

FACULDADE DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia Mecânica e
Gestão Industrial

PROGRAMA PRODEP
Medida 4.3
Acção de Formação nº 4

RELATÓRIO FINAL

"Estudo do comportamento termomecânico de materiais metálicos"

por

Natália Cristina Martins Ribeiro

Porto e FEUP, 30 de Julho de 1993

4

621(0473)/LEM 1952/R18n
01 10 09

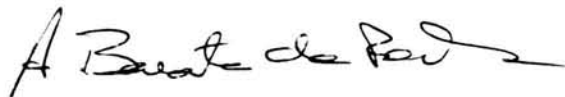
PARECER

O aluno finalista do Curso de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial **NATALIA CRISTINA MARTINS RIBEIRO**, realizou no INEGI, no âmbito do programa PRODEP, medida 4.3/7/7/92/93, um estágio cujo trabalho se encontra descrito no relatório apresentado com o título **"Estudo do comportamento termomecânico de materiais metálicos"**

Durante a execução do conjunto de tarefas que lhe foram atribuídas, o referido estagiário atingiu os objectivos que lhe foram propostos, mostrando ter conhecimentos adequados.

Face à qualidade do trabalho produzido cumpre-me informar que o estágio realizado se revestiu de grande interesse para esta instituição

Porto, 27 de Dezembro de 1993



O Supervisor

PARECER

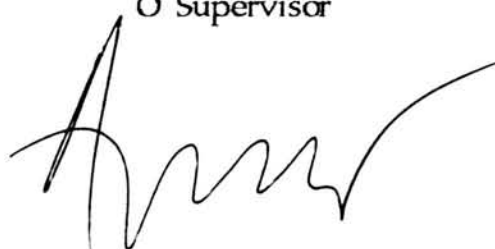
O aluno finalista do Curso de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial **NATÁLIA CRISTINA MARTINS RIBEIRO**, realizou no INEGI, no âmbito do programa PRODEP, medida 4.3/7/7/92/93, um estágio cujo trabalho se encontra descrito no relatório apresentado com o título **"Estudo do comportamento termomecânico de materiais metálicos"**

Durante a execução do conjunto de tarefas que lhe foram atribuídas, o referido estagiário atingiu os objectivos que lhe foram propostos, mostrando ter conhecimentos adequados e empenho.

Face à qualidade do trabalho produzido cumpre-me informar que o estágio realizado se revestiu de grande interesse para a formação de alunos, como futuros engenheiros.

Porto, 27 de Dezembro de 1993

O Supervisor



SUPERVISOR
António Barbedo Magalhães
(Professor Catedrático)

Este trabalho teve a colaboração de:
Arnaldo Manuel Guedes Pinto (Finalista da F.E.U.P.)

Natália Cristina Ribeiro

ÍNDICE

1. Objectivo	3
2. Conceitos teóricos sobre fadiga térmica	5
2.1. Definição.....	5
2.2. Resistência à fadiga térmica	6
2.2.1. Características físicas	7
2.2.2. Características mecânicas	10
2.2.3. Factores metalúrgicos	11
2.2.4. Factores ambientais	12
3. Noções gerais sobre ferros fundidos	13
3.1. Introdução	13
3.2. Ferro fundido cinzento	13
3.2.1. Propriedades físicas e mecânicas	14
3.2.2. Curvas S-N para os ferros fundidos cinzentos	15
3.2.3. Estabilidade dimensional	16
3.3. Ferros fundidos nodulares.....	16
3.3.1. Propriedades físicas e mecânicas	17
3.3.2. Condutividade térmica e eléctrica.....	18
3.4. Ferros fundidos resistentes a altas temperaturas	19
3.4.1 Propriedades físicas.....	20
3.4.2. Propriedades mecânicas a altas temperaturas.....	21
3.5. Ferros fundidos de baixa liga	23
3.5.1. Oxidação.....	23
3.5.2. Tensão de rotura num ensaio de fluência	25

4. Noções gerais sobre latões	28
4.1. Introdução	28
4.2. Microestrutura	28
4.3. Influência do teor em Zinco nas propriedades dos Latões.....	30
4.4. Elementos de liga	33
4.5. Propriedades típicas dos Latões.....	36
4.5.1. Composição química: colabilidade e fluidez	36
4.5.2. Propriedades mecânicas dos Latões de fundição	39
4.5.3. Propriedades físicas e térmicas.....	40
4.6. Efeito da temperatura nas propriedades dos latões	44
5. Factores influentes nas tensões térmicas.....	48
5.1. Modo de fixação.....	48
5.2. Revestimentos	49
6. Estudo dos materiais para coquilhas	52
6.1. Introdução	52
6.2. Critérios de selecção.....	56
7. Observações	63
8. Conclusões.....	66
Bibliografia.....	68

1. Objectivo

O objectivo deste trabalho consiste no estudo dos seguintes materiais metálicos:

- Ferros fundidos
- Latões

Este estudo divide-se em duas fases:

- i) Estudo bibliográfico
- ii) Ensaios de fadiga térmica

Neste estudo bibliográfico são tratados assuntos fundamentais para avaliar as características dos referidos materiais para eventual utilização no fabrico de coquilhas, e que são os seguintes:

- Resistência à fadiga térmica;
- Influência das propriedades mecânicas e físicas no comportamento à fadiga térmica:
 - coeficiente de dilatação térmica;
 - coeficiente de condutibilidade térmica;
 - tensão de cedência;
 - módulo de elasticidade;
 - densidade;
 - calor específico.

Combinando estas propriedades de forma coerente, formularam-se critérios de selecção. Tendo como base estes critérios é possível concluir qual ou quais os materiais com maiores potencialidades para a aplicação no caso em estudo.

Não foi possível realizar a segunda fase do trabalho. Contudo é do maior interesse que num trabalho futuro se realize a parte experimental, para contrapor com os resultados obtidos através da pesquisa bibliográfica.

2. Conceitos teóricos sobre fadiga térmica

2.1. Definição

Segundo D. A. Spera, define-se *fadiga térmica* como sendo a deterioração gradual e eventual rotura do material devido a ciclos alternados de aquecimento e arrefecimento, durante os quais a expansão térmica do material é parcialmente ou completamente restringida [1].

O facto desta restrição não se dar de igual forma em toda a peça contribuirá fortemente para o aparecimento de tensões térmicas e eventualmente iniciação e propagação de fissuras.

Fadiga térmica pode ser englobada no grupo referente à fadiga de baixo ciclo (inferior a 50000 ciclos).

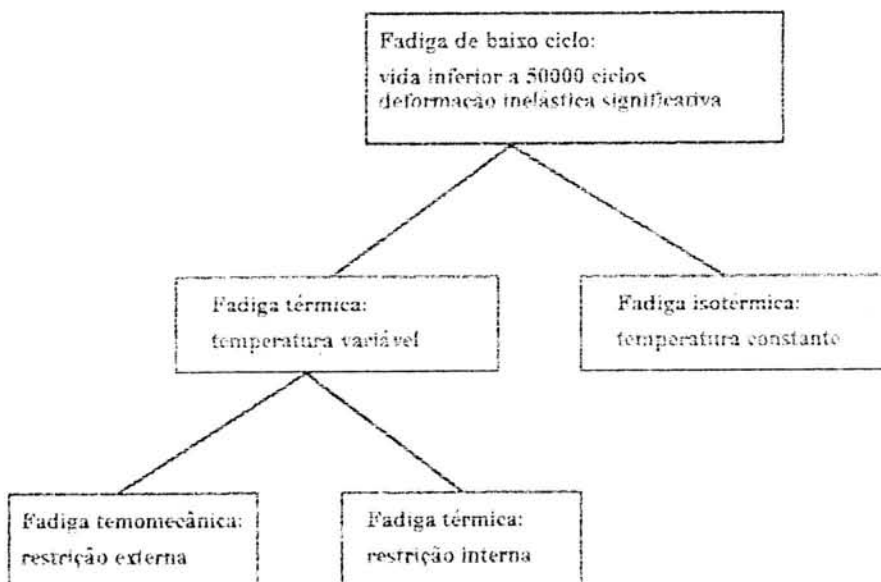


Fig. 2.a - Terminologia proposta para fadiga a alta temperatura

Subdivide-se em dois grandes grupos:

- isotérmica: temperatura constante ao longo do tempo.
- térmica: temperatura variável no tempo.

Quanto às restrições impostas, podem ter duas origens: uma *interna* à peça que está sujeita ao ciclo térmico, é provocada pela existência de gradientes térmicos internos ou pela natureza heterógena do material que o constitui; a outra *externa* à peça, é introduzida por forças exteriores aplicadas na superfície.

O primeiro tipo de restrição é característico em componentes sujeitos a aquecimentos e arrefecimentos superficiais muito rápidos ou então em materiais que apresentam estruturas heterógenas que conduzem a diferentes coeficientes de dilatação térmica - este tipo de deterioração é denominado *fadiga térmica* (thermal-stress fatigue).

A restrição externa é responsável pela *fadiga termo-mecânica* (thermal-mechanical fatigue); este tipo de fadiga consiste na oposição externa à dilatação térmica de um corpo e é representada em laboratório pelo simulador de Coffin, no qual se encastram as extremidades de um provete uniaxial que é aquecido uniformemente na sua secção transversal [1].

2.2. Resistência à fadiga térmica

Existem quatro tipos de factores que controlam a resistência à fadiga térmica. Uma parte destes factores é inerente ao próprio material e subdivide-se em:

- características físicas;
- características mecânicas;
- factores metalúrgicos.

A outra parte é:

- factores provocados pelo meio ambiente e condições a que está sujeito.

2.2.1. Características físicas

Quando a superfície de um corpo é aquecida ou arrefecida rapidamente há trocas de calor e criam-se no material elevados gradientes térmicos intimamente relacionados com a difusividade térmica.

A difusividade térmica (a) é dada por:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

em que:

k - condutibilidade térmica [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{K}$]

ρ - massa volúmica [Kg/m^3]

c_p - calor específico [$\text{J}/\text{Kg}^\circ\text{K}$]

Quanto maior for o valor da difusividade térmica mais rapidamente o calor se difundirá através do material. Um valor elevado deste parâmetro pode resultar tanto de um valor elevado da condutibilidade térmica quanto de um valor baixo da capacidade térmica (ρc_p).

No entanto para o caso das coquilhas, é mais importante ter um produto $\rho \cdot c_p$ grande, este facto encontra-se devidamente explicado no capítulo 6.

Uma vez que nos metais o termo ($\rho \cdot c_p$) varia pouco, então a difusividade térmica (a) sofre uma evolução no mesmo sentido que a condutibilidade térmica (k). A tabela 2.1 mostra, para uma temperatura de 20°C , valores de ρ , c_p e $\rho \cdot c_p$ de alguns metais.

Tabela 2.1 - Propriedades a 20°C [20]

METAL	ρ [g/cm ³]	C_p [KJ/Kg°K]	$\rho * C_p$ [KJ/m ³ °K] [x10 ³]
Ferro	7.897	0.452	3.57
Cobre	8.954	0.3831	3.43
Alumínio	2.707	0.896	2.43
Níquel	8.906	0.446	3.97
Prata	10.525	0.234	2.46
Zinco	7.144	0.3834	2.75

Depois do que acabamos de expor torna-se claro que a um aumento da *condutibilidade térmica* (k) do material corresponde uma diminuição dos gradientes térmicos e por conseguinte das tensões associadas.

Alguns autores sugerem como solução para problemas de fadiga térmica a escolha de materiais que apresentem razões de $E\alpha/k$ baixos, em que E é o módulo de elasticidade, α o coeficiente de dilatação térmica e k a condutibilidade térmica do material.

Para justificar este facto são apresentadas as seguintes razões:

- o produto $E\alpha$ representa o cálculo elástico da tensão térmica produzida se a dilatação do material é restringida numa direcção e aquecida de 1°C, pelo que constitui um parâmetro de classificação;
- a amplitude da deformação térmica é inversamente proporcional à *condutibilidade térmica*, pois depende da severidade dos gradientes térmicos.

Murphy [3] considerou que as tensões térmicas são proporcionais à razão:

$$E \cdot \alpha \frac{\rho \cdot c_p}{k}$$

E - módulo de elasticidade
 α - coef. de dilatação térmica
 ρ - massa volúmica
 c_p - calor específico
k - condutibilidade térmica

Contudo estas características são importantes apenas quando podemos utilizar diferentes tipos de ligas com α , k e E significativamente diferentes.

O coeficiente de dilatação térmica (α) e a condutibilidade térmica (k), dependem da composição química, enquanto que o módulo de elasticidade (E), é em certos casos função da estrutura do material.

Esta última dependência é, por exemplo, utilizada nas superligas com solidificação direccional, em que o módulo de elasticidade segundo a direcção de crescimento de grão é inferior em 30% a 50% ao da mesma liga com uma estrutura policristalina aleatória [3].

De salientar ainda que:

- sendo o *módulo de elasticidade* (E), o quociente da tensão (dentro do limite elástico) para a correspondente deformação, então um alto módulo indica um elevado nível de tensões, para um nível específico de deformação, quer produzidas mecânicamente ou termicamente. Um baixo módulo representa um baixo nível de tensão para a mesma quantidade de deformação [3].
- as tensões térmicas aparecem quando as variações dimensionais de um componente, resultantes do aumento da temperatura, são impedidas de ocorrer devido a algum tipo de restrição. Para o caso simples de uma barra com as extremidades fixas, a tensão térmica desenvolvida por variação de temperatura ΔT é [19]:

$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

onde:

α - coeficiente de dilatação térmica linear

E - módulo de elasticidade

Sabendo que as variações dimensionais de um dado componente são tanto maiores quanto maior for o coeficiente dilatação térmica (α) e o gradiente de temperaturas, então, pelo que acabamos de expôr, torna-se claro que a resistência à fadiga térmica decresce com o aumento deste coeficiente.

2.2.2. Características mecânicas

Se a amplitude de deformação plástica pode ser reduzida, a resistência à fadiga térmica aumenta. Para condições térmicas constantes isto é conseguido, não só à custa da optimização das características físicas, mas também por meio de um elevado *limite de cedência* do material a todas as temperaturas do ciclo térmico.

A resistência mecânica é a característica mais facilmente controlável. A redução da amplitude de deformação plástica à custa de um aumento do limite de cedência do material não é contudo a melhor solução em todos os casos. Este problema foi inicialmente posto em evidência por Coffin [2] com um trabalho sobre o efeito de uma pré-deformação a frio, sobre a resistência à fadiga térmica.

Ele concluiu que a pré-deformação reduz a *ductilidade* do material e por conseguinte diminui o número de ciclos à rotura quando o intervalo de temperaturas é grande (isto é, para fortes amplitudes de deformação plástica), mas tende a aumentar o tempo de vida do material quando a amplitude de temperaturas é reduzida (para fracas amplitudes de deformações plásticas).

White [20] por seu lado constatou que para grandes valores de deformação térmica o comportamento do material é dominado pela ductilidade à temperatura de serviço, enquanto que para valores fracos de deformação, a resistência mecânica apresenta-se como a mais importante, o que confirma o carácter oligocíclico da fadiga térmica. Segundo Forrest e Armstrong a resistência à fadiga térmica é melhorada, se a ductilidade fôr aumentada sem diminuição da resistência mecânica.

Por outro lado, a amplitude de deformação atingida durante o ciclo térmico, depende do *limite de elasticidade* e das características de *encruamento* do metal. Não se pode esquecer que o limite de elasticidade e o coeficiente de encruamento poderão variar, não somente com a temperatura, mas também com a velocidade de deformação aplicada [2].

2.2.3. Factores metalúrgicos

Uma das razões para a importância da estrutura metalúrgica sobre a resistência à fadiga térmica é a presença na estrutura de locais preferenciais à iniciação e propagação de fissuras, que poderão acelerar o processo de deterioração. Os pontos preferenciais de iniciação e propagação de fissuras têm como origem a fragilidade de partículas de uma fase mais dura e a criação local de níveis de tensão elevados, e ainda as diferentes características térmicas e mecânicas criadas pela heterogeneidade química e mecânica da estrutura. A influência dos factores metalúrgicos reflete-se também sobre as características mecânicas dos materiais e estes podem ser avaliados pelas suas características de ductilidade, seja em tracção, ou em fadiga oligocíclica.

A estrutura metalúrgica, pode também ser a origem de uma oxidação preferencial à superfície dos componentes. Howes mostrou a influência das juntas de grão como locais preferenciais de oxidação; isto tem como

consequência a criação de entalhes de óxidos, conduzindo à concentração de tensões que favorecem a iniciação das fissuras térmicas.

Um outro factor metalúrgico importante na resistência à fadiga térmica é a degradação com o ciclo térmico das propriedades mecânicas do material. A maior parte dos materiais é endurecido no decorrer de um tratamento térmico por um mecanismo de transformação martensítica ou de envelhecimento. Ora, o ciclo térmico, pode corresponder a um revenido da estrutura, ou a um sobre-envelhecimento do material, que pode conduzir a uma diminuição da resistência mecânica. Além disso, os mecanismos de revenido e sobre-envelhecimento são acelerados na presença de uma tensão e portanto, a degradação das características progride mais rapidamente quando o material é sujeito a um ciclo térmico. Este fenómeno foi frequentemente observado em superligas e em aços para ferramentas e é caracterizado por uma diminuição da dureza superficial das peças.

2.2.4. Factores ambientais

Dependendo da natureza do material e do meio agressivo, vários tipos de corrosão podem advir: oxidação, corrosão generalizada, etc.

A sua importância na deterioração por fadiga térmica depende dos efeitos sinérgicos dos diferentes factores. Estes fenómenos podem intervir tanto a nível de iniciação como na propagação de fissuras.

Geralmente há diferença nos coeficientes de dilatação térmica entre a matriz e os óxidos, tendo estes últimos valores mais baixos; esta diferença de coeficientes produz no decorrer das variações térmicas, variações relativas de volume entre as fases em presença, conduzindo ao aparecimento de tensões, depois à relaxação destas por formação de fissuras, a maior parte delas localizadas na camada de óxidos [2].

3. Noções gerais sobre ferros fundidos

3.1. Introdução

O termo *ferro fundido* abrange uma vasta família de ligas ferrosas; na sua composição entram elementos como o ferro e o carbono ($2 < \%C < 4$) e nas quais se formam durante a solidificação, grafite ou carboneto de ferro (Fe_3C) ou ambos os compostos.

Outros elementos tais como o silício, manganês, enxofre e fósforo entram na sua composição.

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos em especial - **resistência, ductilidade e módulo de elasticidade** - dependem fortemente da distribuição e estrutura dos microconstituintes. De seguida, estudar-se-ão alguns tipos de ferros fundidos mais interessantes para a fabricação de coquilhas.

3.2. Ferro fundido cinzento

Tabela 3.1 - Composição aproximada (%) [6]

TC	3.25 - 3.5
Mn	0.6 - 0.9
Si	1.8 - 2.3
Cr	0.05 - 0.2
Ni	0.05 - 0.2
Mo	0.015 - 0.1
Cu	0.15 - 0.4
P	0.12 máx
S	0.15 máx

3.2.1. Propriedades físicas e mecânicas

De acordo com o tipo de grafite existente na matriz, a tabela 3.2 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas dos f.f. cinzentos não ligados.

Tabela 3.2 - Propriedades físicas e mecânicas dos f. f. cinzentos [3]

Forma da grafite	Lamelar	Compacta	Nodular
Condutividade térmica k [W/m ^{°K}]	40-53	38-43	20-37
Coef. dilatação térmica α [10 ⁻⁶ /°K]	10-12.5	10-12.5	10-12.5
Módulo de elasticidade E [GN/m ²]	100-145	155-165	169-176
Resistência à tracção σ_t [N/mm ²]	150-400	365-460	370-800
Alongamento ϵ [%]	<1	1-4.5	2-17
Resistência à fadiga σ_f [N/mm ²]	68-152	178-220	186-304

Tabela 3.3 - Propriedades do ferro cinzento standard [4]

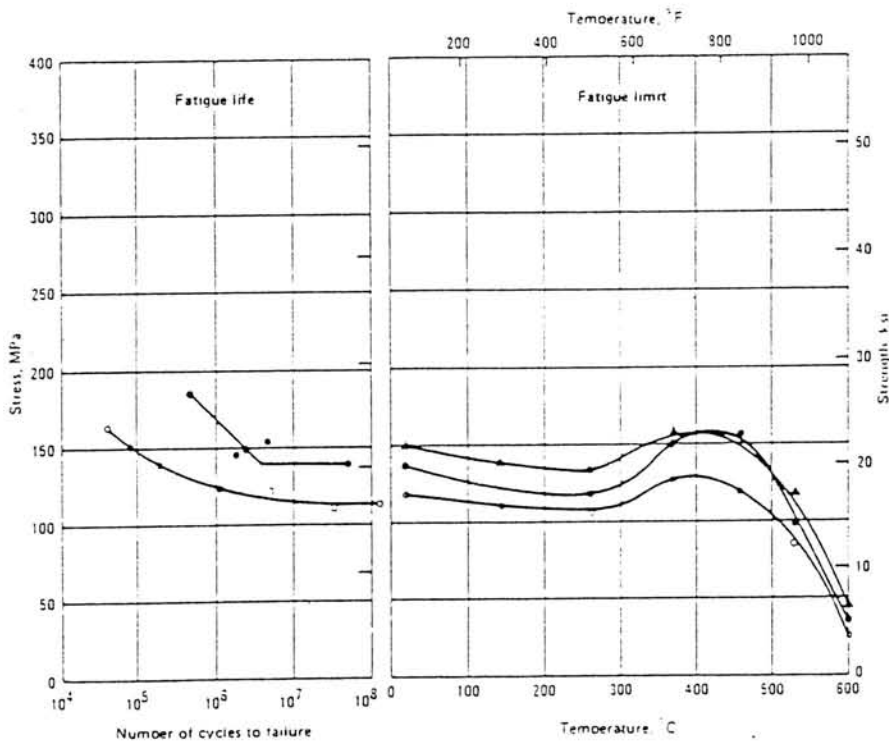
ASTM class	$\sigma_{tracção}$ [MPa]	σ_{fadiga} [MPa]	$\sigma_{comp.}$ [MPa]	DUREZA [HB]	E [GPa]
20	152	69	572	156	66-97
30	214	97	752	210	90-113
40	293	128	965	235	110-138
50	362	148	1130	262	130-157
60	431	169	1293	302	141-162

Tabela 3.4 - Propriedades físicas dos f. f. cinzentos [6]

α [10 ⁻⁶ /°K]	K [W/m°K]	ρ [g/cm ³]	C_p [J/Kg°K]
13 [0-500°C]	46	6.95-7.35	656 [0-500°C]

3.2.2. Curvas S-N para os ferros fundidos cinzentos

Composição: 2.84 C, 1.52 Si, 1.05 Mn, 0.07 P,
0.12 S, 0.31 Cr, 0.2 Ni, 0.37 Cu



○ provete entalhado

● provete não entalhado

Fig. 3.a

Fig. 3.b

Devido ao facto das curvas de limite de fadiga serem de difícil determinação, normalmente estes gráficos acarretam certa percentagem de erro. As figuras anteriores (3.a e 3.b) mostram curvas S-N para f.f. cinzentos em ciclos de flexão alternada variando com temperatura e número de ciclos [6].

Cada ponto representa um ensaio efectuado a um provete.

3.2.3. Estabilidade dimensional

Mesmo na ausência de contracção externa, a permanência de um ferro fundido a altas temperaturas ($>480^{\circ}\text{C}$) pode provocar uma dilatação na peça causada por: grafitização do carbono combinado, oxidação da liga, mudanças de volume heterogéneo aquando das passagens nos pontos de transformação. Estes fenómenos são acelerados por aquecimentos e arrefecimentos sucessivos.

Como se sabe, a cementite decompõe-se (para temperaturas superiores a 500°C) em ferrite e grafite, o que corresponde a um aumento de volume.

Os elementos de liga estabilizadores da cementite, em especial o crómio, diminuem a dilatação.

Ferros fundidos cinzentos contendo 1% de Cr podem operar entre 480°C e 760°C sem que ocorram variações dimensionais [11].

3.3. Ferros fundidos nodulares

Os ferros fundidos nodulares definem-se como ligas de Fe-C-Si em que a grafite se apresenta sob a forma de nódulos.

Um elevado número de aplicações do f.f. nodular têm sido desenvolvidas devido ao seu alto módulo de elasticidade, elevada resistência e ductilidade, permitindo cargas elevadas associadas a baixas deflexões.

A composição química dos ferros nodulares influencia directamente as suas propriedades. Pequenas quantidades de níquel, molibedénio e cobre aumentam a resistência e a dureza. Grandes quantidades de silício, crómio, níquel ou cobre podem melhorar consideravelmente a resistência à corrosão ou as propriedades para aplicações a altas temperaturas.

Tabela 3.5 - Composição aproximada (%) [6]

TC	3.5 - 3.8
Mn	0.3 - 1
Si	2 - 2.8
Cr	0.08 máx
Ni	0.05 - 0.2
Mo	0.01 - 0.1
Cu	0.15 - 0.4
P	0.8 máx
S	0.02 máx
Mg	0.03 - 0.05

3.3.1. Propriedades físicas e mecânicas

Tabela 3.6 - Propriedades físicas dos f. f. nodulares [6]

α [$10^{-6}/^{\circ}\text{K}$]	K [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$]	ρ [g/cm^3]	C_D [$\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{K}$]
13.5 [20-500°C]	36	6.8-7.4	515 [20-500°C]

Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas dos ferros dúcteis standard [4]

Classe	Microestrutura	$\sigma_{\text{tracção}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{cedência}}$ [MPa]	ϵ [%]	Dureza [HB]
60-40-18	ferrítica	414	276	18	143-187
80-60-03	-	552	414	3	201 min
D4018	ferrítica	414	276	18	170 máx
D4512	ferrítica/perlítica	448	310	12	156-217
D7003	perlítica	689	483	3	241-302

3.3.2. Condutividade térmica e eléctrica

As condutividades térmica e eléctrica dos ferros fundidos, como em muitos outros metais, estão relacionadas de acordo com a lei de Wiedermann-Franz [7], que descreve ambas as propriedades em função da mobilidade dos electrões livres.

A forma das partículas de grafite afecta grandemente esta relação, como indicado na fig. 3.c. A condutividade térmica do ferro cinzento contendo grafite lamelar é consideravelmente superior à do aço, enquanto que a condutividade eléctrica é bastante baixa. Quando a forma da grafite muda progressivamente de lamelar para esférica, estes valores tendem a aproximar-se.

De acordo com o exposto, o ferro nodular tem alta condutividade eléctrica e baixa condutividade térmica relativamente ao ferro fundido cinzento.

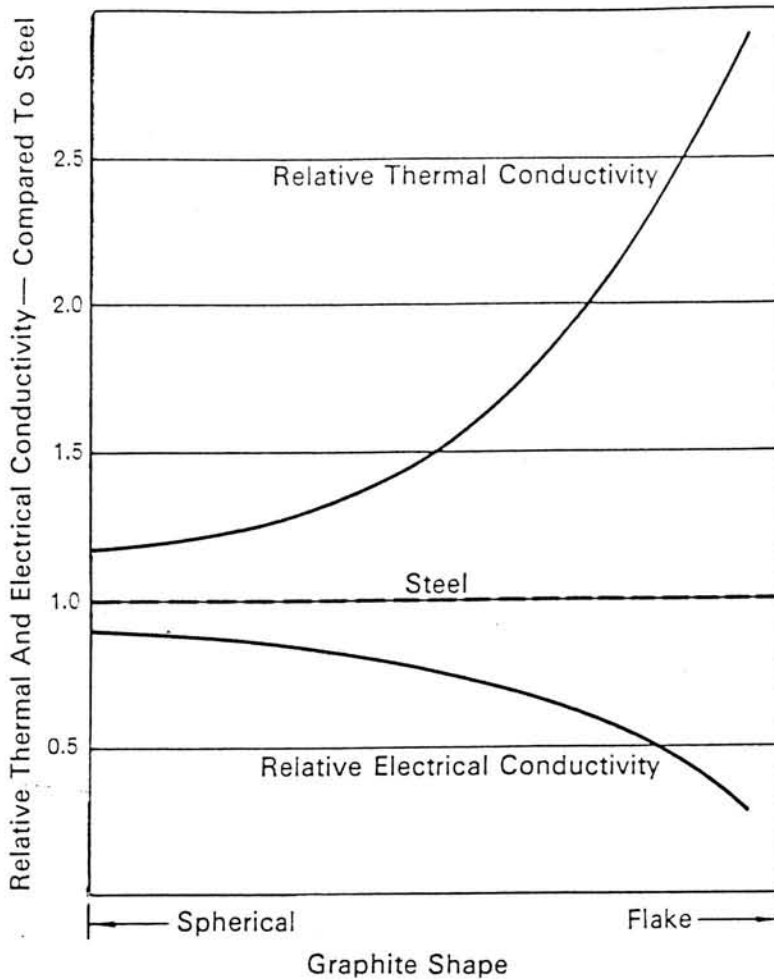


Fig. 3.c

Efeito da forma da grafite nas condutividades térmica e eléctrica dos ferros cinzento e nodular quando comparados com o aço.

3.4. Ferros fundidos resistentes a altas temperaturas

Os ferros fundidos aplicam-se, correntemente, a temperaturas elevadas, embora a sua utilização seja condicionada pelos seguintes factores:

- dilatação térmica: este material, sujeito a temperaturas elevadas, sofre uma dilatação resultante da decomposição da cémentite em grafite.
- oxidação: os repetidos ciclos de aquecimento a que estão sujeitas as peças facilitam a oxidação e desagregação do material.
- propriedades mecânicas à temperatura de utilização.

3.4.1. Propriedades físicas

Da tabela 3.8 é de destacar os ferros com elevado teor em Ni, dada a sua boa resistência à oxidação e à dilatação. Os f.f. austeníticos deste tipo têm a vantagem de apresentar maior tenacidade e resistência ao choque térmico do que as outras variedades de ferro, sendo utilizados em presença de atmosferas oxidantes a temperaturas da ordem dos 750°C.

Tabela 3.8 - Propriedades físicas [4]

FERROS CINZENTOS	ρ [g/cm ³]	α [10 ⁻⁶ /°K]	K [W/m°K]	Microestrutura
teor médio de Si	6.8-7.1	10.8	37	ferrítica
teor de Cr elevado	7.3-7.5	9.3-9.9	20	ferrítica
teor de Ni elevado	7.3-7.5	8.1-19.3	37-40	austenítica
Ni-Cr-Si	7.3-7.4	12.6-16.2	30	austenítica
teor de Al elevado	5.5-6.4	15.3	-	ferrítica
FERROS NODULARES				
teor médio de Si	7.1	10.8-13.5	-	ferrítica
teor de Ni elevado	7.4	18.7	13	austenítica
teor de Ni elevado	7.4	18.4	-	austenítica

3.4.2. Propriedades mecânicas a altas temperaturas

Quando os ferros fundidos são aquecidos durante longos períodos, a cerca de 650°C, estão sujeitos a fenómenos de dilatação (Growth). Este fenómeno está associado a uma "fractura da estrutura" e, no caso dos ferros cinzentos à oxidação das lamelas de grafite que aparecem à superfície.

Estudos recentes, envolvendo ferros fundidos quer cinzentos quer nodulares, demonstraram que, até temperaturas da ordem dos 400°C e após prolongados períodos de aquecimento, estes ferros não apresentaram dilatações apreciáveis.

A temperaturas mais elevadas os ferros fundidos mostraram pequenas dilatações e "escamação", com excepção de algumas ligas especiais; em geral os ferros "comuns" não são aconselháveis para longas aplicações onde condições de estabilidade dimensional são exigidas. A quantidade de "escamação" e dilatação devido à oxidação, que ocorre para os f.f. cinzentos entre 400-600°C, aumenta com a aspereza e quantidade de grafite, estando estruturas de grafite muito finas mais susceptíveis a esta ocorrência.

A "escamação" para a mesma gama de temperaturas, ocorre com menor intensidade nos ferros fundidos nodulares.

A dilatação ocorrerá durante a "fractura da estrutura" nos ferros nodulares (matriz perlítica) podendo ser controlado (tal como nos ferros cinzentos) pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga que estabilizam a estrutura.

Quando o ferro fundido cinzento vulgar é repetidamente aquecido a temperaturas de 750°C, submete-se a mudanças de fase e a permanentes aumentos de volume. Esta variação de volume está directamente relacionada com a diferença de densidades entre a grafite (2,2) e a matriz metálica (≈ 7.5).

Como a densidade da grafite é significativamente inferior à da matriz metálica, o seu teor em volume é bastante superior ao teor em peso de carbono grafítico (a grafite precipita com aumento de volume).

Este facto por sua vez, facilita ainda mais a dilatação devido à oxidação, implicando, por tal, um aumento de volume considerável ao fim de vários ciclos de aquecimento [5]. A tabela 3.9 dá-nos valores das propriedades mecânicas dos f. f. nodulares e cinzentos a temperaturas elevadas.

Tabela 3.9 - Propriedades dos f. f. cinzentos e nodulares a altas temperaturas [5]

Propriedades a 20°C		Temperatura de teste [°C]	Tensão de rotura [MPa] por fractura [horas]				
$\sigma_{\text{tracção}}$ [MPa]	Dureza [HB]		10	100	1000	10000	100000
F.F. CINZENTOS							
255	-	350	-	222	207	181	158
256	-	350	-	222	200	179	155
290	217	427	213	188	169	150	133
		538	99	64	41	-	-
323	225	427	252	232	214	200	182
		538	146	108	61	-	-
372	255	427	264	220	212	188	170
		538	144	117	84	-	-
399	258	538	147	124	65	-	-
427	269	427	362	334	311	287	267
		538	207	161	106	-	-
F.F. NODULARES							
712	217	400	-	430	342	257	170
905	273	427	445	352	285	-	-
		649	49	27	17	-	-
443	156	427	250	211	170	-	-
		649	33	23	16	-	-
457	156	427	234	202	175	152	129
		538	100	73	53	-	-
430	126	427	339	278	278	-	-
		760	53	38	23	-	-

Todos os ensaios tiveram uma duração mínima de 5000 horas, sendo os valores encontrados para períodos mais longos obtidos por extrapolação.

3.5. Ferros fundidos de baixa liga

O ferro dúctil contendo cerca de 3%C-4%Si-2%Mo e 0.5-1%Al exibe excelente resistência á rotura e a oxidação a temperaturas elevadas.

Esta liga é a mais promissora de um grupo de ferros fundidos nodulares com baixa percentagem de elementos de liga tendo na sua composição 3%C-4%Si e na qual, o efeito do Al, B, Cr, Co e Mo foram estudados.

A adição de Mo aos f.f.nodulares com 3%C-4%Si contribui significativamente para o aumento da resistência a altas temperaturas, tal facto deve-se à retenção dos carbonetos finamente dispersos na matriz durante longos períodos de exposição a estas temperaturas.

Adição de Cr e Co às ligas com 3%C-4%Si-2%Mo aumenta ainda mais a resistência a temperaturas altas.

3.5.1. Oxidação

Condições de ensaio:

Os provetes ensaiados tinham dimensões de 1*0.75*0.1 polegadas. Foram utilizados dois provetes idênticos em cada ensaio, as dimensões foram cuidadosamente medidas e os provetes limpos e colocados em cadinhos (posicionados de tal forma que o caudal de ar tivesse o máximo acesso à superfície dos provetes).

Todos os cadinhos (préviamente pesados) foram colocados num forno a 816°C, onde foram mantidos ininterruptamente durante 500 horas.

Posteriormente, fez-se passar um caudal de ar a uma velocidade média de 2 litros/min sobre os cadinhos.

A temperatura durante o teste foi controlada por meio de um termopar.

Ao completar a exposição ao ar, o peso ganho por unidade de área foi determinado e a profundidade de penetração da camada de óxido medida metalograficamente para cada uma das ligas.

Condições de ensaio:

Dimensão dos provetes: 1x0.75x0.1 pol.

Temperatura de ensaio: 816°C

Duração do ensaio: 500 horas

Caudal de ar: 2 l/min.

Tabela 3.10 - Resultados obtidos em testes de oxidação ao ar [13]

Tipo de Ferro	Peso ganho [mg/cm ²]	Penetração [mm]
4%Si-0.77%Al Ferro nodular	6.27	0.0889
Ferro nodular		
4%Si-2%Mo-0.55%Al	22.78	0.14732
4%Si-2%Mo-0.97%Al	15.24	0.09398 (0.103)*
4%Si-2%Mo-0.90%Al	6.24	0.06858
Materiais de referência		
F.F. nodular não ligado (2.8%Si)	119.85	0.4724
F.F. cinzento não ligado (1.98%Si)	217.25	0.89662
F.F. nodular austenítico (22.5%Ni-2.5%Si-0.2%Cr)	81.55	0.61214
F.F. nodular austenítico (30%Ni-5.5%Si-5%Cr)	7.24	0.0381
F.F. nodular austenítico (35%Ni-2.25%Si-2.5%Cr-1%Mo)	30.02	0.2362

* valor médio dos três ensaios

Comportamento à oxidação

Os resultados dos testes de oxidação, expostos na tabela 3.10, são não só apresentados como peso ganho, mas também como penetração da camada de óxido, este último indicando a profundidade à qual o metal foi convertido em óxido.

Os valores da penetração são mais representativos na avaliação da oxidação, contudo, o peso ganho representa o efeito combinado do acréscimo em peso de oxigénio (na formação de óxidos metálicos) e a perda de peso por descarborização.

Pode-se constatar que a resistência à oxidação do ferro dúctil (4%Si-2%Mo-Al) é bastante superior à dos materiais usados como referência. A penetração média da camada de óxido no metal base mostrou as seguintes proporções relativamente aos ferros anteriores:

- 1/4 do valor obtido para ferro nodular não ligado
- 1/8 do valor obtido para o ferro cinzento não ligado
- para dois dos ferros nodulares austeníticos os valores da penetração excederam em larga margem os valores obtidos para o ferro dúctil 4%Si-2%Mo-Al, contudo o ferro nodular austenítico 30%Ni-5.5%Si-5%Cr apresenta o valor mais baixo de todos os materiais tabelados [13].

3.5.2. Tensão de rotura num ensaio de fluência

Condições de ensaio:

Provetes com diâmetro de 7/8 de polegada

Tratamento de estabilização durante 4 horas

Temperatura de estabilização: 649°C ou 816°C

Tabela 3.11 - Resultados obtidos em testes de fluência a 649°C e 816°C de f.f. nodulares de baixa liga [13]

Composição [%]	Temperatura [°C]	Tensão [MPa]	Vida até rotura [hr]	Taxa de fluência [%/hr]	ε [%]	Tensão de rotura para 100 horas à temperatura indicada [MPa]	
						649°C	816°C
2.84%C 3.94%Si 2.05%Mo	649	103	5.4	-	11.0	60	-
		55	108	0.045	9.5		
		48	470	0.0059	8.0		
	816	20	5.7	1.19	21.5	-	9.4
10	72	0.081	17.0				
8	155.1	0.047	15.0				
2.92%C 3.83%Si 2.09%Mo 1.08%Cr	649	103	18.8	0.214	7.5	69.6	-
		89	31.9	0.160	6.5		
		75	74.3	0.071	7.5		
	816	20	4.7	1.64	15.5	-	9.8
10	100.5	0.052	14.5				
8	171.8	0.0165	-				
2.88%C 3.94%Si 2.08%Mo 2%Co	649	103	2.0	-	12.0	60.7	-
		69	42.4	0.116	13.0		
		62	49.2	0.111	13.0		
	816	20	5.4	1.04	17.0	-	10.1
10	130.2	0.023	13.0				
8	170.4	-	-				

Tensões de ruptura

A tensão de ruptura para 100 horas de ensaio a 649°C do f.f. nodular com 2.84%C, 3.94%Si, 2.05%Mo é de 60 MPa. Adicionando 1.08%Cr a esta liga, a tensão de ruptura, para a mesma temperatura sobe para 69.6 MPa (equivale a um aumento de 16%); a melhoria na tensão de ruptura está relacionada com o possível efeito exercido pelo Cr na eliminação de ferrite da microestrutura da liga normalizada. Se a uma liga com a composição base da liga inicial se adicionar 2%Co a tensão de ruptura para um mesmo ensaio é de 60.7 MPa (um incremento de apenas 1.2%).

Para os ensaios efectuados a 816°C, verificou-se que a adição de 1.08%Cr tem uma influência menor na melhoria da tensão de ruptura comparativamente adição de 2%Co à liga base [13].

4. Noções gerais sobre latões

4.1. Introdução

Os latões são ligas binárias de cobre e zinco, às quais estão geralmente associados outros elementos, com a intenção de reforçar determinadas propriedades, ou apenas como simples impurezas cujo processo de eliminação não é economicamente viável e a sua acção sobre as ligas não é determinante [14].

Embora as propriedades dos latões variem com um grande número de factores pode-se dizer que as suas principais propriedades são: elevadas condutibilidade térmica e eléctrica, boa resistência à corrosão, facilidade de conformação a frio (latão alfa) e a quente (latão beta).

4.2. Microestrutura

A figura 4.a mostra o diagrama de equilíbrio das ligas binárias Cu-Zn até 60% de zinco. Deste diagrama é fácil constatar a existência de três fases, nomeadamente as fases α , β e γ tendo esta última pouco interesse na prática. As características dos latões reflectem características das fases presentes.

FASE α :

- apresenta uma estrutura cúbica de faces centradas;
- é uma solução sólida de zinco no cobre;
- a máxima solubilidade do zinco no cobre é cerca de 39% por volta dos 450°C;
- muito dúctil a frio continuando a quente com uma certa capacidade de deformação.

FASE β :

- apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado;

- é também uma solução sólida de zinco no cobre;
- a partir de sensivelmente 45% de zinco a liga é totalmente constituída por fase β ou melhor, por uma variedade ordenada de β conhecida por β' . É a fase β' que nos latões está presente à temperatura ambiente. A transformação desordem - ordem no arrefecimento dá-se a temperaturas variáveis (453 a 470°C) conforme o teor em zinco;
- a fase β' presente a frio nos latões é dura e frágil enquanto a fase β é facilmente deformável a quente;
- a ductilidade a quente da fase β' é utilizada para transformar a liga por laminagem e extrusão.

FASE γ :

- é uma solução sólida à base do composto Cu_5Zn_8 com uma estrutura cúbica complexa. Esta fase é bastante frágil.

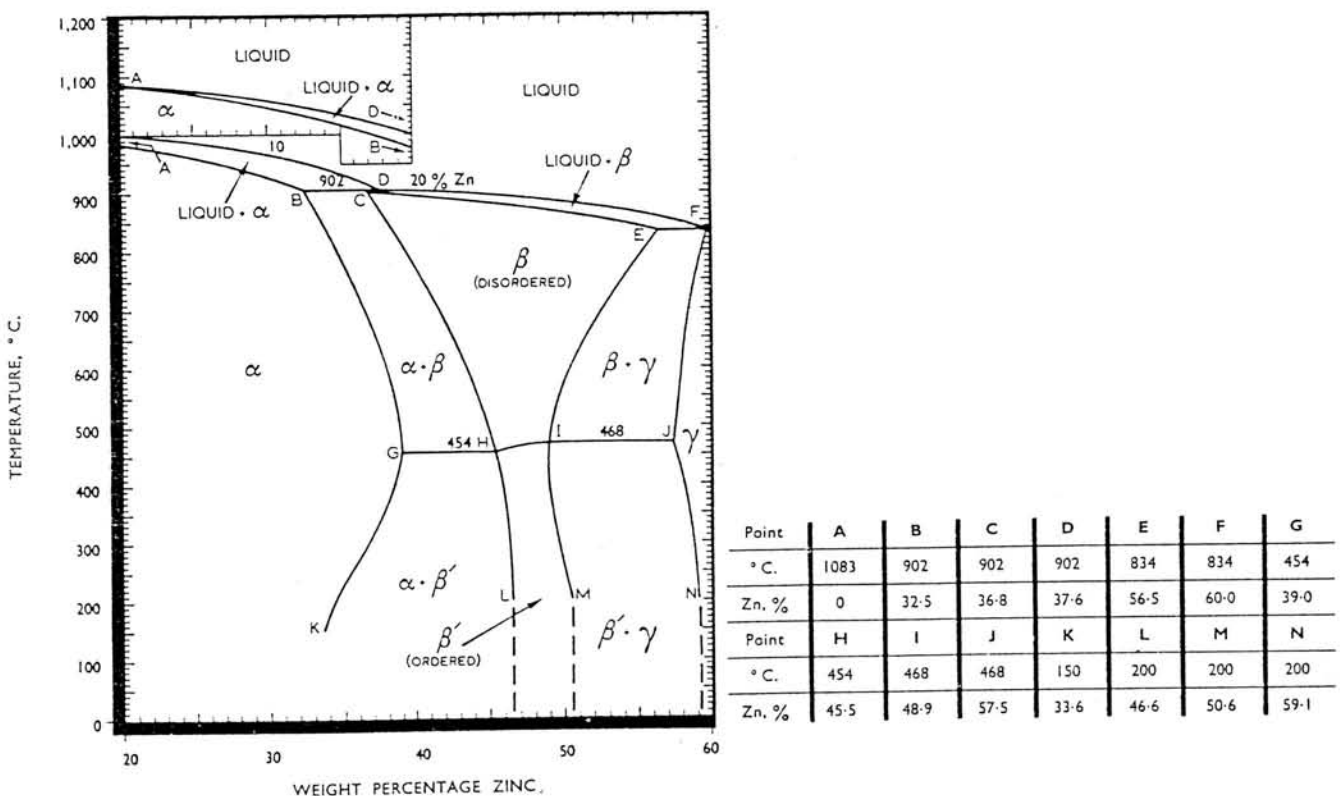
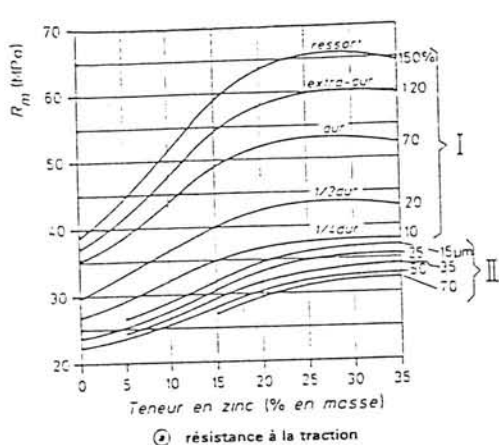


Fig. 4.a - Diagrama de equilíbrio das ligas Cu-Zn [9].

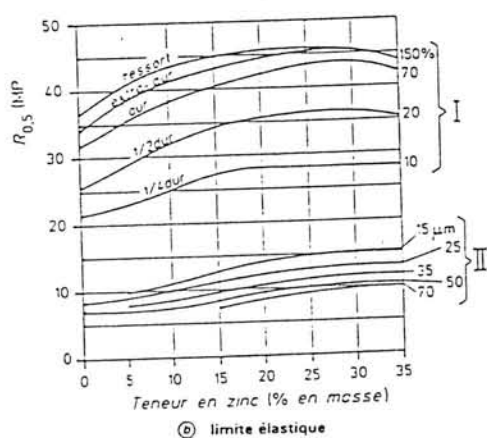
Em termos industriais são utilizadas ligas com um teor de zinco até cerca de 45%, valor que não se ultrapassa devido ao aparecimento da fase γ que, como já se disse, é um constituinte duro e frágil impeditivo de aplicação industrial [14].

4.3. Influência do teor em Zinco nas propriedades dos Latões

Nas figuras 4.b, 4.c e 4.d estão representadas as evoluções das propriedades físicas, mecânicas e químicas dos latões com o teor de zinco.

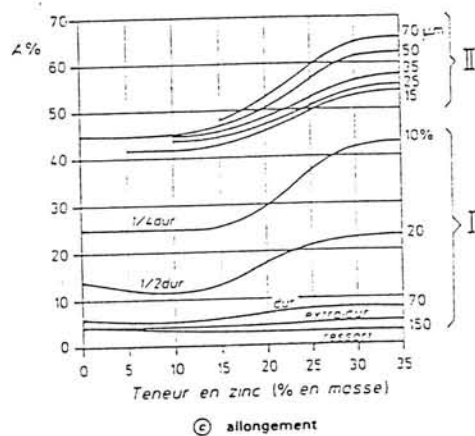


(a) résistance à la traction

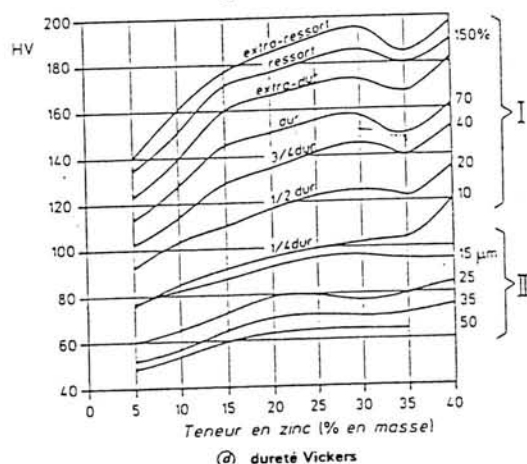


(b) limite élastique

I métal écroui à 10, 20, 70, 150%



(c) allongement



(d) dureté Vickers

II métal recuit présentant des grains de diamètre 10, 15, 25, 35, 50, 70 μm

Fig. 4.b - Influência do teor em zinco sobre as propriedades mecânicas dos latões α em diversos estados [15].

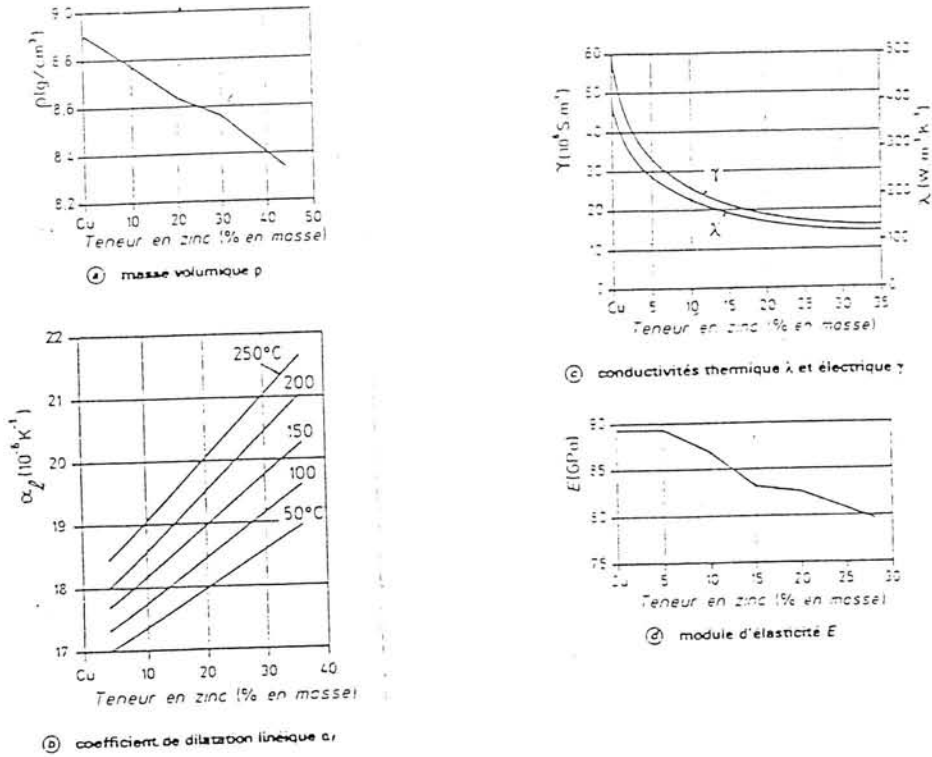


Fig. 4.c - Influência do teor em zinco sobre as propriedades dos latões α [15].

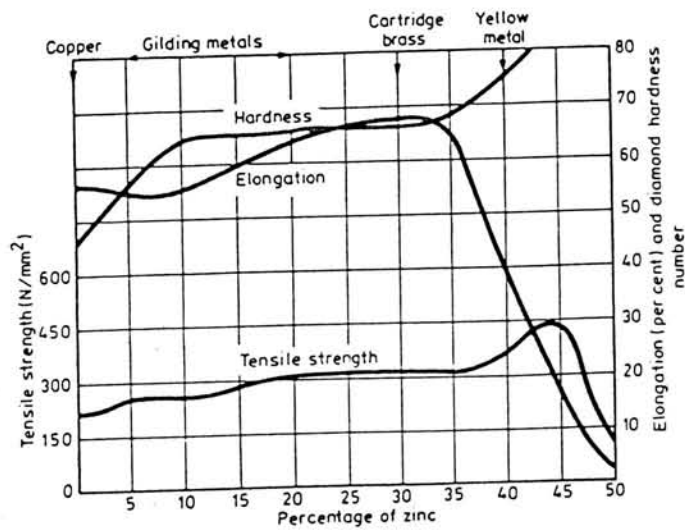


Fig. 4.d - Relação geral entre as propriedades mecânicas e o teor em zinco para os latões deformados plásticamente (wrought brasses) [9].

A estrutura electrónica do átomo de cobre com um só electrão de valência faz deste metal um bom condutor térmico e eléctrico. O latão com o aumento do teor em zinco sofre uma diminuição da condutibilidade; isto porque o zinco apresenta menor condutibilidade do que o cobre e deforma a rede cristalina.

O preço da liga vai diminuindo com o teor de zinco uma vez que este é sensivelmente mais barato que o cobre.

Quando a fase β surge (teores de zinco superiores a aproximadamente 37%) a resistência aumenta mais rapidamente e a ductilidade diminui (ver fig. 4.d).

À medida que o teor de zinco aumenta ocorre também uma diminuição da resistência à corrosão em certos meios agressivos levando à dezincificação, ou seja, à corrosão preferencial do zinco.

No estado recozido a presença de zinco até cerca de 30% provoca um ligeiro aumento da resistência à tracção, porém a ductilidade aumenta consideravelmente.

Como se pode observar na figura 4.d o ultrapassar do limite da fase α origina uma notável diminuição da plasticidade; por outro lado o latão β possui o valor máximo de resistência à rotura ($\cong 420$ Mpa).

Propriedades como a condutibilidade, módulo de elasticidade (E), coeficiente de dilatação térmica (α) e massa volúmica (ρ) diminuem com o teor de zinco. É de salientar desde já que a diminuição destas propriedades é prejudicial para o caso das coquilhas.

4.4. Elementos de liga

O diagrama de equilíbrio das ligas Cu-Zn modifica-se quando se acrescentam elementos de liga. Há elementos que favorecem o aparecimento de maiores percentagens da fase α (elementos alfa-géneos) e elementos que favorecem o aparecimento da fase β (elementos beta-géneos) [15].

Consideremos um latão ternário com uma percentagem X% de um determinado elemento de liga e A% de cobre. Consequentemente este conterá em termos de percentagem de zinco $100-(Cu+X)\%$.

Para podermos continuar a usar o diagrama binário Cu-Zn de forma a determinar as proporções das fases α e β , definiu-se o título fictício de cobre ($A_{t.f.}$) como:

$$A_{t.f.} = A * 100 / (100 + X(K-1))$$

onde K é um coeficiente de equivalência relativo a cada elemento de adição.

Se K é maior que 1 então o elemento de liga em causa tende a aumentar a proporção da fase β no latão, é pois um elemento beta-géneo. Se K é menor que 1 o elemento tende a aumentar a fase α sendo, por isso, um elemento alfa-géneo. Na tabela seguinte estão indicados valores de K para diferentes elementos de liga.

Tabela 4.1 - Valores de K para alguns elementos de liga [15]

Elementos alfa-géneos	K	Elementos beta-géneos	K
Ni	-1.2	Sn	2
Co	-1	Al	6
Pb	0	Si	10
Mn	0.5		
Cd	0.7		
Fe	0.9		

O $K=6$ do alumínio significa que 1% deste elemento tem um efeito semelhante a 6% de zinco no que diz respeito às percentagens das fases α e β presentes na liga.

Isto explica por exemplo que o teor de zinco dos latões α com 2% de alumínio não deve exceder 22% se pretendemos ter somente fase α .

De notar que este formulário permite resultados aproximados no sentido de prever a microestrutura em função da composição química, o que é importante na prática industrial e selecção de latões.

Os elementos de liga são utilizados por razões diversas. De seguida serão apresentados, de forma resumida, alguns elementos adicionados aos latões e a sua influência.

CHUMBO (Pb)

Elemento alifagéneo. Melhora a maquinagem (devido ao efeito lubrificante do chumbo que é insolúvel no cobre e se encontra disperso na matriz), mas para teores acima de 1.8% aumenta a probabilidade de ocorrência de rechupes.

ALUMÍNIO (Al)

Elemento betagéneo. Melhora a fluidez e a resistência à oxidação a altas temperaturas; aumenta também a resistência à corrosão.

FERRO (Fe)

Elemento alifagéneo. Actua como afinador do grão e aumenta a resistência à tracção e o módulo de elasticidade. A resistência à corrosão do latão decresce à medida que aumenta o seu teor.

ESTANHO (Sn)

Elemento betagéneo. O latão de estanho, também designado por latão naval (Naval brass), é utilizado nesta indústria devido à boa resistência à corrosão em água salgada.

MANGANÊS (Mn)

Elemento alfa-géneo. Aumenta as propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão.

SILÍCIO (Si)

Elemento beta-géneo. Melhora a fluidez do banho facilitando desta forma a técnica da fundição. Aumenta mais que qualquer outro elemento de liga a fase β . Aumenta a resistência à corrosão.

ARSÊNIO (As)

Aumenta a resistência à corrosão por dezincificação.

A condutibilidade térmica e eléctrica do cobre é substancialmente afectada pela presença de outros elementos e ainda por tratamentos de endurecimento. O efeito destes elementos sobre a condutibilidade eléctrica, mostrada na figura 4.e, aplica-se também à condutibilidade térmica.

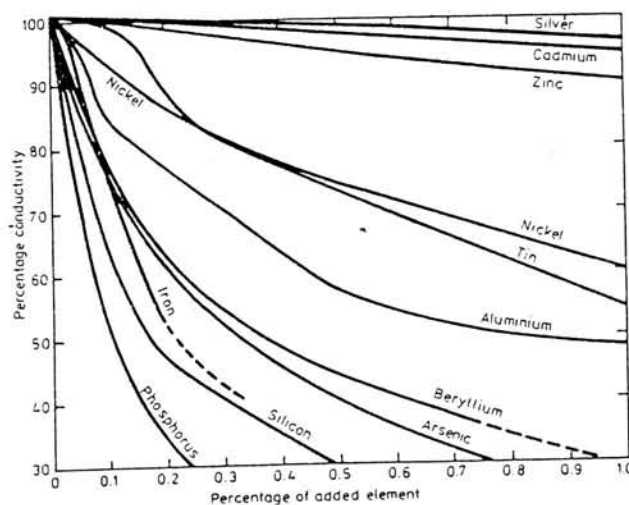


Fig. 4.e - Influência dos elementos de liga sobre a condutibilidade eléctrica do cobre [9].

4.5. Propriedades típicas dos Latões

Existem dois grupos de latões, conforme se destinam a ser maquinados, deformados plásticamente a quente ou a frio (LATÕES TRABALHADOS - WROUGHT BRASSES - LAITONS CORROYES) ou se destinam a ser vazados ou fundidos (LATÕES DE FUNDIÇÃO - CAST BRASSES - LAITONS MOULES). Como seria de esperar existe uma grande interpenetração em termos de composição química entre os dois grupos.

Uma vez que as coquilhas são fabricadas praticamente sempre por fundição [16], então o nosso estudo vai recair sobre este tipo de latões.

4.5.1. Composição química: colabilidade e fluidez

A tabela 4.2 apresenta a composição química de alguns tipos de latões para fundição.

A influência dos elementos de liga já foi apresentada no ponto 4.4. No entanto, nas ligas de fundição há que ter atenção na influência destes elementos nos seguintes parâmetros:

- colabilidade
- contracção na solidificação
- intervalo de solidificação

A tolerância para o conteúdo de impurezas é, normalmente, maior na fundição do que nos latões destinados à maquinagem (wrought brasses); isto devido ao efeito adverso que apresentam certas impurezas no trabalho a quente ou a frio [8].

Em fundição um pequeno intervalo de solidificação é favorável e importante na obtenção de peças sem defeitos e compactas. Os latões, mas mais os bronzes de alumínio, possuem um intervalo de solidificação pequeno, donde, nestes materiais a fissuração interdendrítica é pouco comum. De referir, que os bronzes de alumínio durante a solidificação sofrem uma importante contracção, e uma libertação gasosa abundante. Este último factor implica um maior perigo de porosidade.

A colabilidade (castability) não deve ser confundida com fluidez que é a capacidade de uma liga no estado líquido para preencher completamente uma cavidade do molde em todo o seu detalhe. A colabilidade por seu lado envolve não só a fluidez mas também a complexidade da gítagem, a gama de temperaturas do banho, cuidados com o vazamento e todos os factores determinantes para a obtenção de peças densas e sem defeitos.

A tabela 4.3 apresenta o comportamento em termos de colabilidade e fluidez para diversas ligas de cobre vazadas em areia.

Os latões vermelhos de chumbo (leaded red brass) e os latões semi-vermelhos de chumbo (leaded semi-red brass) embora com problemas de fluidez possuem em geral melhor colabilidade que os latões amarelos (yellow brass).

Os latões amarelos devido à sua baixa percentagem de cobre são mais baratos. São muito aplicados em peças vazadas em coquilha de pequenas dimensões. Para fundidos de maiores dimensões o fósforo é adicionado para aumentar a fluidez mas não deve ser usado em conjunto com o alumínio.

Também o alumínio (0.15 a 0.25%) é por vezes acrescentado aos latões para aumentar a fluidez e para se obter superfícies lisas. Contudo este elemento não deve ser adicionado no caso do vazamento se dar sob pressão ou se o fósforo é também adicionado.

Embora os bronzes de manganês (latões de alta resistência) e os bronzes de alumínio (cupro-alumínios) sejam frequentemente usados nas mesmas aplicações, os bronzes de manganês são mais facilmente manejados na fundição.

Tabela 4.2 - Composição dos latões de fundição (%) [8]

UNS	SIGLA MATERIAL	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Ni	P	S	Al	Si	Mn	As	Mg
C83600	85Cu-5Sn-5Pb-5Zn <i>Latão vermelho com chumbo</i>	84	4	4	4	0.30	0.25	1	0.05	0.08	0.005	0.005	-	-	-
		a	a	a	a	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	-	-	-
		86	6	6	6										
C83800	83Cu-4Sn-6Pb-7Zn <i>Latão vermelho com chumbo</i>	82	3.3	5	5	0.30	0.25	1	0.03	0.08	0.005	0.005	-	-	-
		a	a	a	a	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	-	-	-
		83	4.2	7	8										
C84400	81Cu-3Sn-7Pb-9Zn <i>Latão semi-vermelho com chumbo</i>	78	2.3	6	7	0.40	0.25	1	0.02	0.08	0.005	0.005	-	-	-
		a	a	a	a	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	-	-	-
		82	3.5	8	10										
C84800	76Cu-2.5Sn-6.5Pb-15Zn <i>Latão semi-vermelho com chumbo</i>	75	2	5.5	13	0.40	0.25	1	0.02	0.08	0.005	0.005	-	-	-
		a	a	a	a	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	-	-	-
		77	3	7	17										
C85200	72Cu-1Sn-3Pb-24Zn <i>Latão amarelo com chumbo</i>	70	0.7	1.5	20	0.6	0.20	1	0.02	0.05	0.005	0.05	-	-	-
		a	a	a	a	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	-	-	-
		74	2	3.8	27										
C85400	67Cu-1Sn-3Pb-29Zn <i>Latão amarelo com chumbo</i>	65	0.5	1.5	24	0.7	-	1	-	-	0.35	0.05	-	-	-
		a	a	a	a	máx	-	máx	-	-	máx	máx	-	-	-
		70	1.5	3.5	32										
C85700	63Cu-1Sn-1Pb-35Zn <i>Latão amarelo com chumbo</i>	58	0.50	0.80	32	0.7	-	1	-	-	0.55	0.05	-	-	-
		a	a	a	a	máx	-	máx	-	-	máx	máx	-	-	-
		64	1.50	1.50	42										
C85800	63Cu-1Sn-1Pb-37Zn <i>Latão amarelo com chumbo</i>	58	1.5	1.5	31	0.5	0.05	0.5	0.01	0.05	0.50	0.25	0.25	0.05	-
		min	máx	máx	a	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	-
					41										
C86100	64Cu-24Zn-3Fe-5Al-4Mn <i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	66	0.2	0.2	resto	2	-	1	-	-	4.5	-	2.5	-	-
		a	máx	máx		a	-	máx	-	-	a	-	a	-	-
		68				4					5		5		
C86200	64Cu-24Zn-3Fe-5Al-4Mn <i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	60	0.2	0.2	resto	2	-	1	-	-	3	-	2.5	-	-
		a	máx	máx		a	-	máx	-	-	a	-	a	-	-
		68				4					7.5		5		
C86300	64Cu-26Zn-3Fe-3Al-4Mn <i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	60	0.2	0.2	resto	2	-	-	-	-	3	-	2.5	-	-
		a	máx	máx		a	-	-	-	-	a	-	a	-	-
		68				4					7.5		5		
C86400	59Cu-0.75Sn-0.75Pb-37Zn-1.25Fe-0.75Al-0.5Mn <i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência com chumbo</i>	56	1.5	0.5	resto	2	-	1	-	-	1.5	-	1.5	-	-
		a	máx	a		máx	-	máx	-	-	máx	-	máx	-	-
		62		1.5											
C86500	58Cu-39Zn-1.3Fe-1Al-0.5Mn <i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	55	1	0.4	resto	0.4	-	1	-	-	0.5	-	1.5	-	-
		a	máx	máx		a	-	máx	-	-	a	-	máx	-	-
		60				2					5				
C87500	82Cu-4Si-14Zn <i>Latão de silício</i>	79	-	0.50	12	-	-	-	-	-	0.5	3	-	-	-
		min		máx	a						máx	a			
					16							5			
C87800	82Cu-4Si-14Zn <i>Latão de silício</i>	80	0.25	0.15	resto	0.15	0.05	-	0.01	0.05	0.15	3.75	0.15	0.05	0.01
		a	máx	máx		máx	máx	-	máx	máx	máx	a	máx	máx	máx
		83										4.25			

UNS - Unified numbering System

NOTA: Esta tabela foi elaborada a partir do "Metals Handbook, Properties and Selection: Nonferrous and Pure Metals, Vol.2, 9ª Edição [8].

Tabela 4.3 - Propriedades de fundição das principais ligas de cobre vazadas em areia [8]

UNS number	Common name	Shrink- age allow- ance, %	Approx liquidus temperature		Castability rating (a)	Fluidity rating (a)
			°C	°F		
C83600	Leaded red brass	5.7	1010	1850	2	6
C84400	Leaded semi-red brass	2.0	980	1795	2	6
C84800	Leaded semi-red brass	1.4	955	1750	2	6
C85400	Leaded yellow brass	1.5 to 1.8	940	1725	4	4
C85800	Yellow brass	2.0	925	1700	4	4
C86300	Manganese bronze	2.3	920	1690	6	2
C86500	Manganese bronze	1.9	880	1615	6	2
C87200	Silicon bronze	1.8 to 2.0			8	3
C87500	Silicon brass	1.9	915	1680	7	1
C90300	Tin bronze	1.5 to 1.8	980	1795	3	6
C92200	Leaded tin bronze	1.5	990	1810	3	6
C93700	High-lead tin bronze	2.0	930	1705	1	6
C94300	High-lead tin bronze	1.5	925	1700	1	6
C95300	Aluminum bronze	1.6	1045	1910	8	5
C95800	Aluminum bronze	1.6	1060	1940	8	5
C97600	Nickel silver	2.0	1145	2090	5	7
C97800	Nickel silver	1.6	1180	2160	5	7

(a) Relative rating for casting in sand molds. The alloys are ranked from 1 to 8 in both over-all castability and fluidity; 1 is the highest or best possible rating.

4.5.2. Propriedades mecânicas dos Latões de fundição

As propriedades mecânicas e a facilidade de maquinagem ou maquinabilidade estão indicadas nas tabelas 4.4 e 4.5 respectivamente.

Da tabela 4.4 verifica-se facilmente que os latões de maior resistência à tracção e de maior limite de elasticidade são os latões de silício (silicon brass) e os latões de alta resistência incorrectamente conhecidos por bronzes de manganês (manganese bronze).

Os bronzes de manganês (bem como os bronzes de alumínio) podem apresentar resistência à tracção bastante acima de 700 MPa [8].

Geralmente as ligas de alta resistência têm uma resistência à corrosão e ao desgaste melhor que a média.

Os latões vermelhos com chumbo (leaded red brass UNS-C83600 e C83800) são usados onde é necessário boa maquinabilidade, moderada ductilidade e resistência, e boa colabilidade.

Os latões semi-vermelhos com chumbo (UNS-C84400 e C84800) têm maior quantidade de chumbo e zinco, e menor quantidade de cobre e estanho do que os latões anteriores. Estes latões são mais baratos e têm menor resistência à tração e dureza.

Os latões amarelos (UNS-C85200 e C85400) são ainda mais baratos e apresentam propriedades mecânicas mais baixas.

O chumbo pode ser adicionado aos bronzes de manganês para aumentar a maquinabilidade, mas à custa de um decréscimo da resistência à tração e da ductilidade. O conteúdo de chumbo nos bronzes de manganês de alta resistência não deve exceder os 0.1%, a não ser que possam ser aceites grandes sacrifícios na resistência e na ductilidade.

4.5.3. Propriedades físicas e térmicas

O coeficiente de dilatação térmica, a condutibilidade térmica, o calor específico e a densidade são cinco propriedades importantes para o caso das coquilhas. Estas propriedades estão indicadas na tabela 4.6.

Da tabela 4.6 é bastante evidente que os latões de silício apresentam a mais baixa condutibilidade térmica (28 W/m²K a 20°C) enquanto que os latões vermelhos e amarelos apresentam alta condutibilidade.

As outras propriedades variam de uma forma mais moderada.

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas dos Latões para fundição [8]

UNS	SIGLA	NOME COMUM	Resist.	$\sigma_{ced.t}$	$\sigma_{ced.c}$	E	ϵ	Dureza
			Tracção	a)	b)	[GPA]	[%]	c)
			[MPa]	[MPa]	[MPa]			[HB]
C83600	85Cu-5Sn-5Pb-5Zn	<i>Latão vermelho com chumbo</i>	255	117	97	83	30	60
C83800	83Cu-4Sn-6Pb-7Zn	<i>Latão vermelho com chumbo</i>	240	110	79	92	25	60
C84400	81Cu-3Sn-7Pb-9Zn	<i>Latão semi-vermelho com chumbo</i>	235	105	-	90	26	55
C84800	76Cu-2.5Sn-6.5Pb-15Zn	<i>Latão semi-vermelho com chumbo</i>	255	97	88.3	105	35	55
C85200	72Cu-1Sn-3Pb-24Zn	<i>Latão amarelo com chumbo</i>	260	90	55-70	76	35	45
C85400	67Cu-1Sn-3Pb-29Zn	<i>Latão amarelo com chumbo</i>	235	83	62	-	35	50
C85700 d)	63Cu-1Sn-1Pb-35Zn	<i>Latão amarelo com chumbo</i>	345	125	-	97	40	75
C85800 e)	63Cu-1Sn-1Pb-37Zn	<i>Latão amarelo com chumbo</i>	380	201	-	105	15	102
C86100	64Cu-24Zn-3Fe-5Al-4Mn	<i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	655	330	345	105	20	180
C86200	64Cu-24Zn-3Fe-5Al-4Mn	<i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	655	330	345	105	20	180
C86300	64Cu-26Zn-3Fe-3Al-4Mn	<i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	820	460	415	105	18	225
C86400	59Cu-0.75Sn-0.75Pb-37Zn-1.25Fe-0.75Al-0.5Mn	<i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência com chumbo</i>	450	170	150	96	20	105
C86500	58Cu-39Zn-1.3Fe-1Al-0.5Mn	<i>Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência</i>	490	195	180	105	30	98
C87500	82Cu-4Si-14Zn	<i>Latão de silício</i>	460	205	185	106	21	134
C87800	82Cu-4Si-14Zn	<i>Latão de silício</i>	585	310	-	138	25	163

Legenda :

UNS - Unified numbering System

 $\sigma_{ced.t}$ - tensão de cedência à tracção $\sigma_{ced.c}$ - tensão de cedência à compressão

E - módulo de elasticidade á tracção

 ϵ - alongamento

a) a 0.5% de alongamento sob carga

b) a 0.1% de alongamento sob carga

c) carga=500Kg; diâmetro da esfera=10mm

d) vazado em areia;

e) vazado em coquilha

Tabela 4.5 - Grau de maquinabilidade de várias ligas de cobre de fundição [8]

UNS number	Common name	Machinability rating (a), %
Group 1—Free-cutting Alloys		
C83600	Leaded red brass	90
C83800	Leaded red brass	90
C84400	Leaded semi-red brass	90
C84800	Leaded semi-red brass	90
C94300	High-leaded tin bronze	90
C85200	Leaded yellow brass	80
C85400	Leaded yellow brass	80
C93700	High-leaded tin bronze	80
C93800	High-leaded tin bronze	80
C93200	High-leaded tin bronze	70
C93500	High-leaded tin bronze	70
C97300	Leaded nickel brass	70
Group 2—Moderately Machinable Alloys		
C86400	Leaded high-strength manganese bronze	60
C92200	Leaded tin bronze	60
C92300	Leaded tin bronze	60
C90300	Tin bronze	50
C90500	Tin bronze	50
C95600	Silicon-aluminum bronze	50
C95300	Aluminum bronze	35
C86500	High-strength manganese bronze	30
Group 3—Hard-to-Machine Alloys		
C86300	High-strength manganese bronze	20
C95200	9% aluminum bronze	20
C95400	11% aluminum bronze	20
C95500	Nickel-aluminum bronze	20

(a) Machinability rating expressed as a percentage of the machinability of C36000, free-cutting brass. The rating is based on relative speed for equivalent tool life. For instance, a material having a rating of 50 should be machined at about half the speed that would be used to make a similar cut in C36000.

Tabela 4.6 - Propriedades físicas e térmicas dos latões de fundição [8]

UNS	SIGLA	NOME COMUM	Temp _l [°C]	Temp _s [°C]	α [10 ⁻⁶ °K ⁻¹] [20-205°C]	C _p [J/Kg°K]	K [w/m°K]	ρ [g/cm ³]
C83600	85Cu-5Sn-5Pb-5Zn	Latão vermelho com chumbo	1010	855	18 [20-205°C]	380	72	8.83
C83800	83Cu-4Sn-6Pb-7Zn	Latão vermelho com chumbo	1005	845	18 [20-232°C]	380	72.5	8.6
C84400	81Cu-3Sn-7Pb-9Zn	Latão semi-vermelho com chumbo	1005	845	18 [20-270°C]	380	72.5	8.7
C84800	76Cu-2.5Sn-6.5Pb-15Zn	Latão semi-vermelho com chumbo	954	832	18.7 [20-260°C]	376	72	8.58
C85200	72Cu-1Sn-3Pb-24Zn	Latão amarelo com chumbo	940	925	21 [20-100°C]	380	83.9	8.50
C85400	67Cu-1Sn-3Pb-29Zn	Latão amarelo com chumbo	940	925	20.02 [20-100°C]	380	88	8.50
C85700	63Cu-1Sn-1Pb-35Zn	Latão amarelo com chumbo	920	903	22 [20-260°C]	376	83.9	8.41
C85800	63Cu-1Sn-1Pb-37Zn	Latão amarelo com chumbo						
C86100	64Cu-24Zn-3Fe-5Al-4Mn	Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência	941	899	22 [20-260°C]	376	35	7.9
C86200	64Cu-24Zn-3Fe-5Al-4Mn	Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência						
C86300	64Cu-26Zn-3Fe-3Al-4Mn	Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência	923	885	22 [20-260°C]	376	36	7.7
C86400	59Cu-0.75Sn-0.75Pb-37Zn-1.25Fe-0.75Al-0.5Mn	Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência com chumbo	880	860	20 [21-204°C]	376	88	8.32
C86500	58Cu-39Zn-1.3Fe-1Al-0.5Mn	Bronze de manganês; Latão amarelo de alta resistência	880	862	21.6 [21-93°C]	373	87	8.3
C87500	82Cu-4Si-14Zn	Latão de silício	917	821	19.6 [20-260°C]	375	28	8.28
C87800	82Cu-4Si-14Zn	Latão de silício						

Legenda :

UNS - Unified numbering System

Temp_l: temperatura de liquidusTemp_s: temperatura de sólidos α : coeficiente de dilatação térmica linearC_p: calor específico

K: condutibilidade térmica

 ρ : densidade

Nota: Esta tabela foi elaborada a partir do "Metals Handbook, Properties and Selection: Nonferrous and Pure Metals, Vol.2, 9ª Edição.

4.6. Efeito da temperatura nas propriedades dos latões

As coquilhas, quando em serviço, sofrem ciclos de aquecimento e arrefecimento. Desta forma é importante conhecer a evolução das propriedades com a temperatura.

Esta evolução está representada nas figuras seguintes.

Latão vermelho com chumbo (UNS-C83600) [8]

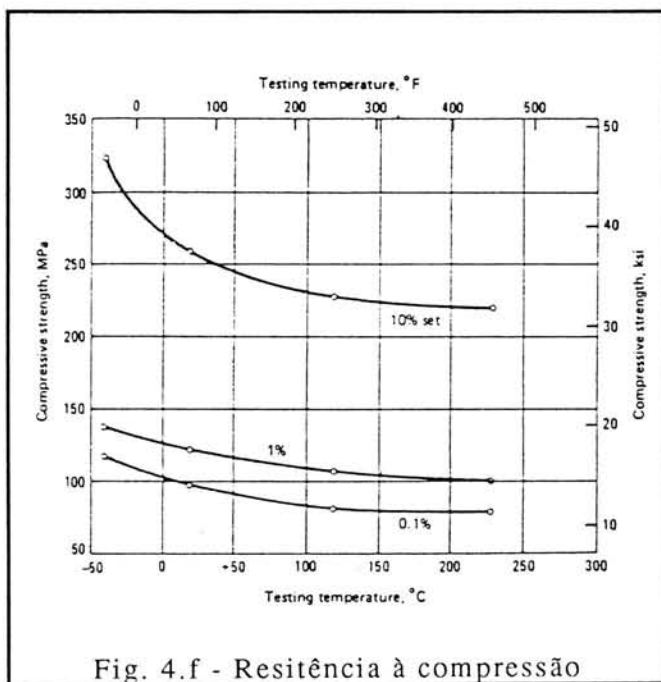


Fig. 4.f - Resistência à compressão

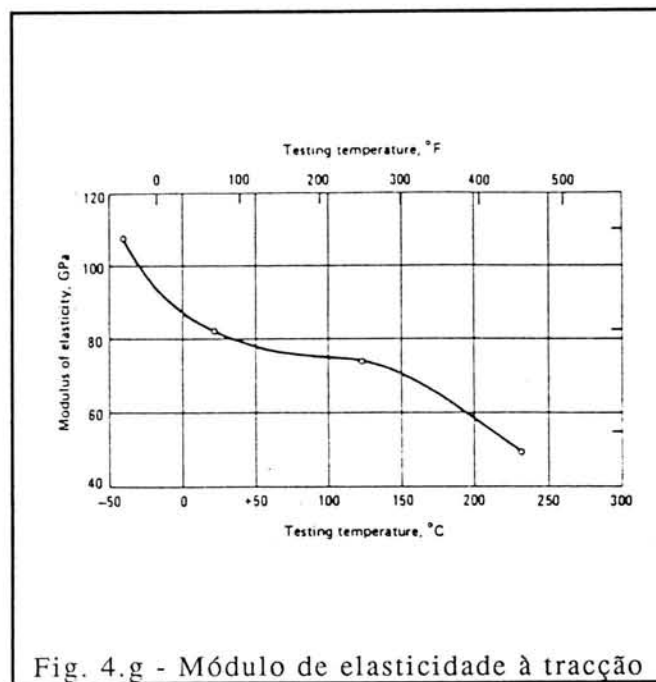


Fig. 4.g - Módulo de elasticidade à tracção

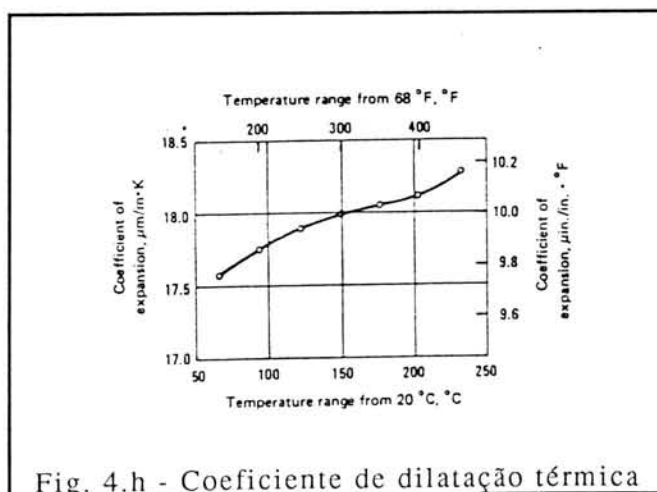
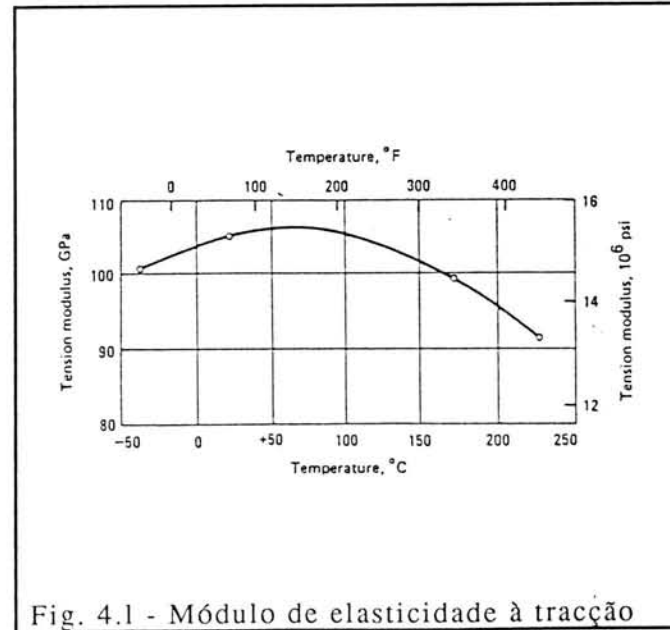
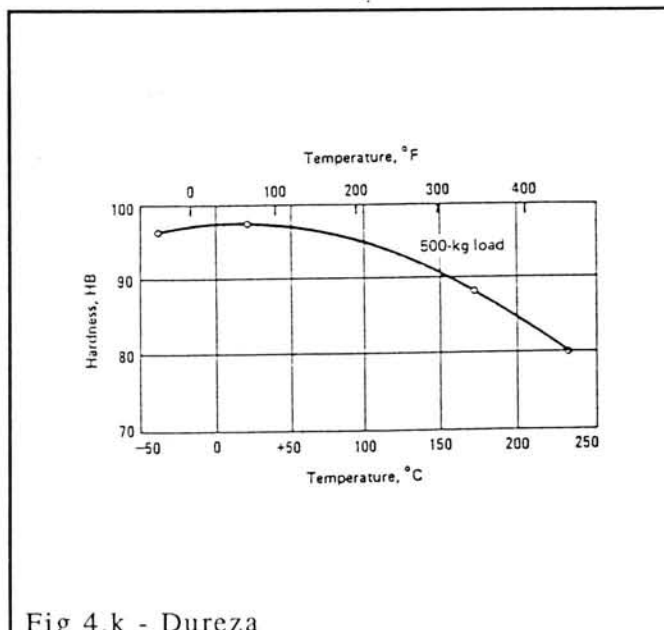
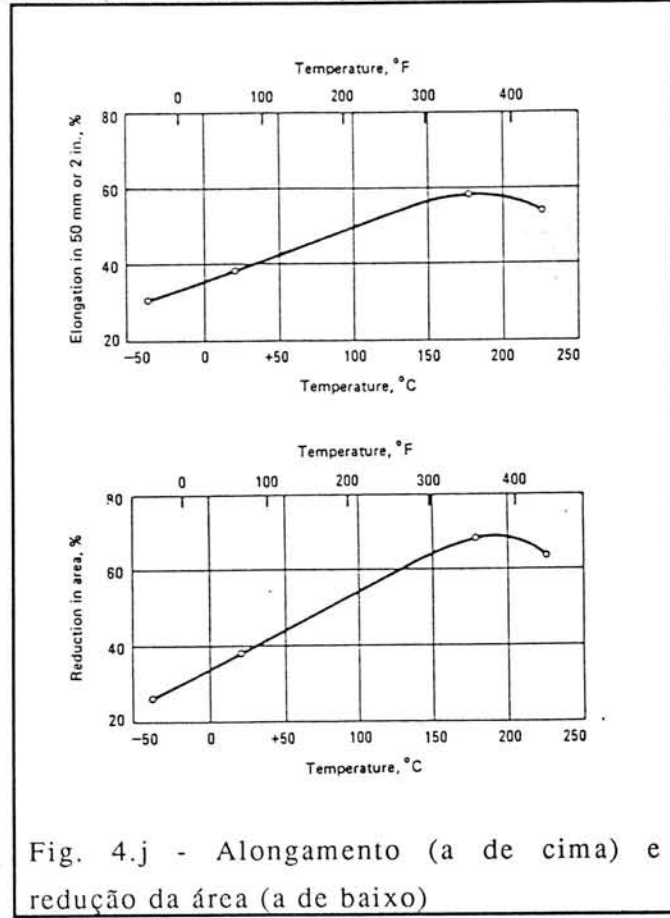
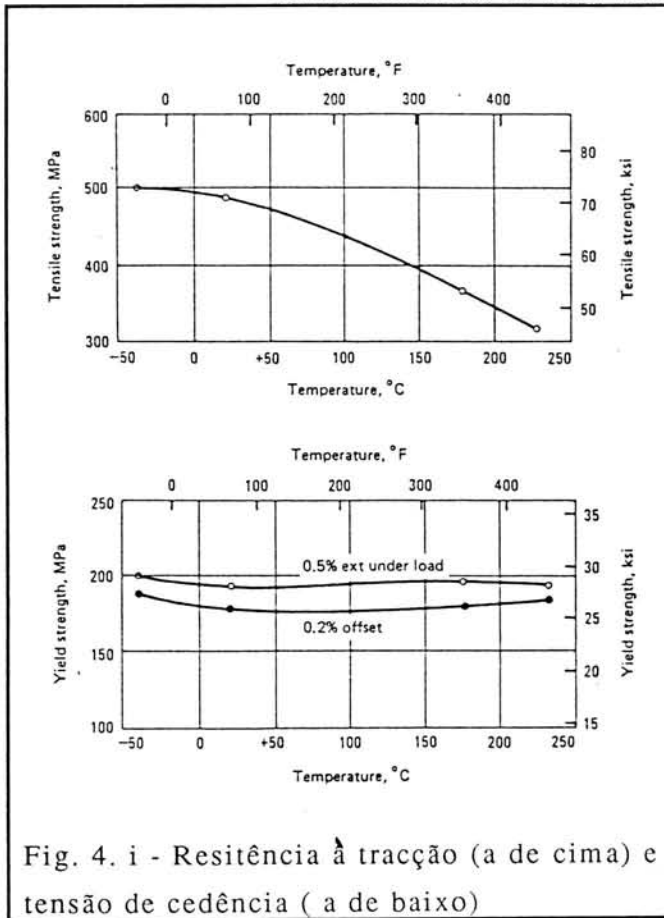


Fig. 4.h - Coeficiente de dilatação térmica

Latão amarelo de alta resistência (UNS-C86500) [8]



Latão amarelo de alta resistência (UNS-C86500) [8]

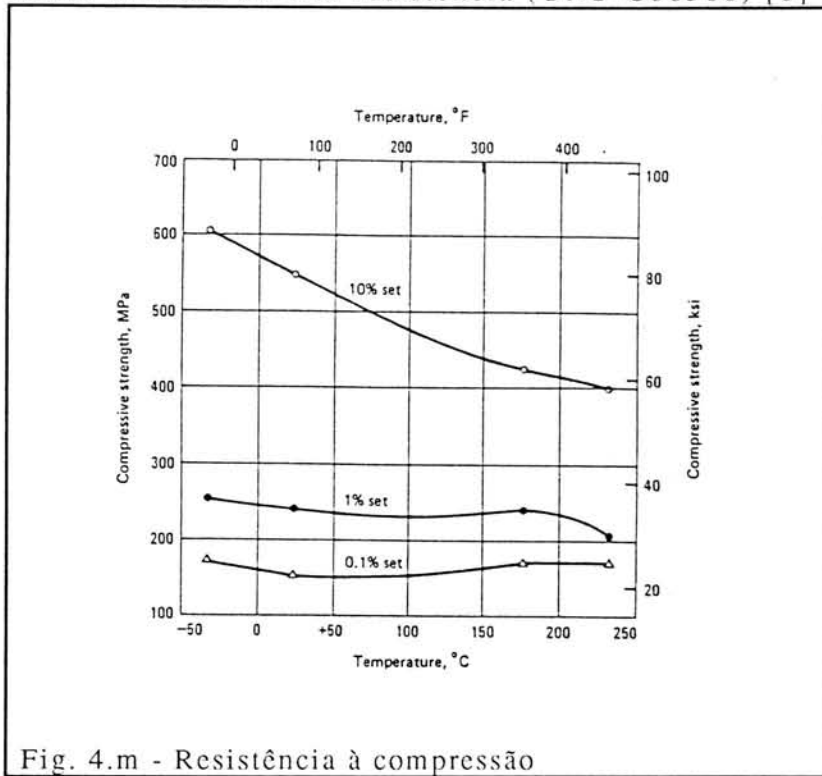


Fig. 4.m - Resistência à compressão

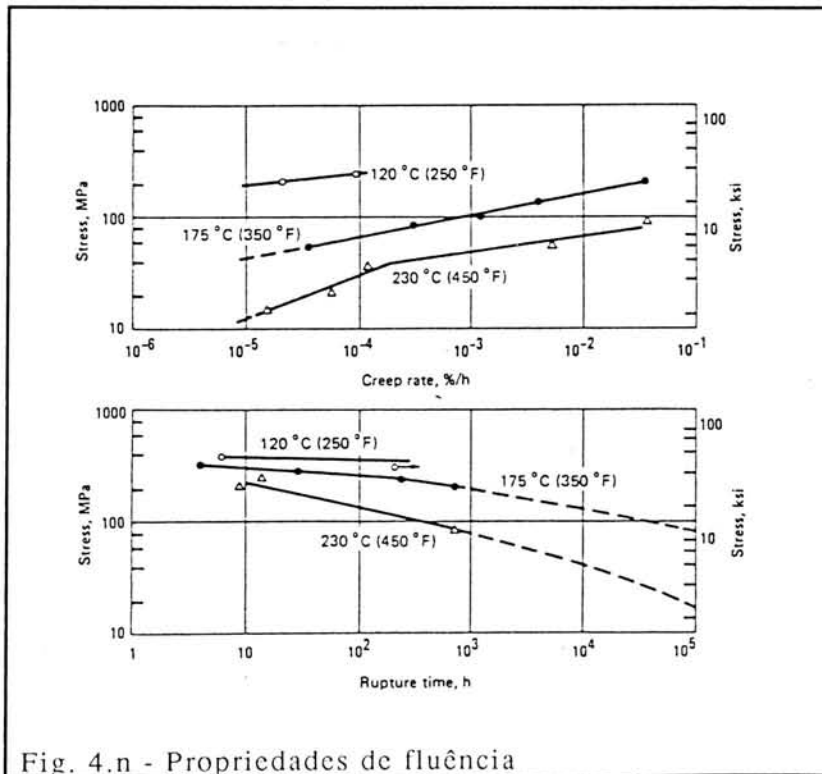


Fig. 4.n - Propriedades de fluência

Latão amarelo de alta resistência (UNS-C86500) [8]

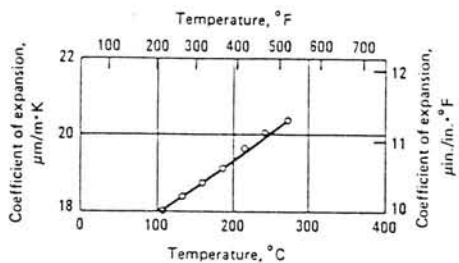


Fig. 4.o - Coeficiente de dilatação térmica

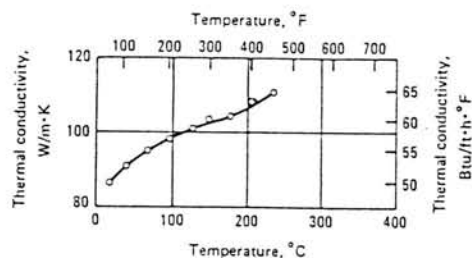


Fig. 4.p - Condutibilidade térmica

Latão de Silício (UNS-C87500 e C87800) [8]

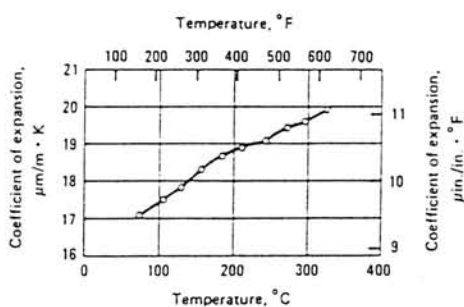


Fig. 4.q - Coeficiente de dilatação térmica

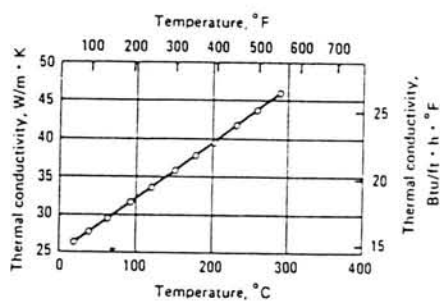


Fig. 4.r - Condutibilidade térmica

5. Factores influentes nas tensões térmicas

Além das propriedades inerentes aos materiais (cap. 6), existem outros factores que influenciam as tensões térmicas associadas a ciclos repetidos de aquecimento e arrefecimento. São eles:

- i) Modo de fixação;
- ii) Revestimento.

5.1. Modo de fixação

Consideremos um elemento de volume submetido a tensões normais σ_x , σ_y , σ_z que, mediante o tipo de fixação poderão ou não ser nulas.

Uma vez que as tensões elásticas são pequenas, e o material isotrópico, pode-se admitir que as tensões normais não produzem deformações de corte nos planos x, y ou z e que uma tensão de corte não produz deformações normais nestes mesmos planos.

Podemos então determinar a deformação produzida segundo a mesma direcção por mais de uma componente de tensão (Tab. 5.1).

Tabela 5.1 - Relações tensão-deformação

Tensão	Deformação	Deformação	Deformação
	na direcção x	na direcção y	na direcção z
σ_x	$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$	$\epsilon_y = -\frac{\nu\sigma_x}{E}$	$\epsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E}$
σ_y	$\epsilon_x = -\frac{\nu\sigma_y}{E}$	$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$	$\epsilon_z = -\frac{\nu\sigma_y}{E}$
σ_z	$\epsilon_x = -\frac{\nu\sigma_z}{E}$	$\epsilon_y = -\frac{\nu\sigma_z}{E}$	$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$
σ_θ	$\epsilon_x = \alpha \cdot \Delta T$	$\epsilon_y = \alpha \cdot \Delta T$	$\epsilon_z = \alpha \cdot \Delta T$

Donde resulta que a deformação segundo uma direcção será:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \right] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \right] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \right] + \alpha \Delta T \end{array} \right.$$

As tensões totais em cada ponto de um corpo aquecido são dadas por duas parcelas. A primeira parcela resulta das tensões necessárias para manter a continuidade do corpo bem como as que surgem devido a cargas externas; a segunda deve-se à dilatação do corpo quando sujeito a uma variação da temperatura, esta parcela é dada por $\alpha \cdot \Delta T$.

Com base nas expressões anteriores, determinaram-se as equações que quantificam as tensões térmicas para diferentes tipos de fixação para o caso de barras e placas (ver tabela 5.2).

5.2. Revestimentos

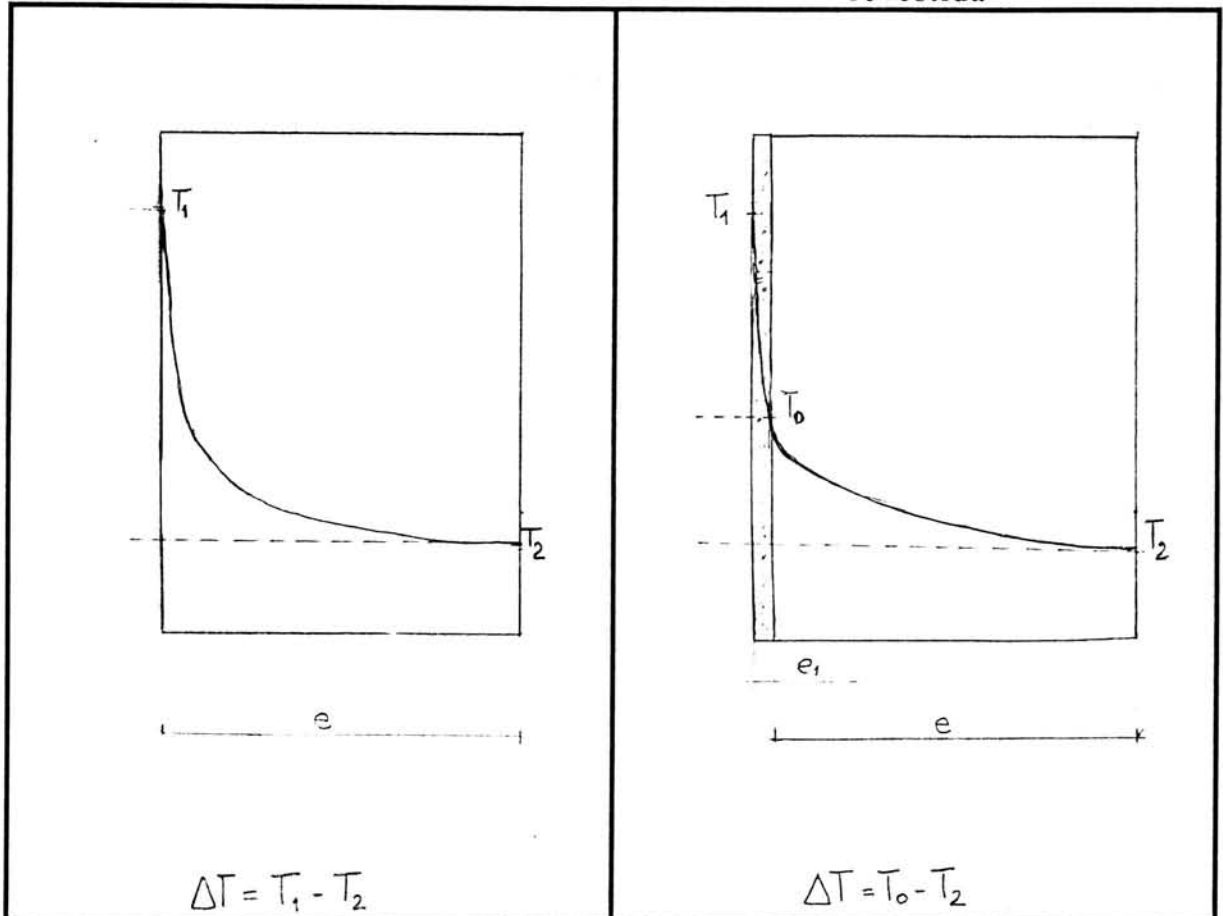
No instante em que o metal quente é vazado numa coquilha não revestida, a temperatura da superfície de trabalho (interface) aumenta rapidamente; enquanto que a superfície exterior se encontra praticamente à temperatura inicial, originando elevados gradientes térmicos através da secção transversal da coquilha.

A aplicação de revestimentos permite que os gradientes de temperatura (através da secção transversal da coquilha) sejam reduzidos, e a superfície de trabalho da coquilha aqueça mais lenta e uniformemente.

Corte transversal de uma coquilha

não revestida

revestida



Legenda:

e - espessura da parede da coquilha

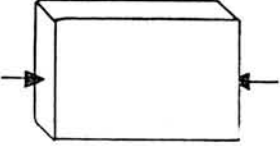
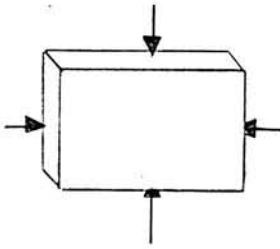
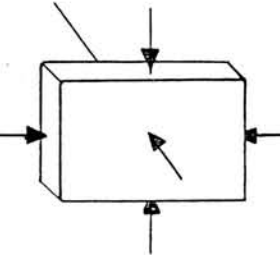
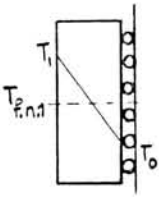
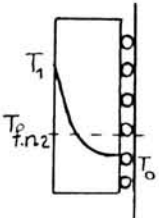
e_1 - espessura do revestimento

T_1 - temperatura na face interior da coquilha

T_2 - temperatura na face exterior da coquilha

T_0 - temperatura na interface coquilha - revestimento

Tabela 5.2 - Influência do modo de fixação nas tensões térmicas

Tipo de fixação	Condições fronteira	Tensão	Observações
	$\begin{aligned} \varepsilon_x = \varepsilon_y &\neq 0 \\ \varepsilon_z &= 0 \\ \sigma_x = \sigma_y &= 0 \\ \sigma_z &\neq 0 \end{aligned}$	$\sigma_z = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T$	O elemento de volume está encastrado segundo a direcção z
	$\begin{aligned} \varepsilon_x = \varepsilon_z &= 0 \\ \varepsilon_y &\neq 0 \\ \sigma_x = \sigma_z &\neq 0 \\ \sigma_y &= 0 \end{aligned}$	$\sigma = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu}$	O elemento de volume está encastrado segundo a direcção z e x
	$\begin{aligned} \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z &= 0 \\ \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z &\neq 0 \end{aligned}$	$\sigma = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - 2\nu}$	O elemento de volume está encastrado segundo a direcção z, x e y
	<p>Distribuição linear da temperatura</p> $T_{fn1} = \frac{T_1 + T_0}{2}$	$\sigma_{max} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_0)$	A placa pode sofrer deslocação longitudinal (segundo x) mas não flexão
	<p>Distribuição não linear da temperatura: choque térmico</p>	$\sigma_{max} = \alpha \cdot E \cdot (T_1 - T_{fn2})$	<p>A tensão instalada é superior a anterior pois</p> $T_1 - T_{fn2} > T_1 - T_{fn1}$



6. Estudo dos materiais para coquilhas

6.1. Introdução

Das aulas da cadeira de SEMINÁRIO DE MATERIAIS, e de alguma bibliografia por nós pesquisada, pôde-se constatar que os materiais utilizados no fabrico de peças sujeitas a ciclos repetidos de aquecimentos e arrefecimentos (como é o caso das coquilhas) devem ter as seguintes propriedades:

- elevada condutibilidade térmica
- baixa expansão térmica
- baixo módulo de elasticidade
- elevado limite elástico
- elevada resistência à fadiga térmica
- elevada resistência à oxidação
- ausência de transformações de fase que impliquem variações volumétricas
- bom comportamento a altas temperaturas
- elevado calor específico volumétrico ($\rho \times C_p$)

Rápidamente se conclui que é muito difícil um material reunir simultaneamente todas estas propriedades.

Coeficiente de dilatação térmica (α):

As tensões térmicas ocorrem quando as variações das dimensões de um componente, resultantes do aumento da temperatura, são impedidas de ocorrer

devido a algum tipo de restrição. Para uma mesma variação de temperatura à superfície do corpo, as tensões e deformações geradas são função directa do coeficiente de dilatação térmica. Convém que este coeficiente seja o mais baixo possível.

De salientar que para o caso das coquilhas esta propriedade é a mais importante. Tal facto explica-se por:

- α *baixo* \Rightarrow tensão térmica instalada baixa; desta forma o material pode apresentar uma tensão de cedência baixa e resistir às tensões térmicas instaladas sem que ocorra deformação plástica.
- α *alto* \Rightarrow tensão térmica instalada alta; neste caso, mesmo para tensões de cedência elevadas, estas poderão não ser suficientes para suportar a tensão térmica, havendo deformação plástica.

Condutibilidade térmica (k)

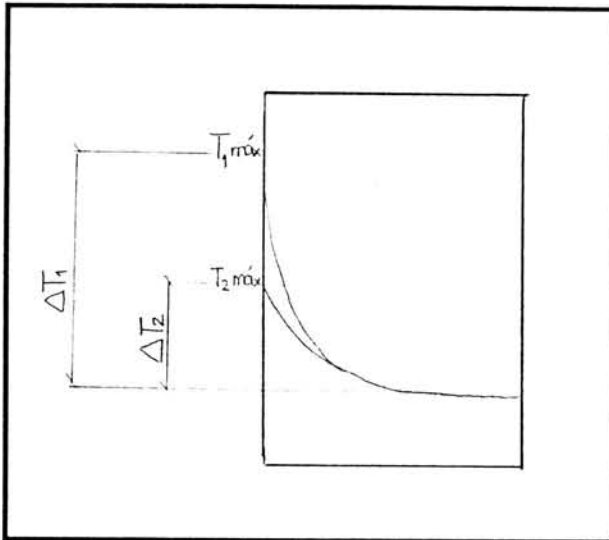
A severidade dos gradientes térmicos pode ser considerada inversamente proporcional à condutibilidade térmica do material. Um aumento de k resulta num abaixamento dos gradientes térmicos e conseqüentemente menores deformações e tensões.

Densidade (ρ) e calor específico (C_p)

Para o caso particular das coquilhas interessa que o produto $\rho \times C_p$ seja o mais elevado possível. Este facto pode ser explicado pelas seguintes razões:

- i) Considere dois materiais de iguais dimensões, com a mesma condutibilidade térmica mas produtos $\rho \times C_p$ distintos. Ambos materiais estão sujeitos a um aquecimento (fig. 6.a).

Quanto maior for $\rho \times C_p$, maior será a capacidade do material para absorver calor; conseqüentemente este material terá na superfície aquecida uma temperatura máxima inferior ($T_{m\acute{a}x.2}$) à do material com um valor de $\rho \times C_p$ menor ($T_{m\acute{a}x.1}$).



$$\rho_1 \times Cp_1 < \rho_2 \times Cp_2$$

$$\Downarrow$$

$$\Delta T_1 > \Delta T_2$$

Fig. 6.a - Influência do $\rho \times Cp$ na temperatura máxima.

ii) Sabendo que

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

$$\Rightarrow \rho \cdot Cp = Q / (V \cdot \Delta T)$$

$$m = \rho \cdot V$$

onde:

Q - Calor transferido [J]

m - Massa [Kg]

V - Volume [m³]

Cp - Calor específico [J/Kg^oK]

ρ - Densidade [Kg/m³]

ΔT - Diferença de temperatura [°K]

Desta expressão verifica-se que, para a mesma quantidade de calor transferida, a severidade dos gradientes térmicos (ΔT) é tanto menor quanto maior for $\rho \cdot Cp$.

Módulo de elasticidade (E):

Sendo o *módulo de elasticidade* (E), o quociente da tensão (dentro do limite elástico) para a correspondente deformação, então um alto módulo indica um elevado nível de tensões, para um nível específico de deformação, quer produzidas mecânicamente ou termicamente. Um baixo módulo representa um baixo nível de tensão para a mesma quantidade de deformação [3].

Módulo de elasticidade (E) e Coeficiente de dilatação térmica (α):

O produto $E \cdot \alpha$ representa o cálculo elástico da tensão térmica produzida se a dilatação do material é restringida numa direcção e aquecido de 1°C . Quanto maior for este produto maiores serão as tensões térmicas instaladas devido a uma variação da temperatura.

A partir destas propriedades é possível definir critérios que permitam comparar e avaliar diferentes materiais, isto é, que permitam concluir qual ou quais os melhores materiais para uma eventual utilização no fabrico de coquilhas. Estes critérios são a seguir apresentados.

6.2. Critérios de selecção

1º CRITÉRIO

$$\frac{E\alpha}{K}$$

onde:

E: módulo de elasticidade à tracção

α : coef. de dilatação térmica linear

K: condutibilidade térmica

Os materiais que apresentem as razões mais baixas têm, em princípio, maior resistência à fadiga térmica.

Este critério resulta da equação

$$\sigma = E.\alpha.\Delta T \quad (\text{ver tabela 5.2 pag. 5 1})$$

onde:

α : coeficiente de dilatação térmica linear

E: módulo de elasticidade à tracção

ΔT : diferença entre a temperatura máxima e a temperatura da fibra neutra

σ : tensão térmica

Uma vez que ΔT pode ser considerado inversamente proporcional à condutibilidade térmica, então a partir da equação anterior verifica-se que as tensões térmicas são proporcionais à razão $E.\alpha/k$.

2º CRITÉRIO

$$\frac{E \cdot \alpha}{K \cdot \rho \cdot C_p}$$

onde:

E: módulo de elasticidade à tracção

α : coef. de dilatação térmica linear

ρ : densidade

C_p : calor específico

Os materiais que apresentem as razões mais baixas têm, em princípio, maior resistência à fadiga térmica. Pois tal como foi afirmado anteriormente (ver ponto 6.1.) interessa ter um produto $E\alpha$ baixo e um produto $k \cdot \rho \cdot C_p$ alto.

3º CRITÉRIO

Sabendo que o sistema de fixação da coquilha permite que a sua parede se desloque longitudinalmente restringindo o movimento à flexão (ver tabela 5.2), e que a distribuição da temperatura é não linear (CHOQUE TÉRMICO) então, neste caso, a tensão máxima instalada no corpo é dada por:

$$\sigma_{\text{máx}} = E \cdot \alpha \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{f.n.}})$$

onde:

E: módulo de elasticidade à tracção

α : coef. de dilatação térmica linear

$T_{\text{máx}}$: temperatura máxima

$T_{\text{f.n.}}$: temperatura da fibra neutra

Uma vez que ΔT pode ser considerado inversamente proporcional à condutibilidade térmica, então a partir da equação anterior verifica-se que as tensões térmicas são proporcionais à razão $E.\alpha/k$.

2º CRITÉRIO

$$\frac{E.\alpha}{K.\rho.Cp}$$

onde:

E: módulo de elasticidade à tracção

α : coef. de dilatação térmica linear

ρ : densidade

Cp: calor específico

Os materiais que apresentem as razões mais baixas têm, em princípio, maior resistência à fadiga térmica. Pois tal como foi afirmado anteriormente (ver ponto 6.1.) interessa ter um produto $E\alpha$ baixo e um produto $k.\rho.Cp$ alto.

3º CRITÉRIO

Sabendo que o sistema de fixação da coquilha permite que a sua parede se desloque longitudinalmente restringindo o movimento à flexão (ver tabela 5.2), e que a distribuição da temperatura é não linear (CHOQUE TÉRMICO) então, neste caso, a tensão máxima instalada no corpo é dada por:

$$\sigma_{\text{máx}} = E.\alpha.(T_{\text{máx}}-T_{\text{f.n.}})$$

Uma vez que a deformação plástica deve ser evitada, então o gradiente térmico não deve provocar deformações que originem tensões superiores à tensão de cedência do respectivo material a todas as temperaturas do ciclo térmico, isto é:

$$\Delta T_{\text{máx}} \leq \frac{\sigma_{\text{ced}}}{E \cdot \alpha}$$

onde:

σ_{ced} : tensão de cedência

E: módulo de elasticidade à tracção

α : coef. de dilatação térmica

$\Delta T = T_{\text{máx}} - T_{\text{f.n.}}$

Os materiais que apresentem os valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ mais elevados suportam gradientes térmicos mais severos, pelo que, em princípio, têm maior resistência à fadiga térmica.

4º CRITÉRIO

$$\frac{\sigma_{\text{ced}} \cdot k \cdot \rho \cdot C_p}{E \cdot \alpha}$$

onde:

σ_{ced} : tensão de cedência

E: módulo de elasticidade a tracção

α : coef. de dilatação térmica linear

ρ : densidade

C_p : calor específico

K: condutibilidade térmica

Os materiais que possuem as razões mais elevadas apresentam um melhor comportamento à fadiga térmica.

Como se pode observar o último critério engloba todos os parâmetros dos critérios anteriores. Pelo que reúne as melhores condições para avaliar a aptidão de um material para o fabrico de coquilhas.

A influência dos diferentes parâmetros na resistência à fadiga térmica, já foi devidamente explicada no ponto 6.1. e também no capítulo 2.

A maior ou menor aptidão de um material para o fabrico de coquilhas pode ser avaliada ou estimada pelos critérios anteriormente apresentados.

A aplicação destes critérios aos latões, bronzes de alumínio (ligas de cobre-alumínio), cupro-berílio, cupro-crómio, cupro-níquel e ferros fundidos está apresentada na tabela 6.1.

No entanto, é importante não esquecer que na selecção de materiais destinados ao fabrico de coquilhas, é necessário ter em conta algumas propriedades e características não inseridas nos critérios anteriormente apresentados, tais como:

- resistência à oxidação;
- variação da estrutura e propriedades com a temperatura;
- compatibilidade com os revestimentos, nomeadamente com a zircónia;
- existência de transformações de fase que impliquem variações volumétricas;
- preço;
- facilidade de processamento (em fundição e maquinagem).

TABELA 6.1 - Critérios de selecção [8]

UNS	MATERIAL	ρ [g/cm ³] [20°C]	C_p [J/Kg°C] [20°C]	K [W/m°C] [20°C]	α [10 ⁻⁶ °K ⁻¹]	σ_{ced} [MPa]	E [GPa]	$E \cdot \alpha / K$ (x10 ³)	$\frac{E \cdot \alpha}{K \cdot \rho \cdot C_p}$ (x10 ⁶)	$\Delta T_{máx} =$ $= \sigma_{ced} / E \cdot \alpha$	$\frac{\sigma_{ced} \cdot K \cdot \rho \cdot C_p}{E \alpha}$ (x10 ³)
	LATÕES										
C86400	59Cu-0.75Sn-0.75Pb-37Zn 1.25Fe-0.75Al-0.5Mn <i>Latão de alta resistência</i>	8.32	376	88	20 [21-204°C]	170	96	21.82	6.97	88.54	24.37
C86500	58Cu-39Zn-1.3Fe-1Al-0.5Mn <i>Latão de alta resistência</i>	8.3	373	87	21.6 [20-93°C]	195	105	26.07	8.42	85.98	23.16
C85800	63Cu-1Sn-1Pb-35Zn <i>Latão amarelo com chumbo</i>	8.41	376	83.9	22 [20-260°C]	201	105	27.53	8.71	87.01	23.09
C86300	64Cu-26Zn-3Fe-3Al-4Mn <i>Latão de alta resistência</i>	7.7	376	36	22 [20-260°C]	460	105	64.17	22.16	199.13	20.75
C83600	85Cu-5Sn-5Pb-5Zn <i>Latão vermelho</i>	8.83	380	72	18 [20-205°C]	117	83	20.75	6.18	78.31	18.92
C83800	83Cu-4Sn-6Pb-7Zn <i>Latão vermelho</i>	8.6	380	72.5	18 [20-232°C]	110	92	22.84	6.99	66.43	15.74
C85700	63Cu-1Sn-1Pb-35Zn <i>Latão amarelo com chumbo</i>	8.41	376	83.9	22 [20-100°C]	125	97	25.44	8.04	58.58	15.54
C84400	81Cu-3Sn-7Pb-9Zn <i>Latão semi-vermelho</i>	8.7	380	72.5	18 [20-260°C]	105	90	22.34	6.76	64.81	15.53
C85200	72Cu-1Sn-3Pb-24Zn <i>Latão amarelo com chumbo</i>	8.5	380	83.9	21 [20-100°C]	90	76	19.02	5.89	56.39	15.28
C86100	64Cu-24Zn-3Fe-5Al-4Mn <i>Latão de alta resistência</i>	7.9	376	35	22 [20-260°C]	330	105	66.00	22.22	142.86	14.85
C84800	76Cu-2.5Sn-6.5Pb-15Zn <i>Latão semi-vermelho</i>	8.58	376	72	18.7 [20-260°C]	97	105	27.27	8.45	49.40	11.47
C87800	82Cu-4Si-14Zn <i>Latão de sílico</i>	8.28	375	28	19.6 [20-260°C]	310	138	96.60	31.11	114.61	9.964
C87500	82Cu-4Si-14Zn <i>Latão de sílico</i>	8.28	375	28	19.6 [20-260°C]	205	106	74.20	23.90	98.67	8.579

TABELA 6.1 - Critérios de seleção (cont.) [8]

UNS	MATERIAL	ρ [g/cm ³] [20°C]	C_p [J/Kg°C] [20°C]	K [W/m°C] [20°C]	α [10 ⁻⁶ °K ⁻¹]	σ_{ced} [MPa]	E [GPa]	$E.\alpha/K$ (x10 ³)	$\frac{E.\alpha}{k.p.C_p}$ (x10 ⁶)	$\Delta T_{máx} =$ $= \sigma_{ced}/E.\alpha$	$\frac{\sigma_{ced}.k.p.C_p}{E.\alpha}$ (x10 ³)
BRONZES DE ALUMÍNIO											
C95400	85Cu-4Fe-11Al a)	7.45	420	59	16.2 [20-300°C]	310	110	30.20	9.65	173.96	32.11
C95500	81Cu-4Fe-4Ni-11Al a)	7.53	418	42	16.2 [20-300°C]	415	115	44.36	14.09	222.76	29.44
C95300	89Cu-1Fe-10Al a)	7.53	375	63	16.2 [20-300°C]	275	110	28.29	10.01	154.32	27.45
C95800	82Cu-4Fe-9Al-4Ni-1Mn b)	7.64	440	36	16.2 [20-300°C]	240	110	49.50	14.73	134.68	16.29
C95200	88Cu-3Fe-9Al	7.64	377	50	16.2 [20-200°C]	185	105	34.02	11.81	108.76	15.66
C95700	75Cu-4Fe-9Al-4Ni-1Mn	7.53	440	12.1	17.6 [20-300°C]	275	125	181.82	54.88	125.00	5.01
CUPRO-BERÍLIO											
C82600	97Cu-2.4Be-0.5Co e)	8.16	420	100	17 [20-200°C]	775	130	22.10	6.45	328.05	120.18
C82000	97Cu-2.5Co-0.5Be e)	8.62	420	218	17.8 [20-300°C]	255	115	9.39	2.59	124.57	98.32
21C	97Cu-2Be-1Co	8.26	419	105	8.6 [20-200°C]	275	128	10.48	3.03	249.82	90.78
C82200	98Cu-1.5Ni-0.5Be d)	8.75	420	138	16.2 [20-200°C]	275	114	13.38	3.64	148.91	75.52
CUPRO-CRÔMIO											
C81500	99Cu-1Cr	8.82	376	315	17.1 [20-300°C]	275	115	6.24	1.88	139.84	146.09

a)liga endurecida por tempera e recozida; b)liga no estado recozido; c)tratamento de envelhecimento (2h a 480°C); d)tratamento de envelhecimento (3h a 450°C); e)tratamento de envelhecimento (3h a 345°C).

TABELA 6.1 - Critérios de selecção (cont.)

UNS	MATERIAL	ρ g/cm ³ 20°C	C _p J/Kg°K 20°C	K W/m°K 20°C	α 10 ⁻⁶ °K ⁻¹	σ_{ced} MPa	E GPa	E. α /K (x10 ³)	$\frac{E.\alpha}{k.\rho.C_p}$ (x10 ⁶)	$\Delta T_{m\acute{a}x} =$ $=\sigma_{ced}/E.\alpha$	$\frac{\sigma_{ced}.k.\rho.C_p}{E.\alpha}$ (x10 ³)
	CUPRO-NIQUEL										
C96600	69.5Cu-30Ni-0.5Be	8.80	377	30	16 [20-300°C]	350	150	80	24.11	145.83	14.51
C97800	66.5Cu-5Sn-1.5Pb-2Zn- 25Ni	8.86	375	25.4	17.5 [20-260°C]	205	130	88.57	26.96	90.11	7.60
C96400	70Cu-30Ni	8.94	375	20	16 [20-300°C]	255	145	116	34.60	109.91	7.37
C97300	56Cu-2Sn-10Pb-20Zn-12Ni	8.95	375	29.6	16.2 [20-260°]	115	110	60.20	17.94	64.53	6.51
C97600	64Cu-4Sn-4Pb-8Zn-20Ni	8.90	375	22	17 [20-300°C]	165	130	100.45	30.10	74.66	5.48
	FERROS FUNDIDOS										
	F.F. CINZENTO ASTM CLASS 60	7.35	656	46	13	431	141-162	42.96	8.88	218.84	48.54
	F.F. CINZENTO ASTM CLASS 20	6.95	656	46	13	152	66-97	23.17	5.05	143.46	29.91
	F.F. NODULAR PERLITICO	7.15	515	30.1	13.3	513	176	77.77	21.12	219.16	24.29
	F.F. NODULAR FERRITICO	7.1	515	34.6	13.5	372	169	65.94	18.03	163.05	20.63

7. Observações

A partir do que se apresentou no capítulo anterior e dos resultados obtidos da aplicação dos diferentes critérios (ver tabela 6.1), podemos estimar a aptidão dos materiais em estudo para uma eventual aplicação no fabrico de coquilhas.

Comparação entre Latões

- a) Os latões de silício (UNS-C87500 e C87800) devido à sua baixíssima condutibilidade térmica ficam logo à partida eliminados.
- b) Os latões vermelhos e semi-vermelhos de chumbo (UNS-C83600, C83800, C84400 e C84800) apresentam alta condutibilidade térmica (72 a 72.5 W/m °K) e baixo coeficiente de dilatação térmica ($18 \cdot 10^{-6}$ a $18.7 \cdot 10^{-6}$ °K⁻¹). No entanto o seu baixo limite de elasticidade faz com que estes materiais tenham um fraco comportamento perante variações severas da temperatura ($\Delta T_{\text{máx}}=49.4$ a 78.31).
- c) Os latões amarelos com chumbo (UNS C85200, C85700 e C85800) têm elevada condutibilidade térmica; no entanto os dois primeiros, devido ao reduzido limite elástico apresentam baixos valores de $\sigma_{\text{ced}} \cdot k \cdot \rho \cdot C_p / E \alpha$. Neste grupo o latão UNS C85800 é o que apresenta a melhor performance.
- d) Quanto aos latões de alta resistência (UNS C86300, C86400 e C86500) são os que apresentam as maiores razões $\sigma_{\text{ced}} \cdot k \cdot \rho \cdot C_p / E \alpha$.
 - para o caso do latão de alta resistência (UNS C86300) o elevado valor obtido deve-se principalmente à tensão de cedência ($\sigma_{\text{ced}}=460$ MPa). Este material é o que suporta maiores diferenças de temperaturas sem que ocorra deformação plástica ($\Delta T_{\text{máx}}=199.13$).
 - o latão amarelo de alta resistência (UNS C86400) é o que apresenta o quociente $\sigma_{\text{ced}} \cdot k \cdot \rho \cdot C_p / E \alpha$ mais elevado ($2.491 \cdot 10^3$). Este elevado valor

deve-se principalmente à elevada condutibilidade térmica ($k = 88 \text{ W/m}^\circ\text{K}$). Além disso este Latão apresenta baixas razões de $E\alpha/k$ ($21.82 \cdot 10^3$) e $E\alpha/k\rho C_p$, sendo o seu comportamento face à severidade dos gradientes térmicos moderado ($\Delta T_{\text{máx}}=88.54$).

- também o latão amarelo de alta resistência (UNS C86500) apresenta elevada razão $\sigma_{\text{ced}} \cdot k \cdot \rho \cdot C_p / E\alpha$ ($23.16 \cdot 10^3$). Este latão (relativamente ao anterior) apresenta piores valores de $E\alpha/k$, $E\alpha/k\rho C_p$ e $\Delta T_{\text{máx}}$.

Do que se disse anteriormente e da tabela 6.1, pode-se concluir que, para o caso dos latões, os que apresentam maiores potencialidades (para o fabrico de coquilhas) são os latões UNS C86400, C86500, C85800 e C86300.

Em relação aos latões, os bronzes de alumínio (nomeadamente os bronzes UNS C95300, C95400 e C95500) possuem propriedades mecânicas mais elevadas, maior resistência à severidade dos gradientes térmicos, maiores razões $\sigma_{\text{ced}} \cdot k \cdot \rho \cdot C_p / E\alpha$ e moderada condutibilidade térmica. Além disso estes materiais possuem elevada resistência à oxidação a altas temperaturas. Desta forma os bronzes de alumínio são materiais a ter em conta para uma eventual utilização no fabrico de coquilhas.

As ligas de cobre-berílio usam-se em aplicações que requerem elevada condutibilidade térmica e resistência mecânica.

Em relação aos latões e bronzes de alumínio, as ligas de cobre-berílio apresentam melhores valores de $E\alpha/k$, $E\alpha/k \cdot \rho \cdot C_p$, $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{ced}} \cdot k \cdot \rho \cdot C_p / E\alpha$. Desta forma, considerando apenas as propriedades inerentes aos quatro critérios, podemos concluir que este material, em relação aos anteriores, possui maior aptidão para o caso em estudo.

De salientar que a altas temperaturas o berílio oxida facilmente. Na presença de oxigénio a baixa pressão forma-se BeO causando oxidação intergranular. No manuseamento (fundição, soldadura, polimento, etc.) é necessário controlar cuidadosamente os níveis de berílio no ar, porque são nocivos à saúde [8].

Relativamente aos ferros fundidos, para os dois primeiros critérios ($E\alpha/k$, $E\alpha/k.\rho.Cp$) os valores obtidos para os f.f. cinzentos são inferiores (melhor resistência à fadiga térmica) do que os encontrados para os f.f. nodulares; este facto deve-se fundamentalmente à elevada condutibilidade térmica oferecida pelos f.f. cinzentos relativamente aos nodulares e a valores do módulo de elasticidade mais baixos.

Para o 3º critério ($\Delta T_{m\acute{a}x} = \sigma_{ced}/E\alpha$) o f.f. nodular perlítico e o f.f. cinzento (class 60) são aqueles que apresentam os maiores valores, por conseguinte são os que suportam gradientes térmicos de maior amplitude sem sofrer deformação plástica. Segundo o último critério ($\sigma_{ced}.k.\rho.Cp/E\alpha$), são os f.f. cinzentos os materiais que apresentam maiores potencialidades, e os que seriam seleccionados para o fabrico de coquilhas.

Contudo, não se pode nunca esquecer que os f.f. cinzentos oxidam mais rapidamente do que os nodulares.

Ferros Fundidos versus Latões

Os latões apresentam maior condutibilidade térmica e melhor maquinabilidade relativamente aos ferros fundidos, contudo possuem:

- menor resistência à severidade dos gradientes térmicos, isto é, a diferença de temperatura ($T_{m\acute{a}x}$ e $T_{fibra\ neutra}$) que os latões suportam sem ultrapassar o limite elástico é inferior à dos ferros fundidos;
- maior coeficiente de dilatação térmica (α), que para o caso dos latões é aproximadamente de $20E-6\text{ }^{\circ}K^{-1}$ (entre 20 e $300^{\circ}C$) enquanto que para os ferros fundidos é de $13E-6\text{ }^{\circ}K^{-1}$ (entre 0 e $500^{\circ}C$);
- menores valores de $\sigma_{ced}.k.\rho.Cp/E\alpha$;
- preço mais elevado.



Menor aptidão do latão para o fabrico de coquilhas

8. Conclusões

Segundo os critérios apresentados no capítulo 6, a aptidão de um material para o fabrico de coquilhas é tanto melhor quanto:

- menor a razão $E\alpha/k$
- menor a razão $E\alpha/k.\rho.Cp$
- maior o valor de $\Delta T_{\text{máx}} = \sigma_{\text{ced}}/E\alpha$
- maior a razão $\sigma_{\text{ced}}.k.\rho.Cp/E\alpha$

De salientar que o 4º Critério ($\sigma_{\text{ced}}.k.\rho.Cp/E\alpha$) é o que nos parece reunir as melhores condições para comparar os diferentes materiais; isto porque neste critério se encontram reunidos de forma coerente todos os parâmetros presentes nos outros três critérios.

É importante ter em consideração que os critérios utilizados são bons indicadores na escolha dos melhores materiais, mas, tal como já referido no capítulo 6, existem outros factores também importantes não contabilizados nestes critérios.

A tabela 8.1 apresenta os materiais que, em cada classe, e segundo os critérios usados, evidenciaram melhor aptidão para o fabrico de coquilhas.

Tabela 8.1 - Materiais seleccionados

UNS	MATERIAL	$E.\alpha/k$ $\times 10^3$	$\frac{E.\alpha}{k.\rho.C_p}$ $\times 10^6$	$\Delta T_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_{ced}}{E.\alpha}$	$\frac{\sigma_{ced} \cdot k \cdot \rho}{C_p E.\alpha}$ $\times 10^3$
<i>Latões</i>					
C86400	59Cu-0.75Sn-0.75Pb-37Zn-1.25Fe-0.75Al-0.5Mn Latão de alta resistência	21.82	6.97	88.54	24.37
C86500	58Cu-39Zn-1.3Fe-1Al-0.5Mn Latão de alta resistência	26.07	8.42	85.98	23.16
C85800	63Cu-1Sn-1Pb-35Zn Latão amarelo com chumbo	27.53	8.71	87.01	23.09
C86300	64Cu-26Zn-3Fe-3Al-4Mn Latão vermelho	64.17	22.16	199.13	20.75
<i>Bronzes de alumínio</i>					
C95400	85Cu-4Fe-11Al	30.20	9.65	173.96	32.11
<i>Cupro-berílio</i>					
C82600	97Cu-2.4Be-0.5Co	22.10	6.45	328.05	120.18
21C	97Cu-2Be-1Co	10.48	3.03	249.82	90.78
<i>Cupro-crómio</i>					
C81500	99Cu-1Cr	6.24	1.88	139.84	146.09
<i>F. Fundido</i>					
	F.F. CINZENTO ASTM class60	42.96	8.88	218.84	48.54
	F.F. CINZENTO ASTM class20	23.17	5.05	143.46	29.91

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. A. Spera "What is thermal fatigue"
Thermal fatigue of materials and components ASTM-STP612
pág.[3a6]
- [2] Morão Dias
"Etude des mecanismes de fatigue thermique et modelisation
du phenomene dans le cas des materiaux pour cylindres de
laminoires à chaud" - tese de doutoramento, pág.[4.2,4.18]
- [3] M. Doroteia Pereira
"Comportamento à fadiga térmica de materiais para coquilhas no
fabrico de ferro fundido" - tese de doutoramento
- [4] ASM Metals reference book
Second Edition 1982, pág[165,174]
- [5] A. I. Smith
"Mechanical properties of materials at high temperature"
Engeneering materials and methods, pág.[2,16]
- [6] "Properties and selection"
Metals handbook, vol.1, ninth edition, pág.[11,80]

- [7] "Physical and corrosion properties"
Gray and ductil Iron casting handbook, 1971, pág.[333,372]
- [8] "Properties and selection: nonferrous alloys and pure metals"
Metals handbook, vol.2 ninth edition, pág.[314,439]
- [9] E. G. West
Cooper and it's alloys, Ellis Horwood, 1982
- [10] Tecnologia da fundição das ligas de cobre
- [11] José Diogo Costa
Ferros fundidos - composição química, estrutura e propriedades,
1972, pág.[69,72]
- [12] H. T. Angus
Cast iron: phisical and engeneering properties
Butterworth & co. ltd. 1976
- [13] D. L. Sponseller
"Development of low alloys ductil iron for service at 1200-15°F"
AFS transactions, vol. 76, 1968
- [14] "Ligas de cobre"
Ciência e tecnologia dos materiais, pág.[574,580]

-
- [15] "Proprietes du cuivre et ses alliages"
Techniques de l'ingenieur, avril 1988, pág.[m430,m431]
- [16] "L'etat actuel du moulase en couquille de fonte"
Fonderie 212, octobre 1963
- [17] "Applicability of thermally sprayed zirconia coatings to casting
mold dressings"
- [18] "Properties and selection"
Metals handbook, vol.1 eighth edition, pág.[763,770]
- [19] George E. Dieter
"Fatigue of metals"
Mechanical metalurgy, pág.[428,430]
- [20] J. P. Holman
Transferência de calor



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000101458