

TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

**UMA ABORDAGEM AO MUNDO
DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS**

JORGE ALEXANDRE SILVA

2ª EDIÇÃO

Prefácio do Prof. **Carlos Silva Ribeiro**

Posfácio do Eng. **António Paulo Duarte**

Revisão Técnica do Prof. **Altino de Jesus Roque Loureiro**

AUTOR

Jorge Alexandre Pinheiro da Silva

TÍTULO

TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

— Uma abordagem ao mundo dos tratamentos térmicos

2ª Edição

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

BAMAC

CERINNOV Group

ENERLITE – Elite Energy Performance

GH Induction

NDTEAM

NEWINTEC QUALITY SYSTEMS, S.L.

NIPPON GASES PORTUGAL

RAMADA AÇOS, S.A.

TRATERME – Tratamentos Térmicos, Lda

WELDOTHERM GmbH

IMPRESSÃO

Dezembro, 2024

DEPÓSITO LEGAL

531052/24



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

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2024 | 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, e 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.

DOI

<https://doi.org/10.61875/9789899177390>

CDU

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

ISBN

Papel: 9789899177390

Ebook: 9789899177406

Catálogo da publicação

Família: Engenharia Mecânica

Subfamília: Materiais/Metalúrgica

ÍNDICE

IN MEMORIAM ANTÓNIO REBELO	XI
NOTA DE ABERTURA	XIII
PREFÁCIO (À 1ª EDIÇÃO)	
Prof. Carlos Alberto Silva Ribeiro	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_3C)	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	188
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

POSFÁCIO (À 2ª EDIÇÃO)

Eng. António Paulo Duarte CCLXXXIII

ANEXOS CCLXXXV

BIBLIOGRAFIA..... CCXCVII

ÍNDICE DE FIGURAS CCCXI

ÍNDICE DE TABELAS CCCXIX

ÍNDICE REMISSIVO..... CCCXXIII

1.3. Solidificação dos metais

Os átomos estão em constante estado de excitação ou vibração. A frequência das vibrações depende da temperatura, sendo que estas cessam a uma temperatura de $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 0K , denominado de zero absoluto. Com o aumento de temperatura o estado de vibração tende a incrementar e, ao atingir uma dada temperatura, as vibrações tornam-se tão violentas que as forças atrativas entre os átomos são superadas e eles passam a movimentar-se livremente dentro da massa líquida. A temperatura à qual este fenômeno acontece denomina-se de ponto de fusão do metal.

Aquando dum processo de aquecimento e uma vez atingida esta temperatura, ela mantém-se constante até que o metal funda completamente.

O estado líquido é um estado caracterizado por uma desordem na posição relativa dos átomos. No arrefecimento a energia das vibrações vai gradualmente diminuído, acabando por se tornar tão pequena que as forças de coesão entre átomos passam a ser dominantes e estes a dispor-se segundo a sua estrutura típica.

A solidificação ou cristalização é, portanto, um processo de ordenação durante o qual os átomos se colocam uns relativamente aos outros em posições definitivas em consequência das forças de coesão. Formam assim uma rede espacial geométrica denominada de rede cristalina. Ao mais pequeno arranjo atômico representativo da simetria da rede chama-se malha e ao seu empilhamento perfeito chama-se cristal ou grão.

Quando se procede ao arrefecimento de um metal líquido, os primeiros cristais (formações sólidas com forma geométrica definida) surgem nos diferentes pontos do líquido onde a temperatura é igual à temperatura de solidificação. Aos minúsculos pontos chamados germes de solidificação juntam-se, à sua volta, átomos formando cristais ou grãos que crescem em todas as direções, com maior incidência na direção onde o arrefecimento é maior. Os cristais param de crescer quando se encontram com outros cristais vizinhos que, entretanto, também se formaram.

A figura 1.2. é um diagrama temperatura-tempo, relativo à fusão e à solidificação de um metal. A linha horizontal indica o ponto de solidificação (arrefecimento) e de fusão (aquecimento). Verifica-se que neste patamar a temperatura permanece constante até que todo o material funda ou solidifique completamente.

Excluindo o estado líquido, conforme suprarreferido, distingue-se dois tipos de fases:

- Soluções sólidas (inserção e substituição);
- Compostos definidos ($AxBy$), cujos domínios de estabilidade são fornecidos pelo diagrama de equilíbrio.

Sendo que o âmbito deste estudo está centrado nas ligas Fe-C, mais propriamente Fe-Fe₃C, como veremos mais adiante, os diagramas de equilíbrio serão apenas reportados a sistemas binários. Convém, pois, definir alguns conceitos básicos, no que concerne ao estudo do diagrama de equilíbrio de dois metais:

- Linha *liquidus* – Linha superior do diagrama que liga todos os pontos em que a solidificação começa. Acima desta linha, todas as ligas formadas com os elementos A e B encontram-se no estado líquido;
- Linha *solidus* – Curva inferior do diagrama que liga todos os pontos em que termina a solidificação.

A figura 2.1. esquematiza as linhas citadas, num diagrama de transformação versus teor de soluto.

Temperaturas de transformação *versus* teor de soluto

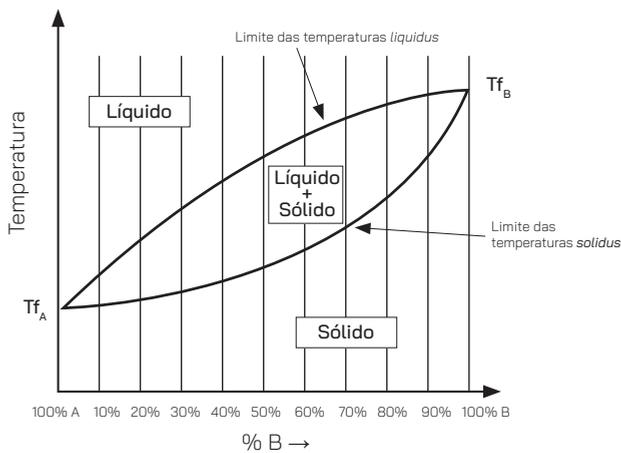


Figura 2.1. Diagrama da temperatura versus teor de soluto (metal A e B).

Este diagrama é válido para condições de arrefecimento muito lento.

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.

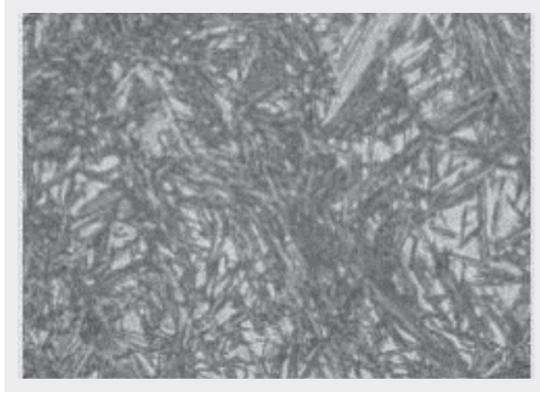


Figura 3.2. Estrutura da martensite (agulhas) e austenite residual.

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*.

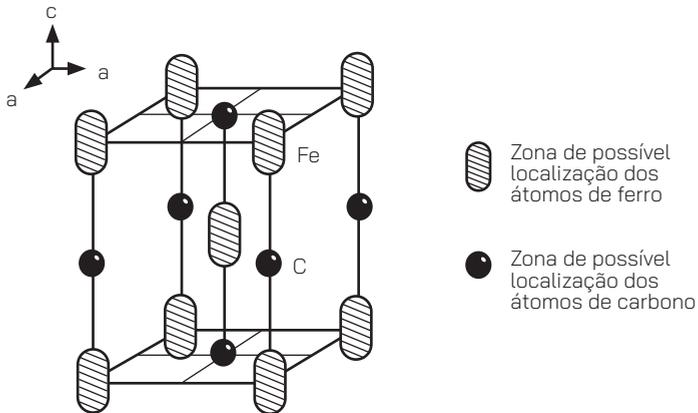


Figura 3.3. Microestrutura provável da martensite.

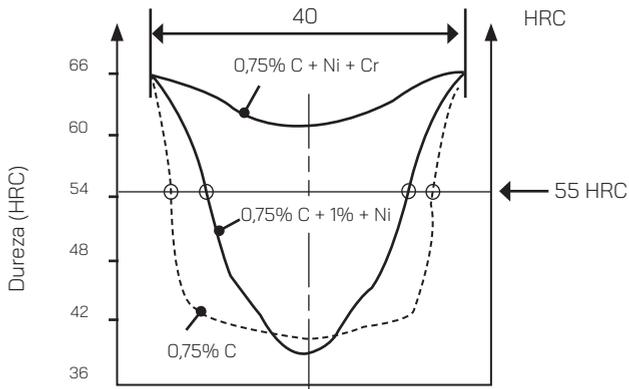


Figura 4.3. Curvas em U após têmpera para três aços com iguais teores em carbono e variações na adição de elementos de liga.

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.

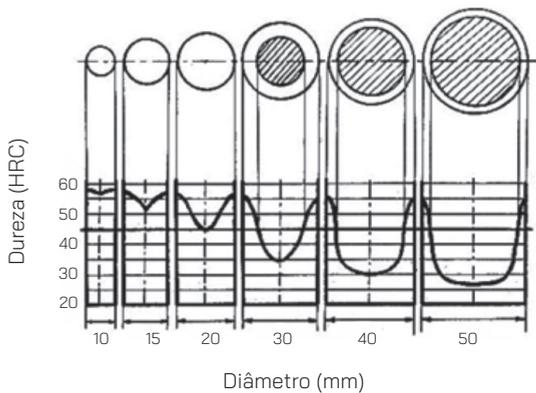


Figura 4.4. Curvas em U que representam a variação da dureza com a distância da superfície ao núcleo de vários redondos.

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;

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.

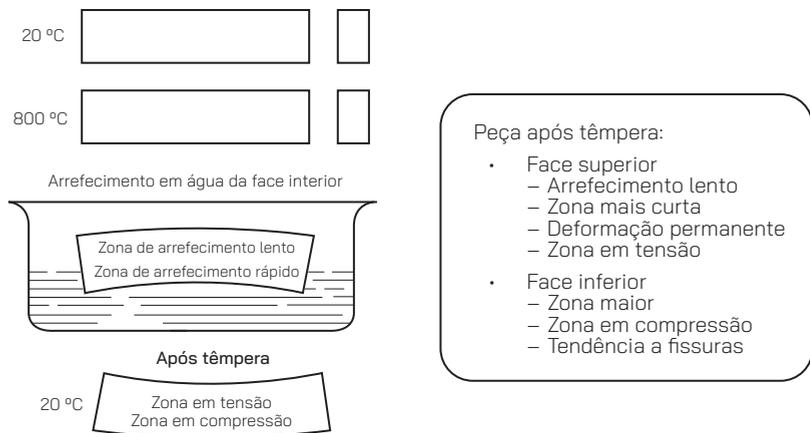


Figura 5.1. Modificações de forma e dimensão de uma peça em aço austenítico arrefecida de forma desigual.

As três variáveis a considerar serão o efeito da concentração, da temperatura e da agitação. A figura 6.12. apresenta os efeitos das três variáveis de um polímero PVP.

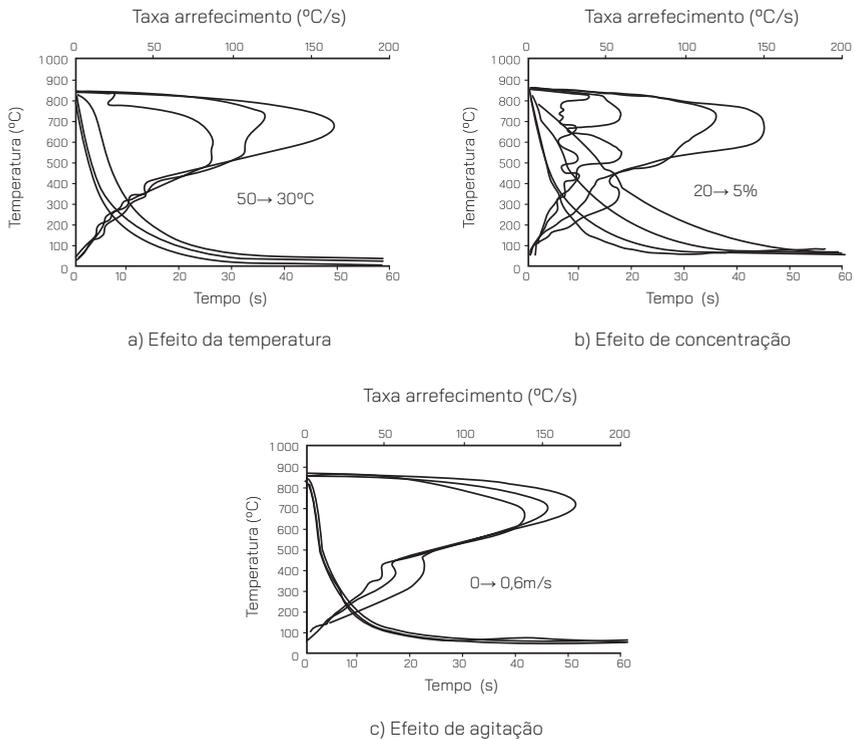


Figura 6.12. Efeito da temperatura, concentração e agitação na capacidade de arrefecimento de um polímero PVP. a) conc. 5%, 0,4m/s, b) 30 °C, 0,4 m/s e c) 30 °C, conc. 5%.

Relativamente à concentração, regra geral, a adição de polímero pode variar entre 1 a 50%. Com o aumento da concentração o poder arrefecedor do banho diminui. No concernente à temperatura, a faixa de utilização encontra-se entre os 30 e 50 °C. Com o aumento da temperatura, a severidade de arrefecimento diminui. A terceira variável é a agitação, sendo que a severidade aumenta com o aumento da intensidade da agitação.

O PAG, entre outros, apresenta uma solubilidade em água decrescente com a elevação da temperatura (solubilidade inversa). Estes polímeros dissolvem-se à temperatura ambiente, tornando-se insolúveis a uma temperatura mais elevada. Essa temperatura está relacionada com a natureza do polímero, do seu grau de degradação e de eventuais aditivos utilizados. Regra geral esta temperatura

O teor de elementos de liga também é relevante para a dureza da camada de difusão. Efetivamente existem dois mecanismos que determinam a dureza da camada de difusão.

O primeiro está relacionado com o endurecimento por solução sólida, de grande relevância para os aços de baixa liga. A temperatura do processo determina o grau de solução sólida do azoto, carbono e elementos de liga. A velocidade de têmpera, a partir da temperatura do processo, determina a quantidade que poderá ficar retida em solução sólida. Arrefecimentos lentos significam que será possibilitada a precipitação do ferro ou nitretos e, como tal, dá-se uma redução do efeito de endurecimento por solução sólida. Esta é a razão pela qual os aços de baixa liga são normalmente arrefecidos em água ou óleo após a nitrocarburação.

O segundo efeito é o endurecimento por precipitação. Para os aços ligados, este mecanismo de endurecimento é dominante. Este efeito é notório no sentido em que, dependendo do tipo de aço que foi nitruado ou nitrocarburado, pode-se obter uma gama de dureza entre 300-1300 HV (*vide* figura 7.35.).

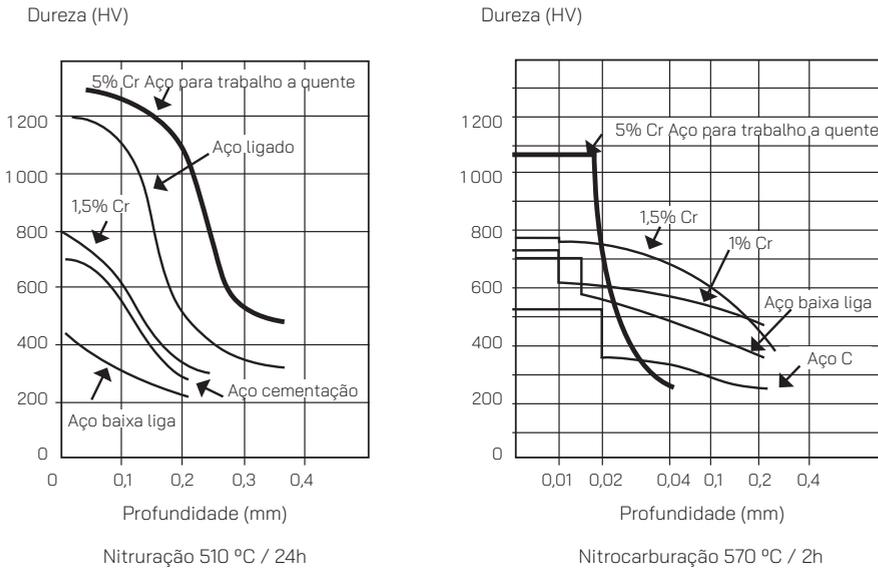


Figura 7.35. Durezas típicas em processos de nitruação e nitrocarburação.

8.5.5. Ledeburíticos

Estes aços são ligas complexas devido à adição de elementos de alto teor de liga, tais como o tungstênio, molibdênio, cromo, cobalto e vanádio. Estes elementos encontram-se essencialmente sob a forma de carbonetos (carbonetos eutéticos ou ledeburíticos). O complexo eutético de austenite e carbonetos torna a sua estrutura assimilável ao ferro fundido branco, donde provém o nome. São aços frágeis, mas muito resistentes ao desgaste. A têmpera é executada a temperaturas elevadas para assegurar a máxima solubilidade das fases intermediárias, por arrefecimento ao ar ou em óleo, mantendo as fases em solução.

8.6. Classificação quanto à sua aplicação

Segundo este critério podemos dividir os aços em três grandes grupos, sendo que cada grupo apresenta subdivisões:

- Aços para construção;
- Aços para ferramentas;
- Aços especiais.

Existem, pois, diversas classificações, relativamente à aplicação, sendo que com frequência poderemos encontrar nos catálogos dos fornecedores subdivisões em:

- Aços rápidos;
- Aços para ferramentas de trabalho a frio;
- Aços para ferramentas de trabalho a quente;
- Aços para moldes;
- Aços de construção;
- Aços de cementação;
- Aços de mola;
- Aços inoxidáveis;
- Aços refratários.

8.6.1. Aços para construção

São aços com ou sem liga usados na construção de peças a utilizar individualmente ou fazendo parte de máquinas. São trabalhados e utilizados no estado de fornecimento (natural, recozido) podendo, no entanto, sofrer tratamento térmico durante o fabrico das peças.

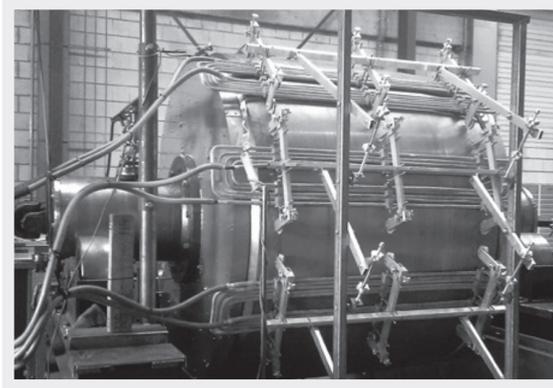


Figura 10.20. Exemplo de um aquecimento por indução.

A figura 10.21. apresenta dois indutores Weldotherm para o aquecimento de componentes onde, pela sua geometria complexa, se torna inadequado o aquecimento com indutores ditos convencionais.

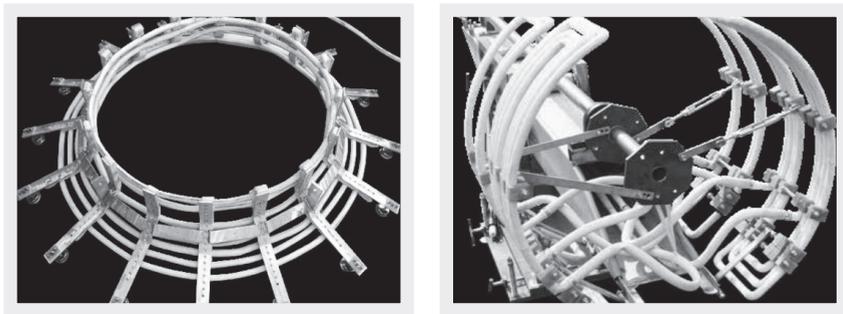


Figura 10.21. Exemplo de indutores Weldotherm para o aquecimento em componentes de geometria complexa.

A figura 10.22. apresenta um indutor desenvolvido para atender a exigentes requisitos técnicos em processos de pré-aquecimento por indução em soldadura. Este sistema, projetado pela Bamac na Alemanha e fabricado pela Bamac na China, foi concebido para proporcionar um aquecimento eficiente e controlado em componentes de elevada espessura, nos quais a uniformidade térmica é essencial. O equipamento utiliza indutores customizados, desenvolvidos para se adaptarem à forma do componente, permitindo um contacto próximo e a criação de um campo magnético concentrado, maximizando a eficiência. Além disso, este sistema Bamac integra módulos de controlo digital que possibilitam a monitorização em tempo real da temperatura e o ajuste preciso dos parâmetros operacionais, em conformidade com as especificações do procedimento de soldadura.

Existem duas formas de proteção denominadas de bainhas metálicas e de bainhas refratárias (cerâmicas). As tabelas 11.1. e 11.2. representam as classes e utilizações das bainhas protetoras.

Tabela 11.1. Bainhas protetoras metálicas.

Metal	Temperatura máxima de utilização	Meio ambiente de utilização
Aço normal	400 °C	Gases e fumos não corrosivos; Banhos metálicos Zn, Pb e Sn
Ferro puro ou aço macio	700 °C	Banhos de sais e metais fundidos como Zn, Pb, Sn
Aço 18-8	700 °C	Indústrias químicas
Aço refratário de 25% Cr e 20% Ni	1 100 °C	Utilização generalizada exceto em meios sulfurosos (pouca porosidade)
Aço de 25% Cr	1 100 °C	Meios sulfuroso
Inconel de 75% Ni, 15% Cr e 2,5% Ti	1 200 °C	Banhos de sais
Ni e Ni-Cr: Ni = 60%; Cr = 1,5%	1 200 °C	Sais de têmpera

Tabela 11.2. Bainhas protetoras cerâmicas.

Cerâmico	Temperatura máxima de utilização	Meio ambiente de utilização
Silício aluminoso	1 500 °C	Uso corrente
Sílica	1 500 °C	Para proteção de ataques químicos
Grafite	1 700 °C	Aço fundido
Corindo (alumina) Al ₂ O ₃ = 99,6% Fe ₂ O ₃ = 0,2%	1 700 °C	Impermeável aos gases até 1 700 °C; Resiste bem a alterações de temperatura

Regra geral, os pares termoeletrônicos são protegidos por tubos interiores e exteriores. Os exteriores servem para promover alguma resistência ao choque e para evitar que os mesmos se dobrem por efeito da temperatura. Os tubos interiores servem para evitar a ação prejudicial dos gases. As figuras 11.2. e 11.3. apresentam alguns termopares e cabos compensados (cabos utilizados para a necessidade de prolongamento dos fios do termopar que evitam a promoção de erros de leitura), a sua cor e a sua designação nos sistemas IEC, ANSI ou noutro.

12.2.9. Instruções de trabalho

A especificação de tratamento térmico ou procedimento de soldadura poderá ser utilizada como instrução de trabalho.

Tais instruções deverão ser preparadas a partir de uma especificação de tratamento térmico “qualificada” e não carecer de qualificação separada.

12.2.10. Número de pontos de medição

Durante a realização do tratamento térmico, a temperatura deverá ser determinada com recurso a um número mínimo de pontos de medição, de acordo com a tabela 12.3. e 12.4. Se o método de aquecimento assim o exigir, os termopares deverão ser tapados, de forma a evitar o aquecimento direto. As temperaturas em ambos os extremos da zona ou banda de aquecimento poderão ser monitoradas, se assim especificado.

Tabela 12.3. Número mínimo de pontos de medição em forno.

Volume do forno (m ³)	Número de pontos de medição
$V < 40$	2
$40 \leq V < 60$	3
$60 \leq V < 80$	4
$80 \leq V < 100$	5
≥ 100	6

Se o forno for dividido em secções de controlo de temperatura, por exemplo dividido em trás, meio e frente, é recomendada pelo menos uma medição em cada secção.

No tratamento térmico em forno, a localização dos pontos de medição de temperatura deve ser especificada de forma a que se alcance uma temperatura o mais uniforme possível.

Os termopares poderão ser colocados nas peças, se especificado. A acoplação dos termopares deverá ser realizada de tal forma que evite alteração no componente a tratar.

TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

UMA ABORDAGEM AO MUNDO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

JORGE ALEXANDRE SILVA

2ª EDIÇÃO

Sobre a obra

Esta obra foi concebida como um guia prático para profissionais da área da metalurgia e metalomecânica, abordando a temática dos tratamentos térmicos dos aços de forma acessível e descomplicada. É escrita numa linguagem clara e de fácil compreensão, evitando a complexidade metalúrgica que o estudo aprofundado dos tratamentos térmicos exige, e focando-se em transmitir os fundamentos essenciais destes tratamentos e do seu contexto prático. Compilando e simplificando informação proveniente de diversas fontes, esta publicação reflete a experiência prática acumulada ao longo de vários anos na área dos tratamentos térmicos, apresentando uma perspetiva fundamentada e orientada para as necessidades do leitor.

Os conteúdos deste manual diferem dos tradicionais manuais técnicos, pois agregam tanto os tratamentos térmicos convencionais, realizados em fornos de tratamento térmico, como os tratamentos térmicos aplicados a soldaduras, realizados com equipamentos dedicados. A integração de temas relacionados com a qualidade e a sua ligação aos referenciais internacionais oferece uma visão abrangente e completa, ideal para profissionais que procuram um entendimento mais amplo e prático deste campo.

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, e atualmente doutorando pela Universidade do Minho. Frequentou diversas formações em tratamentos térmicos em Portugal, Espanha, Alemanha e Estados Unidos da América. Desde 2004, desempenha funções na empresa Traterme - Tratamentos Térmicos, Lda., como responsável técnico e diretor de operações.

Cumulativamente, é sócio fundador da NDTEAM – empresa especializada em ensaios não destrutivos – e desenvolve diversas atividades de consultoria e formação para empresas de diferentes setores da metalomecânica. Foi co-responsável pela criação da especialização de metalurgia na Ordem dos Engenheiros e é coordenador do Colégio de Materiais da Região Norte da mesma Ordem, onde também já desempenhou o cargo de vogal. Além disso, é professor no ISAG, no MBA Executivo. Orador em diversos seminários e conferências, foi membro organizador da 1ª Conferência de Tratamentos Térmicos realizada em Portugal (2012). É autor e coautor de várias publicações em revistas da especialidade em Portugal e Espanha.

É Membro Sênior da Ordem dos Engenheiros e membro do painel de examinadores do Instituto de Soldadura e Qualidade. É também Membro da International Association of Engineers. Pertence a diversas associações de referência na área, como a Heat Treating Society, AWT, A3TS, entre outras.

Apoio



Também disponível em formato papel



ISBN: 978-989-917-740-6



9 789899 177406

www.quanticaeditora.pt