com resultados que podem ser desastrosos. A medição de temperatura, de forma correta, exige estudo e conhecimento dos numerosos fatores que contribuem para a sua exatidão, sobretudo quando se exige que os erros de medição sejam ínfimos.

A temperatura dos corpos pode ser considerada como um índice da energia interna das suas moléculas. Existem diversas escalas para medição de temperaturas, sendo a mais frequente em Portugal a de graus centígrados, contudo convém referenciar a de Fahrenheit, de kelvin ou absoluta.

11.1. Termopares

Os termopares são a forma mais utilizada para a medição de temperatura nas instalações de tratamento térmico.

Ligas	+ Fio	- Fio	Código de cores ANSI MC-96.1	Internacional IEC 584-3	BS 1843	DIN 43710	JIS C1610-1981	Padrão	Especial
I	Fe (magnético)	Constantan Cu-Ni						2,2 °C ou 0,75%	1,1 °C ou 0,4%
K	Níquel-Cromo Ni-Cr	Níquel-Alum Ni-Al (magnético)						2,2 °C ou 0,75%	1,1 °C ou 0,4%
T	Cobre Cu	Constantan Cobre-Níquel Cu-ni						1,0 °C ou 0,75%	0,5 °C ou 0,4%
E	Níquel-Cromo Ni-Cr-Si	Constantan Cobre-Níquel Cu-ni						1,7 °C ou 0,5%	1,0 °C ou 0,4%
N	Nicrosil Ni-Cr-Si	Nisil Ni-Si-Mg				Sem padrão (usar norma ANSI)	Sem padrão (usar norma ANSI)	2,2 °C ou 0,75%	1,1 °C ou 0,4%
R	Platina 13% Rhadio Pt-10%Rh	Platina Pt						1,5 °C ou 0,25%	0,6 °C ou 0,1%
S	Platina 10% Rhadio Pt-10%Rh	Platina Pt						1,5 °C ou 0,25%	0,6 °C ou 0,1%
B	Platina 30% Rhadio Pt-30%Rh	Platina 6% Rhadio Pt-6%Rh			Use fio de cobre			0,5% 500/C	Não estabilizado

Figura 11.2. Representação da tabela de cores (vários países).

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temperatura usual	Características	Restrições	Observações
T	Cobre (+)	Constantan (-)	-180 a 370 °C	Pode ser utilizado em atmosferas húmidas	Limitações em atmosferas oxidantes	Temperatura abaixo de zero, tolera humidade
J	Ferro (+)	Constantan (-)	0 a 760 °C	Aplicável em atmosferas redutoras, inertes e em vácuo	Limitações em atmosferas oxidantes a elevadas temperaturas	O ferro oxida rapidamente
E	Níquel Cromo (+)	Cobre Níquel (-)	0 a 870 °C	Aplicável em atmosferas oxidantes ou inertes	Limitações em atmosferas redutoras	Bom para temperaturas abaixo de zero
K	Chomel (+)	Alume (-)	0 a 1200 °C	Aplicável em atmosferas oxidantes ou inertes	Limitações em vácuo e em atmosferas redutoras	Sujeito a "green rot" em algumas atmosferas
S	Platina 90% Rhodio 10% (+)	Platina 100% (-)	0 a 1600 °C	Aplicável em atmosferas oxidantes ou inertes	Sensível a contaminações	Evitar contacto com metal
R	Platina 87% Rhodio 13% (+)	Platina 100% (-)	0 a 1600 °C	Aplicável em atmosferas oxidantes ou inertes	Sensível a contaminações	Evitar contacto com metal
B	Platina 70% Rhodio 30% (+)	Platina 94% Rhodio 6% (-)	870 a 1795 °C	Aplicável em atmosferas oxidantes ou inertes	Sensível a contaminações	Evitar contacto com metal. Adequado para alta temperatura
N	Nicrosil (+)	Nisil (-)	0 a 1260 °C	Excelente resistência a oxidação até 1200 °C	Melhor desempenho na forma de termopar de isolamento mineral	

Figura 11.3. Resumo das características de alguns termopares, gamas de temperatura e restrições na aplicação.

12. CONTROLO DE QUALIDADE NOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos são processos cuja qualidade é fulcral, pois asseguram que as propriedades mecânicas, definidas para um dado material ou componente, estão em conformidade com o projetado. Pretende-se, pois, nesta secção, demonstrar a importância do cumprimento de referenciais normativos suportados nas normas ISO 9000. Estes foram desenvolvidos e orientados para diversos sectores, como para o sector automóvel (IATF 16949:2016), para o da indústria química, petroquímica e do gás (ISO 29001:2020) e para o da aeronáutica (ISO AS9100), e incluem, a título de exemplo, requisitos específicos associados à competência, consciencialização e formação dos colaboradores, à conceção e desenvolvimento de produtos, à produção e fornecimento do serviço e às atividades de medição, monitorização, análise e melhoria.

Concretamente aborda-se a NP EN ISO 9001:2015, a título genérico, e a EN ISO 17663:2009 com incidência direta nos requisitos de qualidade para o tratamento térmico de soldaduras (*Quality requirements for heat treatment in connection with welding and allied processes*), dado que os primeiros dois abordam temáticas transversais de qualidade e o terceiro é mais focalizado nos tratamentos térmicos.

Existem, pois, diversas formas de ministrar formação, como mostra a figura 12.2., quer seja no posto de trabalho (OJT – *On-the-Job Training*), em sala, formalmente e baseada na filosofia “lê, vê, faz” que associa os conhecimentos teóricos às experiências práticas em serviço.



Figura 12.2. Roda dos métodos de formação.

Constata-se que, na maioria dos casos, a formação no posto é regra geral e que, eventualmente, possa existir uma única abordagem teórica, o que por sua vez é insignificante face aos objetivos alvejados. É sabido que a formação tradicional em posto de trabalho pode ser substituída por uma abordagem mais estruturada, com resultados não só no tempo, com uma diminuição de cerca 72%, mas também na capacidade de resolução de problemas, com incremento de 130%, e com impacto no tempo e esforço, com uma redução de cerca de 76%.

De igual forma, a NP EN ISO 9001:2015 desenvolve esta temática nos pontos 7.2. e 7.3. deste documento, denominados “Competências” e “Conscencialização”, respetivamente.

A formação basilar deve ser abordada sempre que é admitido um novo técnico e depois, pelo menos, num regime anual, garantindo um aumento gradual da profundidade do tema.

No referencial CQI-9 (*Heat treatment process assessment*) da AIAG (Automotive Industry Action Group) é obrigatório a existência de um técnico qualificado com formação em metalurgia e cinco anos de experiência em tratamentos térmicos.

13. ALUSÕES GERAIS À IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE NOS PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Para a aplicação dos princípios da qualidade associada aos tratamentos térmicos de soldaduras, uma empresa com um sistema de gestão da qualidade devidamente certificado apresenta uma base sólida e muito bem estruturada para que facilmente possa adotar a EN ISO 17663:2009. Aliás, a abrangência universal da NP EN ISO 9001:2015 permite que as organizações funcionem de forma a apresentar resultados práticos de fácil adaptação a referenciais específicos de qualidade, por exemplo, a ISO 29001:2020: Requisitos do sistema de gestão da qualidade para a conceção, desenvolvimento, produção, instalação e manutenção de produtos para indústrias de petróleo, petroquímica e gás natural.

No mundo de hoje, com o aumento das exigências dos clientes e da visão global por parte das empresas, quer como clientes, quer como fornecedores, a adoção de um sistema de gestão integrado permite, através do sistema de gestão da qualidade, uma diminuição dos produtos defeituosos e dos tempos perdidos,

ANEXOS

Ensaio de dureza

Podemos definir a dureza como uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica (permanente) localizada (pequena impressão ou risco)

Os ensaios de dureza estão intimamente relacionados com o controlo de qualidade nos tratamentos térmicos. São ensaios de fácil e rápida execução e de custo relativamente acessível. Servem também como uma aproximação grosseira ao valor da tensão de rotura.

Assim, convém fazer um breve resumo dos principais ensaios e as suas características. Serão apenas abordados os ensaios de dureza, os mais utilizados na indústria dos tratamentos térmicos. O ensaio de ressalto (Shore) ou de risco (escala de Mohs) não serão parte deste resumo.

Podemos então classificar como os mais relevantes os seguintes ensaios de dureza:

- Vickers;
- Rockwell;
- Brinell;
- Knoop.

A nível de execução é importante que a espessura da amostra seja superior a 1,5 D (diagonal de impressão) e a distância entre identações seja maior do que 1,5 D.

A figura A.1. apresenta a ilustração do penetrador e da indentação Vickers.

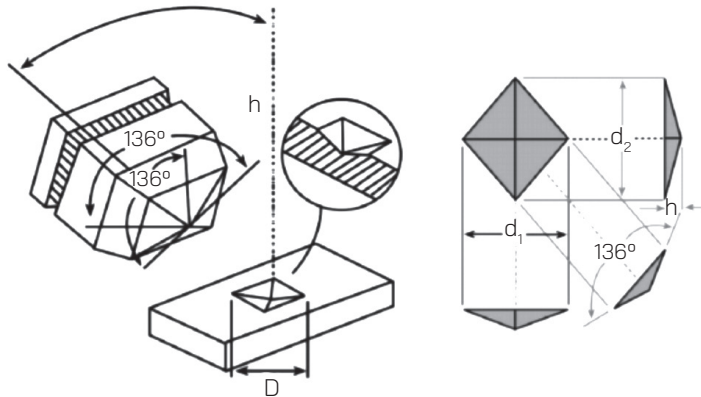


Figura A.1. Representação esquemática do penetrador e indentação Vickers.

O ensaio Brinell

O ensaio foi desenvolvido na Suécia, no ano de 1900, por Johan August Brinell. Este método utiliza uma esfera de aço temperado ou de carboneto de tungstênio, com um determinado diâmetro (D). A esfera é pressionada sobre a amostra, polida e limpa, com uma determinada carga (F), durante um tempo (t). No final a calote esférica marcada na amostra tem um determinado diâmetro (d). A dureza é representada pelas letras HB (Hardness Brinell).

$$\text{Assim, teremos que, } HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Os diâmetros da esfera podem ser de 1, 2,5, 5 ou 10mm. As cargas utilizadas podem variar, regra geral, entre os 500 e os 3000kgf, com tempo de carga entre os 10 e 30s. Existem no entanto outras escalas Brinell que são pouco utilizadas, com cargas muito mais baixas, que podem ir até a 1kgf, mas são pouco utilizadas. O ensaio mais frequente utiliza uma esfera com 10mm de diâmetro com uma carga de 3000kgf.

TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

UMA ABORDAGEM AO MUNDO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

JORGE ALEXANDRE SILVA

Sobre a obra

Este livro foi pensado para orientar profissionais da área da metalurgia e metalomecânica na temática dos tratamentos térmicos dos aços.

É um manual escrito com uma linguagem simples e de fácil entendimento, sem a complexidade metalúrgica que o estudo aprofundado dos tratamentos térmicos exige. Objetiva-se como um manual de apoio que disponibiliza ao leitor uma informação basilar dos tratamentos térmicos dos aços e da sua envolvente, através do acesso simplificado e compilado de diversas publicações, numa perspetiva fundamentada praticamente em vários anos de atividade na área dos tratamentos térmicos.

Os conteúdos diferem dos habituais manuais técnicos porque agregam os tratamentos convencionais, realizados em fornos de tratamento térmico, aos tratamentos térmicos de soldaduras, realizados com equipamentos específicos. A abordagem à qualidade e a sua ligação aos referenciais internacionais completa o ciclo de informação.

Sobre o autor

Jorge Alexandre Pinheiro da Silva

Nasceu em 1978. É Engenheiro Metalúrgico e de Materiais, licenciado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Mestre em Metalurgia pela mesma faculdade. Frequentou diversas formações de tratamentos térmicos em Portugal, Espanha, Alemanha e Estados Unidos da América.

Desde 2004 que desempenha funções na empresa Traterme – Tratamentos Térmicos, Lda, como responsável técnico e diretor de operações. Cumulativamente, desenvolve diversas atividades de consultoria e formação em empresas de diversos setores da metalomecânica.

Orador em diversos seminários e conferências, foi membro organizador da 1ª Conferência de Tratamentos Térmicos realizada em Portugal (2012). É autor e coautor de diversas publicações em revistas da especialidade em Portugal e Espanha.

Membro Sénior da Ordem dos Engenheiros, tendo sido vogal do colégio de materiais da Região Norte. É membro do painel de examinadores do Instituto de Soldadura e Qualidade. Membro de diversas associações da especialidade, destacando-se a Heat Treating Society, AWT, A3TS, entre outras.

Apoio à Edição



Também disponível em formato e-book



ISBN: 978-989-892-791-0



9 789898 927910

www.engebook.pt

engebook