

LIGAS NÃO FERROSAS DE ENGENHARIA

PRINCIPAIS APLICAÇÕES, TRATAMENTOS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

ANTÔNIO GONÇALVES DE MAGALHÃES

AUTOR

António Gonçalves de Magalhães

TÍTULO

LIGAS NÃO FERROSAS DE ENGENHARIA – Principais Aplicações, Tratamentos e Propriedades Mecânicas

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 · info@booki.pt – www.booki.pt

REVISÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN

Delineatura – Design de Comunicação · www.delineatura.pt

APOIO

CENFIM – Centro de Formação Profissional da Indústria Metalúrgica e Metalomecânica · www.cenfim.pt
Alpha Engenharia – www.alphaengenharia.pt

IMPRESSÃO

Dezembro, 2021

DEPÓSITO LEGAL

482556/21



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2021 | Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

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

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

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

CDU

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

ISBN

Papel: 9789899017559

E-book: 9789899017566

Catálogo da publicação

Família: Engenharia Mecânica

Subfamília: Materiais/Metalúrgica

AOS LEITORES	VII
INTRODUÇÃO	9
1. O ALUMÍNIO E AS SUAS LIGAS	13
1.1. Aplicações	13
1.2. Codificação das ligas de alumínio	15
1.3. Ligas alumínio – cobre	16
1.4. Ligas alumínio – silício	18
1.4.1. Modificação das ligas de alumínio – silício	19
1.5. Ligas alumínio – magnésio	21
1.5.1. Diagrama de equilíbrio	21
1.5.2. Principais propriedades e aplicações	23
1.6. Ligas alumínio – zinco	24
1.7. Ligas alumínio – manganés	25
1.8. Outros elementos de liga com o alumínio	28
1.9. O tratamento térmico das ligas de alumínio	29
1.9.1. Distensão	29
1.9.2. Homogeneização	29
1.9.3. Amaciamento	30
1.9.3.1. Restauração	30
1.9.3.2. Recristalização	30
1.9.3.3. Recozimento de precipitação	32
1.9.4. Envelhecimento por precipitação estrutural	32
1.9.4.1. Solubilização	33
1.9.4.2. Arrefecimento	33
1.9.4.3. Precipitação estrutural	34
1.9.5. Classificação das diferentes condições de tratamento	35
1.9.6. Origem do aumento de dureza através do tratamento de envelhecimento e da queda de dureza causada pelo superenvelhecimento	38
1.9.7. Tratamentos termomecânicos – Envelhecimento termomecânico	42
1.10. Anodização do alumínio e das suas ligas	42
1.11. Colmatação	43
2. MAGNÉSIO E LIGAS DE MAGNÉSIO	45
2.1. Classificação ASTM	45
2.2. Classificação UNS	47
2.3. Aplicações	47
2.4. Precauções no manuseamento do magnésio	48
2.5. Principais ligas de magnésio	48
2.6. Tratamentos térmicos	49
3. ZINCO E LIGAS DE ZINCO	51
3.1. Efeito das principais impurezas	51
3.2. Ligas de zinco	52
3.2.1. Ligas com 4% de alumínio	53
3.2.2. Ligas com 4% de alumínio e 3% de cobre	54
3.2.3. Ligas com 12% de alumínio	54
3.2.4. Ligas com 35% de alumínio	55
3.3. Composição e designação do zinco e das suas principais ligas	55
3.4. Tratamento térmico do zinco e suas ligas	56

4.	COBRE E LIGAS DE COBRE	57
4.1.	Designação do cobre e suas ligas	57
4.2.	Ligas de cobre	58
4.2.1.	Latões	58
4.2.2.	Bronzes	60
4.2.3.	Ligas cuproníquel	63
4.3.	Tratamentos térmicos do cobre e respetivas ligas	64
4.3.1.	Latões	64
4.3.2.	Bronzes	64
4.4.	Temperaturas de recozimento de algumas ligas de cobre	65
5.	NÍQUEL E LIGAS DE NÍQUEL	67
5.1.	Níquel comercialmente puro	67
5.2.	Ligas de níquel	68
5.2.1.	Ligas de níquel com cobre	68
5.2.2.	Ligas de níquel com molibdénio	69
5.2.3.	Ligas de níquel com crómio	71
5.2.4.	Ligas de níquel com titânio	72
5.2.5.	Ligas complexas	73
5.2.6.	Superligas de níquel	73
5.3.	Tratamento térmico do níquel e respetivas ligas	76
6.	TITÂNIO E LIGAS DE TITÂNIO	77
6.1.	Titânio e respetivas ligas	78
6.1.1.	Titânio puro	78
6.1.2.	Ligas α	79
6.1.3.	Ligas quase – α	79
6.1.4.	Ligas $\alpha + \beta$	80
6.1.5.	Ligas β	80
6.2.	Classificação das ligas de titânio	80
6.3.	Tratamento térmico do titânio e respetivas ligas	81
6.3.1.	Tipologia dos tratamentos	82
7.	BERÍLIO E LIGAS DE BERÍLIO	85
8.	CHUMBO E LIGAS DE CHUMBO	87
8.1.	Aplicações	87
8.2.	Chumbo e ligas de chumbo	88
8.3.	Tratamento térmico em ligas de chumbo	88
9.	ESTANHO E LIGAS DE ESTANHO	91
9.1.	Aplicações	91
9.2.	Estanho e ligas de estanho	92
9.3.	Tratamento térmico do estanho e respetivas ligas	94
10.	LIGAS REFRAATÁRIAS	97
10.1.	Molibdénio	97
10.2.	Tungsténio	98
10.3.	Tântalo	99
10.4.	Nióbio	100
10.5.	Rénio	101
10.6.	Háfnio	102
	QUESTÕES PROPOSTAS PARA REVISÃO DE CONTEÚDOS	CV
	ANEXOS	CXXI
	BIBLIOGRAFIA E WEBGRAFIA	CXXXIII
	ÍNDICE DE FIGURAS	CXXXVII
	ÍNDICE DE TABELAS	CXLI

Consoante o principal processo de fabrico a que se destinam, as ligas de alumínio podem ser classificadas em dois grupos distintos:

- **Ligas para deformação plástica:** ligas formadas por uma solução sólida deformável a frio ou a quente e disponibilizadas no mercado sob a forma de chapas e perfis;
- **Ligas para fundição:** ligas com constituintes de composição eutética que apresentam melhor colabilidade, menor tendência para rechupes, fissuração e segregações que são empregues para a produção de peças pelo processo de fundição. As suas principais características são:
 - Baixa viscosidade, o que facilita o preenchimento de secções finas;
 - Baixa temperatura de fusão, possibilitando a utilização de moldes metálicos e um menor custo de processamento, nomeadamente, custos energéticos associados ao processo de fusão;
 - Elevado coeficiente de transferência de calor, possibilitando a realização de ciclos de fundição curtos;
 - O teor de hidrogénio (que apresenta solubilidade significativa em ligas de alumínio) pode ser controlado pelos processos de desga-seificação;
 - Não apresentam tendência significativa para o fenómeno de fissuração a quente;
 - Não apresentam interações ou reações do tipo metal-molde e, conseqüentemente, apresentam bom acabamento superficial após a fundição.

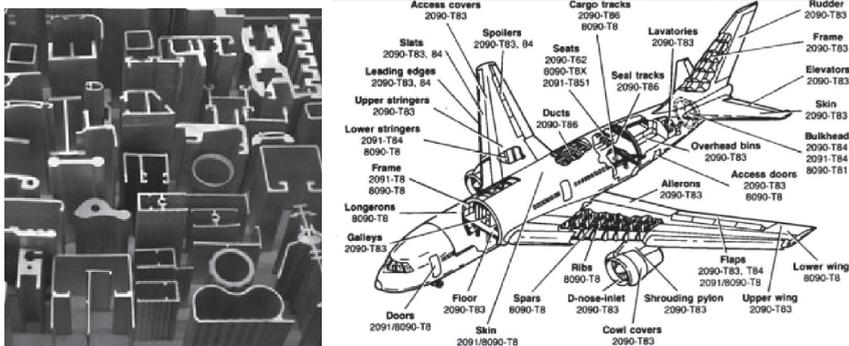


Figura 1.1. Aplicação do alumínio no setor da construção (produção de perfis) e na indústria aeronáutica.

Fontes: APAL – Associação Portuguesa do Alumínio; “Fuselagem Aeroespacial – Mecânica de Precisão – Fatec SP, Notas de estudo de Engenharia Mecânica” de Marcos Merighi.

- **Série 8xxx** corresponde a ligas de alumínio com outros elementos de liga como, por exemplo, o lítio.
- **Ligas de fundição:** são classificadas com 4 algarismos em que os três primeiros e o último estão separados por um ponto. O primeiro algarismo diz respeito, tal como nas ligas para deformação plástica, ao principal elemento de liga.
 - **Série 1xx.x** alumínio puro (99,5%);
 - **Série 2xx.x** ligas com Cu;
 - **Série 3xx.x** ligas com Si e Cu ou Mg;
 - **Série 4xx.x** ligas com Si;
 - **Série 5xx.x** ligas com Mg;
 - **Série 6xx.x** série livre;
 - **Série 7xx.x** ligas com Zn;
 - **Série 8xx.x** ligas com Sn.

1.3. LIGAS ALUMÍNIO - COBRE

O cobre produz um efeito endurecedor muito significativo. Daí que as ligas alumínio-cobre, cujo diagrama de equilíbrio é representado na figura 1.2., apresentem excepcionais propriedades mecânicas.

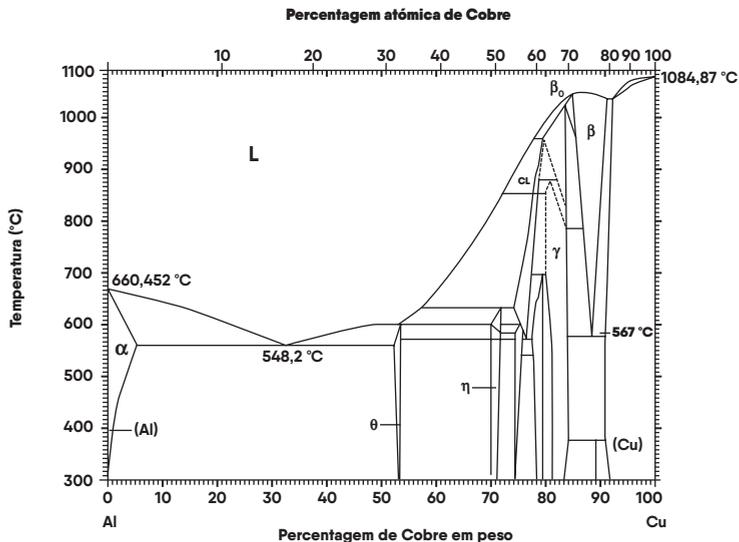


Figura 1.2. Diagrama de equilíbrio das ligas Al-Cu.

Fonte: Adaptações de ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

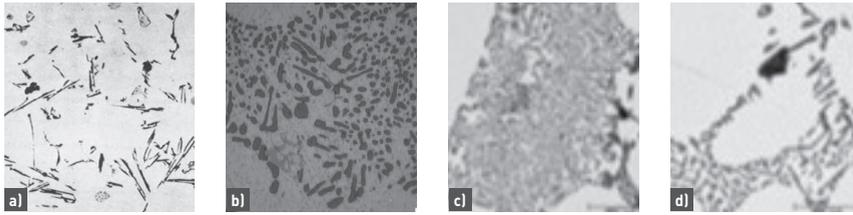


FIGURA 1.5. Microestrutura de uma liga do tipo A356 com modificação por estrôncio: **a)** sem modificação; **b)** com 0,0047% Sr; **c)** com 0,0156% Sr; **d)** com 0,0720% Sr.

Fonte: Adaptada de Nafisi, S. e R. Ghomashchi, "Effects of modification during conventional and semi-solid metal processing of A356 Al-Si alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 2006. 415(1-2): p. 273-285).

As propriedades mecânicas das ligas de Al-Si-Mg são fundamentalmente dependentes da microestrutura e dos parâmetros associados ao processo de fundição. Estas ligas podem ainda ser sujeitas a tratamento térmico que comporta a solubilização e o envelhecimento. Porque realizado a temperatura próxima do eutético, a solubilização promove a dissolução de fases intermetálicas e a modificação térmica das partículas de silício, quer por globulização, quer por coalescimento. Este efeito é ilustrado na figura 1.6. Com a realização do tratamento de solubilização a 540 °C e arrefecimento em água as partículas de silício apresentam-se arredondadas e aglomeradas, o que é acompanhado de uma melhoria das propriedades mecânicas.



FIGURA 1.6. Modificação de uma liga Al7Si0.3Mg com tratamento de solubilização: **a)** estrutura bruta de fusão; **b)** solubilização a 540 °C durante 4 horas; **c)** solubilização a 540 °C durante 6 horas.

Fonte: Adaptada de Azevedo, T.L.F., *Processamento de ligas Al7Si0.3Mg na Firmago, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEUP, julho, 2014, pp.45.*

O tratamento térmico pode, também, decorrer na presença do elemento modificador. Esta situação corresponde, por regra, a uma estrutura de maior homogeneidade. A título de exemplo, podemos encontrar na tabela 1.2. propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio-silício moldadas em areia.

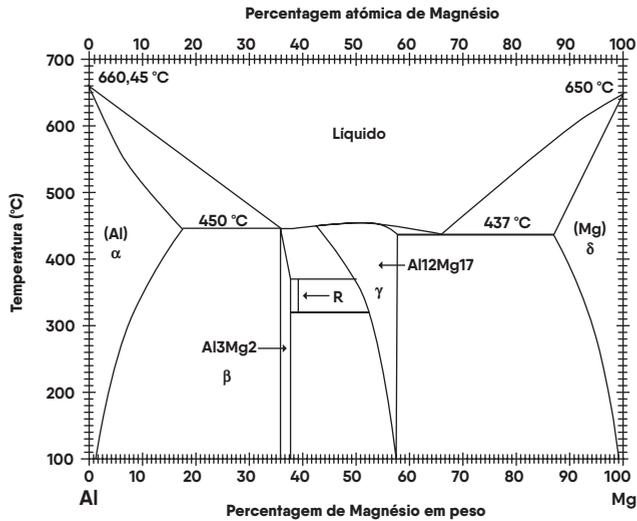


FIGURA 1.7. Diagrama de equilíbrio das ligas Al-Mg.

Fonte: Adaptações de ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

É importante notar que estas ligas podem possuir estruturas instáveis⁴ como:

- A fase β que tem tendência a precipitar em planos de deslizamento e em contornos de grão, quando ultrapassados os 3-4% de magnésio. A corrosão intergranular e a corrosão sob tensão podem ocorrer em ambientes corrosivos. A fase β precipita à temperatura ambiente e é acelerada por deformação a frio considerável ou quando a estrutura é levemente aquecida. A adição de pequenas quantidades de crómio e manganés melhoram as propriedades mecânicas e diminuem a precipitação;
- As ligas endurecíveis por deformação plástica podem sofrer amaciamento à temperatura ambiente. O grau de amaciamento aumenta com o aumento da porcentagem de trabalho a frio exercido. Este amaciamento é explicado pelo processo de relaxação ou pela precipitação da fase β em planos de deslizamento.

Em ligas ricas em magnésio, o ponto eutético ocorre à temperatura de 437 °C, possuindo uma solubilidade máxima de 12,7% de alumínio. A solubilidade reduz-se com a diminuição da temperatura. A 200 °C, por exemplo, a estrutura hexagonal compacta do magnésio pode dissolver cerca de 3,2% de alumínio.

⁴ Uma estrutura diz-se **instável** quando o estado termodinâmico que lhe está associado não corresponde ao mínimo de energia.

1.6. LIGAS ALUMÍNIO - ZINCO

As ligas de alumínio com zinco, cujo diagrama de equilíbrio é representado na figura 1.8., concorrem com as ligas de alumínio-cobre, embora apresentem globalmente piores características. O diagrama de equilíbrio apresenta uma solução sólida α de zinco em alumínio, uma solução sólida β de alumínio em zinco, também identificada por alguns autores como zinco elementar e uma solução sólida intermédia. O zinco apresenta elevado grau de solubilidade no alumínio. Para provocar o mesmo efeito endurecedor do cobre é necessária, contudo, uma maior quantidade de zinco. Podemos encontrar três sistemas entre as ligas de alumínio-zinco: o sistema binário Al-Zn, o sistema ternário Al-Zn-Mg e o sistema quaternário Al-Zn-Mg-Cu. Tal como as ligas de Al-Cu e Al-Mg-Si, são ligas endurecíveis por precipitação estrutural, ou seja, mediante tratamento térmico controlado em condições específicas, geralmente de solubilização e envelhecimento, apresentam ganhos significativos de dureza. As principais aplicações são na indústria aeronáutica, uma vez que as ligas da série 7XXX são aquelas que atingem os níveis mais elevados de resistência mecânica entre as ligas de alumínio.

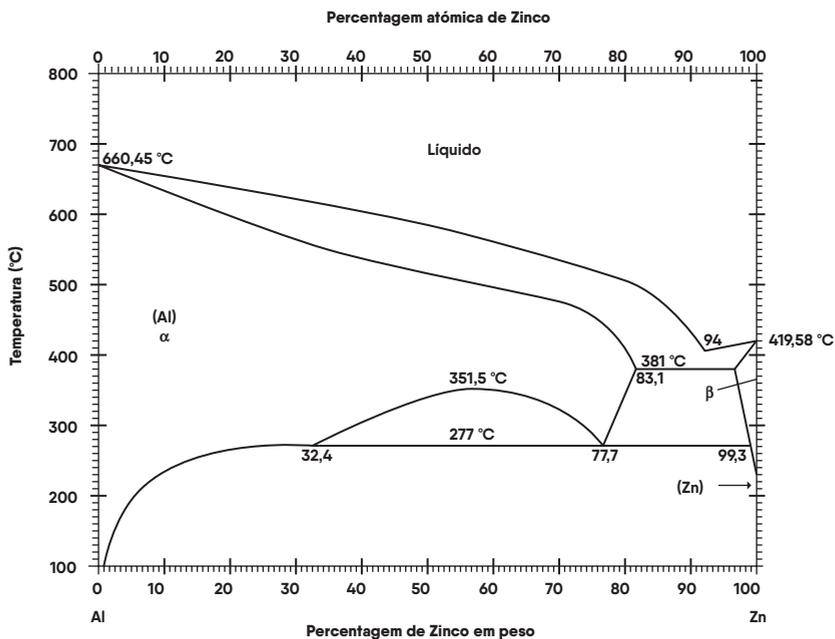


FIGURA 1.8. Diagrama de equilíbrio das ligas Al-Zn.

Fonte: Adaptações de ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

peritética (50-100 °C), devido ao zonamento estrutural⁷, da segregação interdendrítica⁸ e dos eutéticos e peritéticos, concentrados nas juntas de grão. Não ter isto em consideração poderia ocasionar uma fusão parcial, podendo haver oxidação, o que tornaria a liga “queimada”⁹.

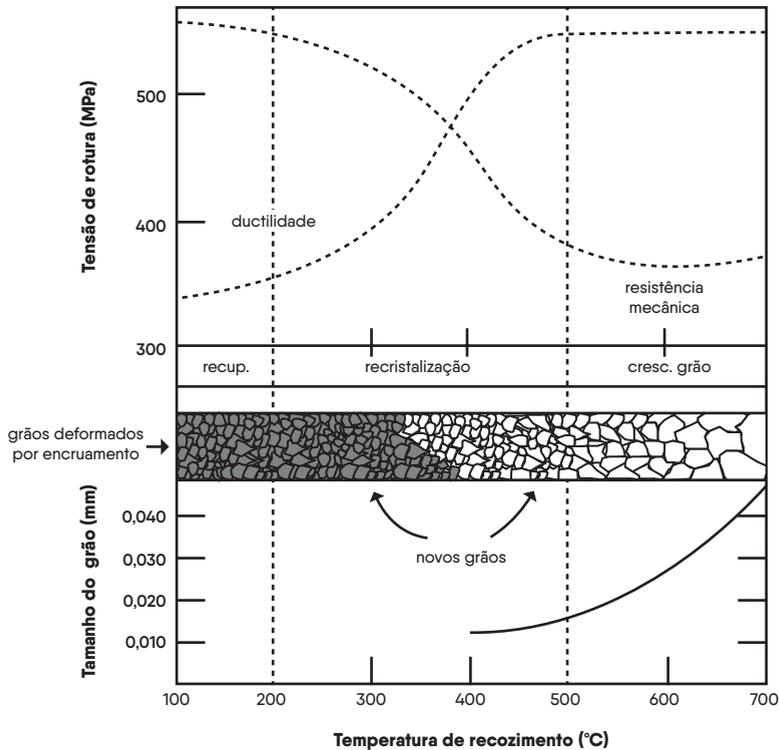


FIGURA 1.10. Representação esquemática do processo de recristalização.

Fonte: Adaptação de W. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9.ª ed., John Wiley & Sons, Inc., 2013.

⁷ Ocorre **zonamento** estrutural quando uma liga com intervalo de solidificação arrefece em condições de equilíbrio e se verifica uma diferença de composição entre as primeiras regiões a solidificar e as últimas. A consequência desta microsegregação é a diminuição das propriedades.

⁸ **Segregação interdendrítica** é um tipo de microsegregação que ocorre durante a solidificação dendrítica. Os ramos das dendrites crescem com as extremidades voltadas para o líquido e entre estes o líquido remanescente é enriquecido pelo soluto rejeitado pela fase sólida.

⁹ **Liga queimada** pode ocorrer em diagramas com uma transformação eutética e na presença de fenômenos de segregação que tendem a localizar-se predominantemente nas juntas de grão de tal forma que a posterior elevação de temperatura pode conduzir à desagregação do metal. A recuperação deste estado só pode ser realizada voltando de novo ao estado líquido.

1.9.4.3. PRECIPITAÇÃO ESTRUTURAL

Sobre o fenómeno da precipitação estrutural nas ligas de alumínio tratáveis termicamente, vejamos cada um dos casos referidos:

- Envelhecimento artificial (maturação artificial)

O efeito da precipitação é bastante acelerado mediante o aquecimento a temperaturas na ordem dos 95 a 205 °C, bastante inferiores à temperatura da linha de solubilidade (acima da qual ocorre a solubilização dos átomos de soluto);

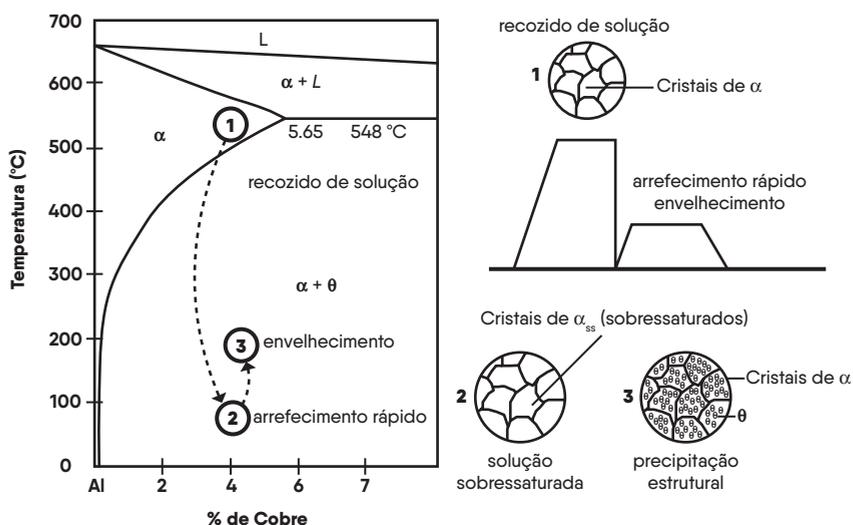


FIGURA 1.11. Evolução da microestrutura durante o tratamento de uma liga de alumínio com cobre.

Fonte: Adaptação de Donald R. Askeland e Pradeep P. Phulé, *The Science and Engineering of Materials*, 4.ª ed.

- Envelhecimento natural (maturação natural)

Utiliza-se o termo envelhecimento natural ou maturação natural para designar os processos de precipitação que ocorrem com a manutenção da liga à temperatura ambiente. Nestas condições o processo de envelhecimento por precipitação é muito mais lento e com níveis de dureza atingida bem inferiores aos que ocorrem no envelhecimento artificial.

ambiente), além dos níveis de dureza que podem ser atingidos (bem mais altos para o envelhecimento artificial), é a cinética do processo: enquanto o pico de dureza no envelhecimento artificial pode ser obtido em algumas horas (tanto mais rápido quanto mais alta for a temperatura), no envelhecimento natural o máximo de dureza (inferior ao obtido em forno) somente acontece após uma semana ou mais de manutenção do material à temperatura ambiente.

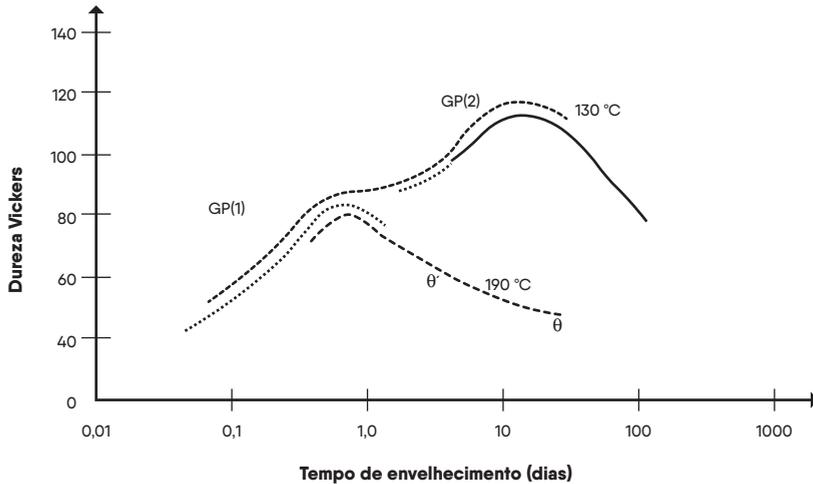


FIGURA 1.12. Envelhecimento de uma liga de alumínio-cobre com representação das zonas GP1 e GP2.

Fonte: Adaptação de J. M. Silcock, T. J. Heal e H. K. Hardy, *Alluminium*, 1, American Society of Metals, 1967, p.123.

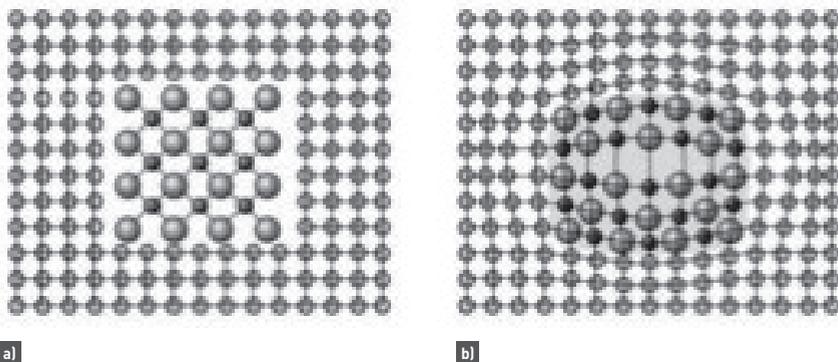


FIGURA 1.13. Representação de precipitados coerentes e incoerentes com a matriz; **(a)** precipitado incoerente: não existe qualquer relação com a estrutura cristalina da matriz envolvente; **(b)** precipitado coerente: existe uma relação coerente entre a estrutura cristalina do precipitado e da matriz envolvente.

Fonte: Adaptação de Donald R. Askeland; Pradeep e P. Phulé, *The Science and Engineering of Materials*, 4.º ed.

91: indica os percentuais de alumínio (9%) e zinco (1%) presentes na liga
A: indica que esta liga foi a primeira a ser registada na ASTM com estas quantidades de alumínio e zinco

T6: indica que a liga sofreu tratamento térmico de solubilização e foi envelhecida artificialmente

2.2. CLASSIFICAÇÃO UNS

Outro sistema de identificação é o sistema de numeração unificado (UNS)¹⁵. Este sistema reserva as designações de M10001 até M19999 para as ligas de magnésio.

2.3. APLICAÇÕES

As ligas de magnésio são largamente utilizadas na indústria aeronáutica em componentes de motores, na fuselagem e em trens de aterragem, por exemplo. Encontra aplicação, também, na indústria automóvel (caixas de engrenagem, rodas, colunas de direção), indústria de armamento (mísseis) e em alguns componentes eletrónicos. As figuras seguintes, 2.1. a 2.4., ilustram algumas destas aplicações.

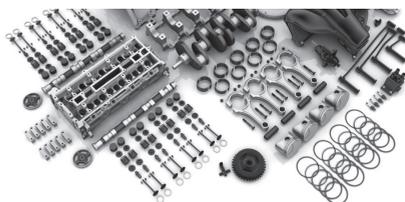


FIGURA 2.1. Componentes diversos.



FIGURA 2.2. Aro de roda de bicicleta.



FIGURA 2.3. Bloco de motor.



FIGURA 2.4. Jante para automóvel.

Fontes: APAL ("Extrusão"); "Fuselagem Aeroespacial – Mecânica de Precisão – Fatec SP, Notas de estudo de Engenharia Mecânica" de Marcos Merighi; Mercado Livre; Oxl.

¹⁵ O **sistema de classificação UNS** (Unified Numbering System), congrega várias entidades que representam diversos fabricantes e consumidores de vários tipos de metais e ligas.

Tendo como base o diagrama de fases Cu-Zn, representado na figura 4.1., podemos dividir os latões em dois grandes grupos, função da estrutura que apresentam – ver esquema da figura 4.2.

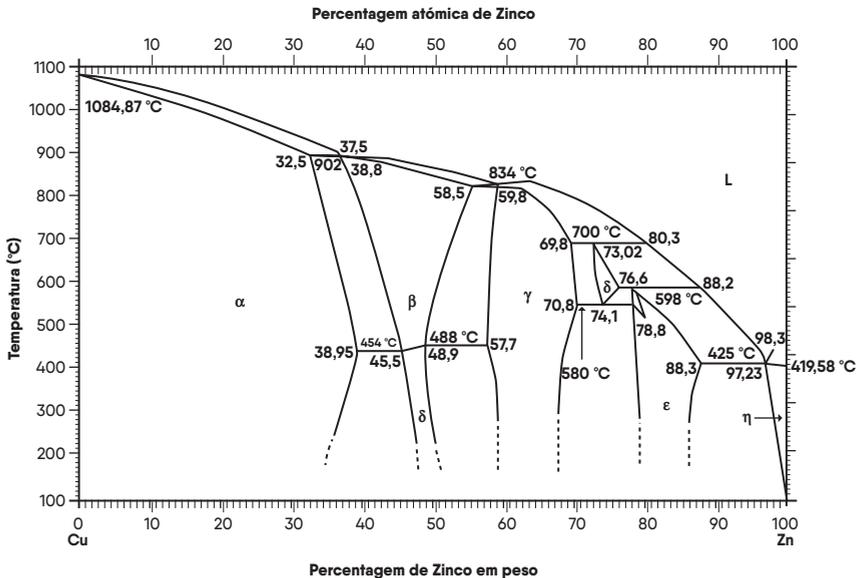


FIGURA 4.1. Diagrama de equilíbrio Cu-Zn.

Fonte: Adaptações de ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

Na tabela 4.1. são indicadas composições tipo para latões com as morfologias α e β .

TABELA 4.1. Tipos de latões e respetivas composições químicas.

Tipo	Designação comercial	Composição principal
α	C22000 – Latão comercial	90% Cu – 10% Zn
α	C23000 – Latão vermelho	85% Cu – 15% Zn
α	C24000 – Latão baixa liga	80% Cu – 20% Zn
α	C26000 – Latão para munição	70% Cu – 30% Zn
α	C27000 – Latão amarelo	65% Cu – 35% Zn
$\alpha + \beta$	C28000 – Metal Muntz	60% Cu – 40% Zn

A presença de um segundo elemento, para além do zinco, leva à classificação de latões especiais. Os latões especiais são ligas ternárias de cobre, zinco e outro elemento que dará a designação pelo qual são conhecidos: latão ao alumínio, latão com chumbo, latão com estanho, latão com silício, etc. A existência de outros elementos além dos citados levam à formação dos latões designados como complexos.

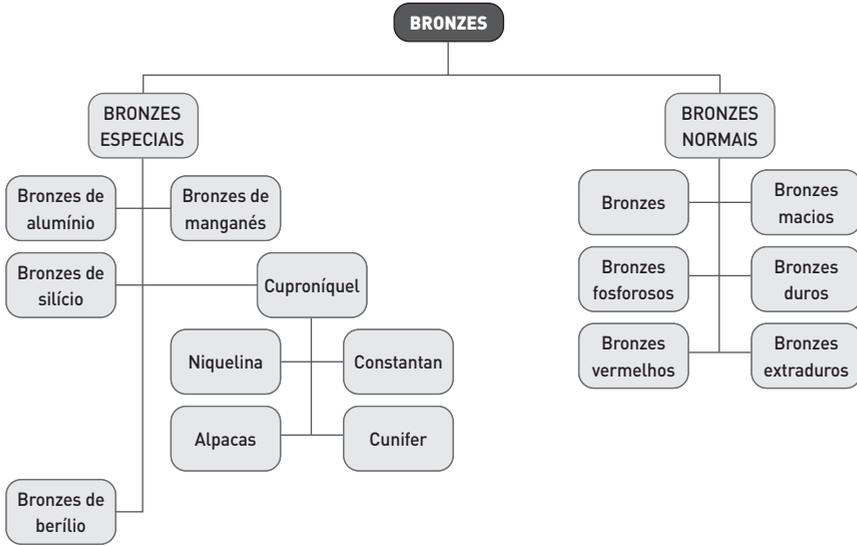


FIGURA 4.3. Tipos de bronzes.

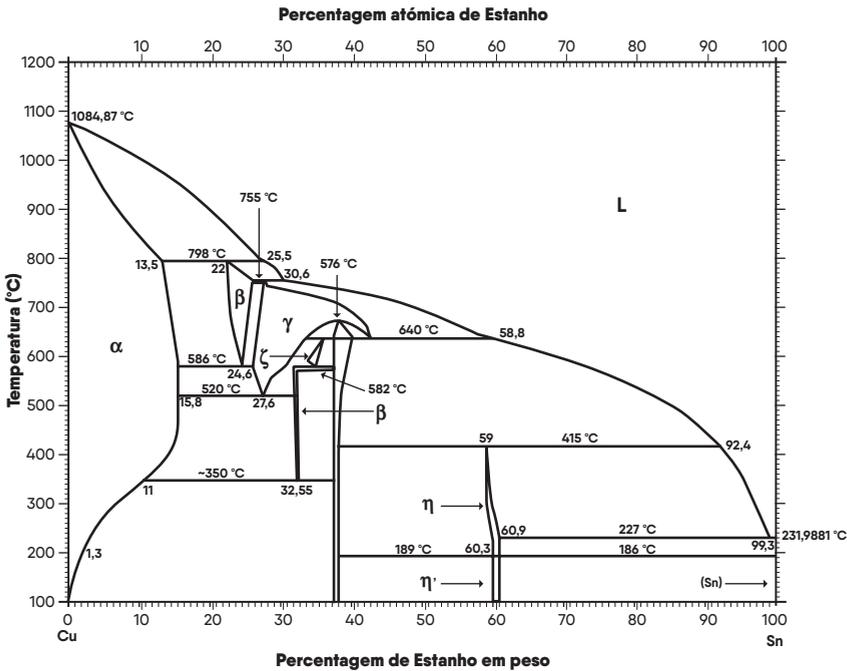


FIGURA 4.4. Diagrama de equilíbrio Cu-Sn.

FONTE: Adaptações de ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

resistências elétricas para aquecimento porque apresentam elevada resistividade. Comercialmente são disponibilizadas no mercado ligas para fundição e para deformação. A tabela 5.3. apresenta algumas propriedades mais características de ambos os tipos.

TABELA 5.3. Propriedades de algumas ligas Ni-Cr comerciais.

Liga	E (GPa)	σ_y (MPa)	R_m (MPa)	σ_f (MPa)	ϵ (%)	T_{max} (°C)	ρ_e ($\mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$)
Ligas de fundição							
Inconel 713, as cast	200-210	685-900	755-990	200-360	3-8	852-982	140-148
Inconel 713L, as cast	190-200	675-825	805-985	200-360	12-20	852-982	135-150
Ligas de deformação							
N06008	155-175	520-590	880-970	350-485	30-40	947-1150	112-124
Nichrome V, annealed	205-220	365-460	615-760	245-380	20-35	937-1150	102-114
Nickrome, annealed	192-208	310-380	645-800	255-400	25-55	887-1100	108-116

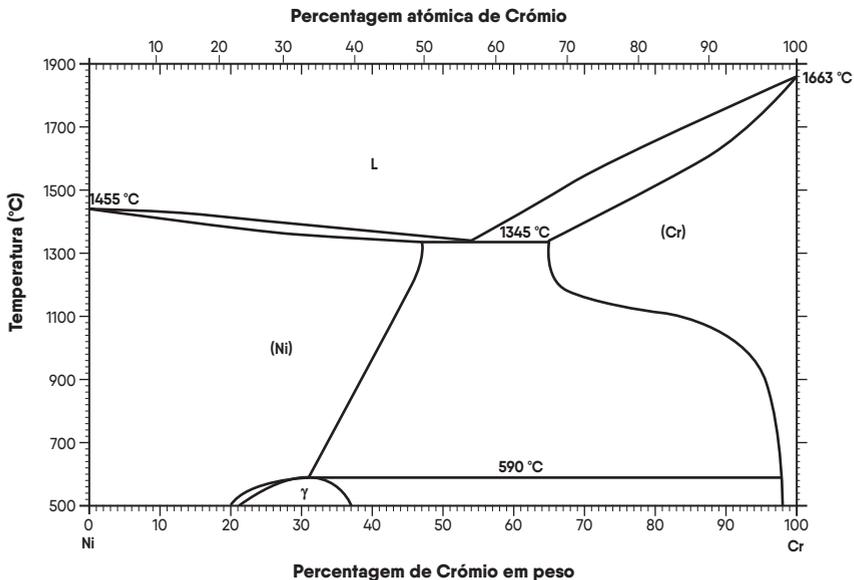


FIGURA 5.3. Diagrama de equilíbrio níquel-crómio.

Fonte: Adaptações de ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

5.2.4. LIGAS DE NÍQUEL COM TITÂNIO

As ligas de níquel-titânio (figura 5.4.), conhecidas por nitinol, são ligas em que os dois elementos estão presentes em porcentagens atômicas praticamente iguais. O nitinol exibe duas propriedades únicas: efeito térmico de memória e superelasticidade. Podemos ainda acrescentar uma elevada capacidade de amortecimento e biocompatibilidade. Os efeitos de memória

As principais aplicações destas ligas são nas indústrias aeroespacial e biomédica, em ambientes extremamente corrosivos e para a produção de equipamentos industriais avançados utilizados para na produção de energia e nos transportes. Na figura 6.2 ilustram-se três exemplos de aplicações do titânio e respetivas ligas.



FIGURA 6.2. Aplicações industriais de titânio em implantes dentários, próteses e no trem de aterragem do B787 Dreamliner.

Fonte: Clínica Odontológica BH – Edson Mariano e DefesaNet (“Titânio – Boeing, Airbus e Embraer em Guerra”).

6.1. TITÂNIO E RESPATIVAS LIGAS

Para além do titânio comercialmente puro, podemos encontrar uma diversidade de ligas de titânio para aplicações industriais. Estas ligas dividem-se basicamente em quatro grandes grupos: ligas monofásicas α , ligas quase- α , ligas bifásicas $\alpha + \beta$ e ligas monofásicas β . A estrutura apresentada depende essencialmente dos elementos de liga e da realização de tratamentos térmicos.

6.1.1. TITÂNIO PURO

O titânio comercialmente puro apresenta teores residuais de oxigénio na sua composição, o que afeta a sua resistência mecânica. Apresenta como propriedades típicas: módulo de elasticidade de aproximadamente 103 GPa, resistência máxima à tração entre 240 e 690 MPa e ductilidades de 40 a 60%. Tratando-se de um elemento fortemente reativo facilmente se junta com outros elementos como o Al, V, Cr, Fe, Mn e Sn, formando sistemas binários, ternários e até mais complexos. A presença destes elementos aumenta a dureza e a resistência mecânica, embora promovam redução de ductilidade. Na figura 6.3. ilustra-se o diagrama de equilíbrio Ti-Al, um dos sistemas mais importantes.

TABELA 7.1. Propriedades do berílio e de algumas das suas ligas.

Designação	E (GPa)	σ_y (MPa)	R_m (MPa)	ϵ_r (%)	σ_t (MPa)	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	Composição
AlBeMet 162	179-200	193-324	262-447	2-10,3	172-207	320-340	Be 60-40 Al 36-40
Beralcast 191, cast	198-208	136-150	196-227	1,9-2,6	110-160	320-350	Be 61-69 Al 28-34 Si 1,6-2,4
Beralcast 310	185-238	315-330	388-444	10,6-11,5	210-232	320-350	Be 60-70 Al 27-38 Ag 1,5-2,5
Beralcast 363, cast	198-212	209-223	269-301	2,9-3,2	111-123	320-350	Be 61-69 Al 25-35 Ag 2,6-3,4 Co 0,65-1,4 Ge 0,55-0,95
Beryllium grade S 200-FC, cold isostatically pressed	290-315	205-260	280-355	2-4	180-270	530-830	Be 98-100
Beryllium grade S 200-FH, hot isostatically pressed	290-315	275-365	410-545	2-4	265-410	530-830	Be 98-100

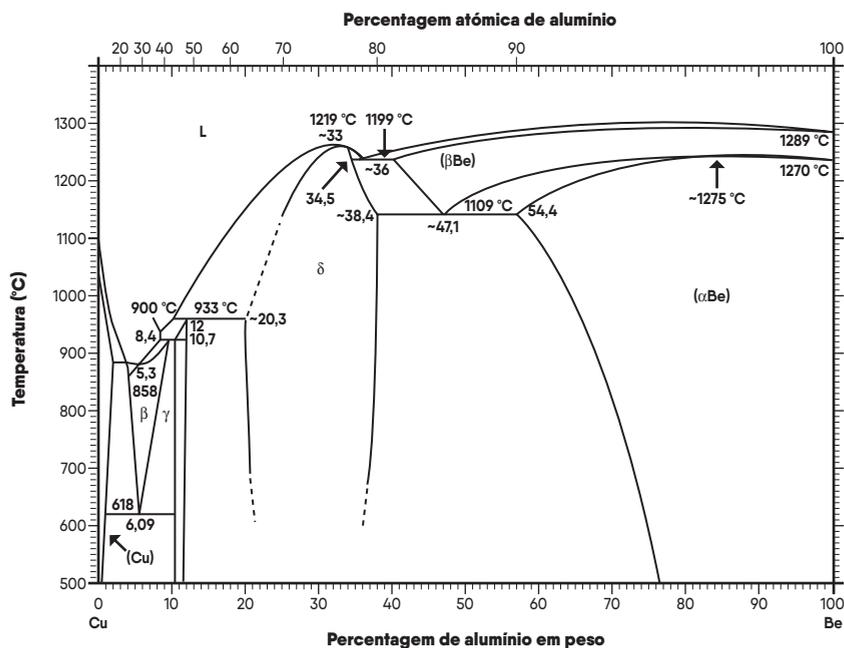
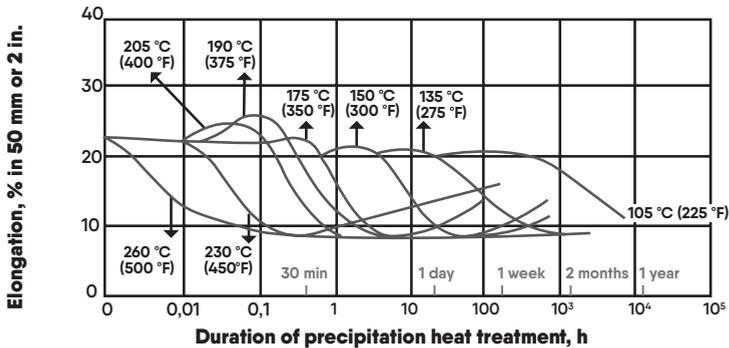
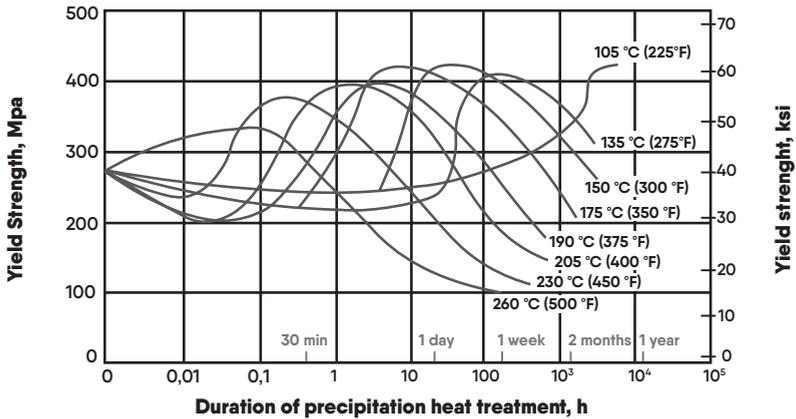
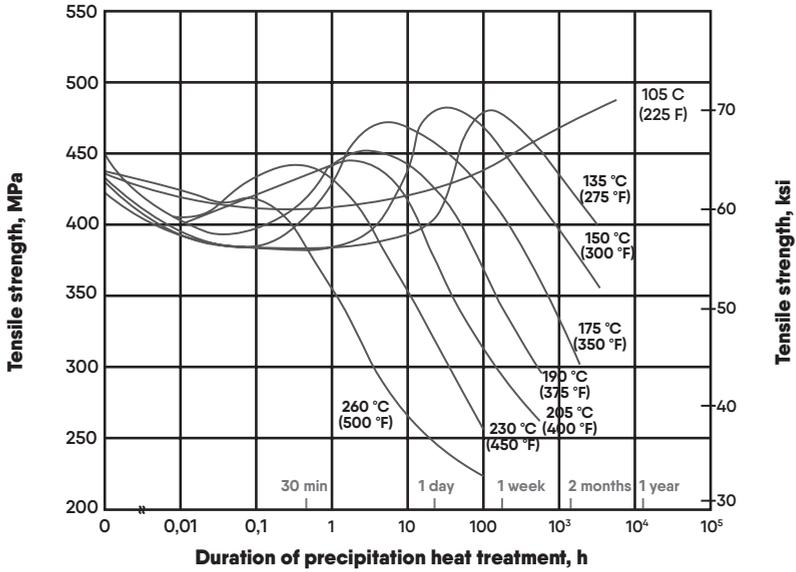


FIGURA 7.2. Diagrama de equilrio do sistema berílio-cobre.

Fonte: Adaptações de ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

ANEXO AO CASO DE ESTUDO N.º 1: CARACTERÍSTICAS DE ENVELHECIMENTO PARA A LIGA Z014



Fonte: Retirada de ASM Handbook; Heat Treating, vol. 4: 10.^a Edição: American Society for Materials, Ohio, USA.

LIGAS NÃO FERROSAS DE ENGENHARIA

PRINCIPAIS APLICAÇÕES, TRATAMENTOS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

ANTÔNIO GONÇALVES DE MAGALHÃES

Sobre a obra

Esta obra destina-se a estudantes das áreas de engenharia, cursos profissionais e afins que estejam interessados no estudo ou aprofundamento dos conhecimentos relacionados com as ligas metálicas não ferrosas, as suas aplicações e os seus tratamentos.

Resultando de um conjunto de notas de aulas, teóricas e práticas, lecionadas ao longo de vários anos, tem como complemento algumas questões com a tipologia verdadeiro/falso e de escolha múltipla, além de casos de estudo para reflexão, com o objetivo de permitir a fácil consolidação dos assuntos tratados. Neste sentido, o objetivo é que possa ser útil a jovens estudantes e todos aqueles que, no presente e no futuro, vão dedicar algum do seu tempo a estudar materiais, que acabam por estar sistematicamente ligados ao princípio de qualquer realização de engenharia.

Sobre o autor

António Gonçalves de Magalhães obteve a Licenciatura, o Mestrado e o Doutoramento pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Atualmente exerce funções de Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal. No DEM exerceu diversas tarefas de coordenação como coordenador do grupo de disciplinas de Materiais e Processos de Fabrico e Diretor de Curso da Licenciatura de Engenharia Mecânica. Foi membro do Conselho Pedagógico, Conselho Técnico-Científico e foi recentemente eleito para membro do Conselho Coordenador de Cursos.

Atualmente leciona disciplinas na área dos materiais metálicos, não metálicos e seleção de materiais nos cursos de Licenciatura e Mestrado em Engenharia Mecânica. Exerce ainda tarefas de orientação de estágio e de Mestrado. As suas áreas de especialização incluem os materiais compósitos, os adesivos estruturais, a caracterização mecânica de materiais e a avaliação não destrutiva. Participou como arguente em vários júris académicos de Doutoramento, Mestrado e Mestrado integrado. É autor e coautor de 4 livros sobre a caracterização de materiais, juntas adesivas e materiais compósitos, publicados em língua portuguesa, bem como autor ou coautor de cerca de 30 publicações em revista internacional, cerca de 60 artigos científicos em conferências nacionais e internacionais, e participou em alguns projetos nacionais e europeus nas áreas científicas referidas. Colabora frequentemente com algumas revistas internacionais como revisor.

Apoio



Alpha
ENGENHARIA

Também disponível em formato e-book



ISBN: 978-989-901-755-9



www.engebook.pt

engebook