



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de Engenharia

Desenvolvimento de ligas de latão de baixo teor de Chumbo

Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

5º Ano, 2º Semestre

Orientador:

Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira, do
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Trabalho realizado por :

Paulo Carlos da Rocha Moreira

Data de Entrega: **Outubro de 2010**

Candidato	Paulo Carlos da Rocha Moreira	Código: 090508022
Título	Desenvolvimento de ligas de latão de baixo teor de Chumbo	
Data	25 De Outubro de 2010	
Local	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – sala F103 – 11h30	
Júri	Presidente	Professora Doutora Maria Ascensão Ferreira Silva Lopes DEMM/FEUP
	Arguente	Professor Doutor José Joaquim Carneiro Barbosa DEM/UM
	Orientador	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros Freitas Ferreira DEMM/FEUP

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Gerência de Alberto da Silva Barbosa & Filhos L.^{da}, pela oportunidade que me concedeu para a realização, em Ambiente de Trabalho, desta dissertação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Ainda da Empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos L.^{da}, agradecimentos ao Dr. Elias Rebugue, e à Sr.^a Eng.^a Maria Amélia, por todo o apoio, incentivo e orientação prestados.

Ao meu orientador Prof. Doutor Luís Filipe Malheiros pela orientação e acompanhamento.

À Eng.^a Cláudia Lopes, do laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pelo apoio e disponibilidade, na realização dos trabalhos laboratoriais.

À Eng.^a Fernanda Guimarães, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (ex-INETI), pólo da S. Mamede de Infesta, pelos trabalhos realizados na microsonda electrónica de varrimento.

Agradeço, de um modo especial á minha Esposa, e aos meus Filhos, pelo apoio e carinho que sempre evidenciaram.

A Todos o Meu Sincero Agradecimento.

Resumo

A nível mundial, tem vindo a ser publicada regulamentação relativa à água para consumo humano que impõe restrições relativamente aos teores de Chumbo nela presentes. Para além disso, têm vindo a ser levantadas várias restrições, por questões ambientais, à produção e processamento de latões contendo Chumbo pelo que os latões de fácil maquinagem e de baixo teor em Chumbo estão a ser largamente estudados e desenvolvidos um pouco por todo o mundo.

Este trabalho foi desenvolvido, em contexto de trabalho, na empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da}, e teve como principal objectivo o desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, com vista a substituir as ligas actualmente produzidas por aquela empresa, sem alteração significativa das demais características e propriedades mecânicas dessas ligas.

Nesta dissertação são apresentadas as ligas produzidas e suas características técnicas e os procedimentos experimentais, equipamentos e ensaios realizados que permitiram o seu desenvolvimento. Por fim, foi feita a análise metalográfica quantitativa das amostras assim como da repartição do Bismuto pelos microconstituintes.

Abstract

The worldwide regulation about human water consumption, which imposes restrictions to the lead content in water, as well as the environmental effects resulting from the use of lead, are imposing the study of new brass alloys with low Lead content.

The work was developed in the enterprise Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} and aimed the development of new brass alloys, low lead content, in order to replace the actual brass alloys produced by the enterprise, without introducing deep changes on the technical characteristics and mechanical properties of the brass alloys already produced by the enterprise.

This thesis describes the new brass alloys, their technical characteristics and mechanical properties, the experimental methods as well as the equipments used for their production. Finally, a quantitative image analysis and a study of the Bismuth distribution over the microstructure were also done.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstract	II
Índice geral	III
Lista de Tabelas	VI
Lista de Figuras	VIII
1 – Objectivos	1
2 – Enquadramento	1
3 – A empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos L ^{da}	5
3.1 – Recepção de Matéria-Prima e Sistemas de Carga	5
3.2 - Processo de Fusão e de Manutenção	6
3.3 - Extrusão Indirecta	8
3.4 - Processo de Decapagem Química	8
3.5 - Maquinação: Trefilagem e Estiragem	8
3.6 - Armazém de Produto Acabado e Expedição	9
4 – Os Latões e a composição química	10
4.1 – Latões	10
4.2 - Influência dos principais elementos de liga dos latões	11
5 - Resistência à Deszincificação	15
6 - Refinamento do Tamanho de Grão	16
7 - Pontos Duros	18
8 - Cuidados a ter em conta para evitar a formação de pontos duros	20
9 - Procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de barra de latão	20

9.1 – 1ª série de ligas produzidas com vista à produção de barra de latão de baixo teor em Chumbo	29
9.2 – Discussão de resultados obtidos com a 1ª série de ligas produzidas	30
9.3 – Discussão de resultados da 1ª série de ensaios no cliente	31
9.4 – 2ª série de ligas produzidas com vista à produção de barra de latão de baixo teor em Chumbo	32
9.5 – Discussão de resultados obtidos com a 2ª série de ligas produzidas	34
9.6 – Discussão de resultados da 2ª série de ensaios no cliente	34
9.7 – 3ª série de ligas produzidas com vista à produção de barra de latão de baixo teor em Chumbo	34
9.8 – Discussão de resultados obtidos com a 3ª série de ligas produzidas	37
9.9 – Discussão de resultados dos ensaios de estampagem e maquinagem no cliente AR ...	37
9.10 – Discussão de resultados do ensaio de maquinagem no cliente MF	38
9.11 – Conclusões relativas ao desenvolvimento de uma liga de latão com baixo teor de chumbo para produção de barra	38
10 – Procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de lingote de latão	40
10.1 – 1ª série de ligas produzidas	43
10.2 – Análise dos resultados da 1.ª série de ligas elaboradas para produção de lingote	44
10.3 – 2ª série de ligas produzidas	46
10.4 – Análise dos resultados da 2.ª série de ligas elaboradas para produção de lingote	46
10.5 – 3ª série de ligas produzidas	47
10.6 – Análise dos resultados da 3ª série e Conclusões relativas ao desenvolvimento de uma liga de latão de baixo teor de Chumbo para produção de lingote	50
11 – Procedimento experimental utilizado na análise metalográfica quantitativa e no estudo da repartição do Bismuto pelos microconstituintes	51
11.1 – Resultados da análise metalográfica quantitativa	53
11.2 – Discussão dos resultados da análise quantitativa	54
11.3 – Repartição do Bismuto pelos microconstituintes	54

12 – Conclusões finais	57
13 – Referências bibliográficas	58
14 – Anexos	62

Lista tabelas

Tabela 1 – Composição química das actuais ligas de latão produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de barras de latão ^[22,23].

Tabela 2 – Características técnicas das actuais ligas produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de barras de latão ^[22,23].

Tabela 3 – Composição química das actuais ligas de latão produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de lingotes de latão ^[22,23].

Tabela 4 – Características técnicas das actuais ligas produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de lingotes de latão ^[22,23].

Tabela 5 – Elementos de liga utilizados e sua origem

Tabela 6 – Composição química da 1.^a série de ligas produzidas

Tabela 7 – Características técnicas da 1.^a série de ligas produzidas.

Tabela 8 – Dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente

Tabela 9 – Composição química da 2.^a série de ligas produzidas.

Tabela 10 - Características técnicas da 2.^a série de ligas produzidas.

Tabela 11 – Dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente.

Tabela 12 – Composição química da 3.^a série de ligas produzidas.

Tabela 13 – Características técnicas da 3.^a série de ligas produzidas.

Tabela 14 – Dados técnicos recolhidos durante o ensaio no cliente AR

Tabela 15 – Dados técnicos recolhidos durante o ensaio no cliente MF

Tabela 16 – Composição química e características técnicas da 1.^a série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de chumbo

Tabela 17 – Composição química da 2.^a série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de chumbo

Tabela 18 – Características técnicas da 2.^a série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de chumbo

Tabela 19 – Composição química da 3.^a série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de chumbo

Tabela 20 – Características técnicas da 3.^a série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de chumbo

Tabela 21 – Composição química e dureza das amostras utilizadas na análise metalográfica quantitativa

Tabela 22 – Resultados da repartição de fases na microestrutura

Índice de figuras

Figura 1 – Diferentes tipos de matérias-primas

Figura 2 – Forno de Indução de Cadinho

Figura 3 - Forno de Indução de Canal

Figura 4 – Forno de Manutenção

Figura 5 – Vazamento em contínuo de biletas

Figura 6 – Vazamento para lingoteira

Figura 7 – Etapas de extrusão: aquecimento, extrusão e saída de perfil de latão para rolo.

Figura 8 – Linhas de maquinação

Figura 9 – Produto acabado, barra e lingote de latão

Figura 10 – Estrutura tipo da liga bifásica

Figura 11 – Diagrama de equilíbrio Cu-Zn.

Figura 12 – Amostra de latão após ensaio de deszincificação

Figura 13 – Evolução da refinação do tamanho do grão no latão por efeito da adição de Boro e Ferro.

Figura 14 – Exemplos de pontos duros presentes na matriz de latões.

Figura 15 – Diferentes morfologias dos pontos duros em latões.

Figura 16 – Microestrutura de latão (400x) que ilustra inclusões globulares intermetálicas ricas em ferro, finamente distribuídas ao longo das fronteiras de grão ^[46].

Figura 17 – Esquema do procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de barra de latão

Figura 18 – Forno de cadinho, a gás propano, de 700 kg de capacidade.

Figura 19 - Medição da temperatura do banho.

Figura 20 – Recolha de amostra para análise química.

Figura 21 – Rectificação da amostra em torno mecânico.

Figura 22 – Desbaste da amostra em lixa.

Figura 23 – Molde de grafite

Figura 24 – Biletes produzidas

Figura 25 – Máquina de tracção Shimadzu Universal mod. AG -250KN

Figura 26 – Durómetro Rockwell B

Figura 27 – Microscópio óptico Nikon

Figura 28 – Tipos de aparas produzidas durante as operações de maquinação.

Figura 29 – Limalha produzida na maquinação da liga BASB14G

Figura 30 – Pastilha de corte utilizada no ensaio de maquinabilidade

Figura 31 – Mufla para aquecimento das amostras para estampagem

Figura 32 – Balancé de estampagem.

Figura 33 – Amostra estampada da liga BASB13F, actualmente produzida na empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos Lda., com boa plasticidade a quente

Figura 34 – Amostra estampada de liga de latão com má plasticidade a quente - gretada

Figura 35 – Peças produzidas no cliente durante o ensaio.

Figura 36 - Aspecto superficial da barra da liga B15 à saída da extrusão

Figura 37 - Gráficos comparativos das propriedades mecânicas das ligas actuais e da liga B21

Figura 38 - Peça produzida por estampagem e posterior maquinagem durante o ensaio no cliente

Figura 39 - Microestrutura da liga B21, ampliação 100x

Figura 40 - Microestrutura da liga BASB14G, ampliação 100x

Figura 41 - Microestrutura da liga BASB13-F, ampliação 100x

Figura 42 – Esquema do procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de lingote de latão.

Figura 43 – Forno de fusão de cadinho (14 kg).

Figura 44 - Vazamento para lingoteira.

Figura 45 – Moldações utilizadas para o teste de fluidez

Figura 46 – Amostras de teste de fluidez.

Figura 47 – Amostras de lingote polidas, isentas de defeitos.

Figura 48 – Lingotes com superfície rechupada (1), com poros (2), com segregações (3) e com superfície escamuda (4).

Figura 49 – Lingote com superfície uniforme após solidificação

Figura 50 – Microestrutura da liga LASB2-G, ampliação 100x

Figura 51 – Microestrutura da liga LASB3-DZR, ampliação 100x

Figura 52 – Microestrutura da liga L22, ampliação 100x

Figura 53 – Microestrutura da liga L23, ampliação 100x

Figura 54 – Microestrutura da liga L26, ampliação 100x

Figura 55 – Microestrutura da liga L27, ampliação 100x

Figura 56 - Gráficos comparativos das propriedades mecânicas das ligas actuais e das ligas L23 e L26.

Figura 57 – Esquema do procedimento experimental utilizado na análise metalográfica quantitativa e no estudo da repartição do Bismuto pelos microconstituintes

Figura 58 – Posicionamento da zona de recolha das amostras em cada lingote

Figura 59 – Imagem da microestrutura de uma das amostras e respectivo histograma

Figura 60 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões retrodifundidos (CP) da amostra 4

Figura 61 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões retrodifundidos (CP) da amostra 6

Figura 62 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões retrodifundidos (CP) da amostra 9

Figura 63 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões retrodifundidos (CP) da amostra 10

1 - Objectivo

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação teve por principal objectivo o desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, com vista a substituir as ligas actualmente produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da}, procurando-se não introduzir grandes alterações nas demais características e propriedades mecânicas das ligas de latão tradicionalmente produzidas, (tabelas 1 a 4).

2 - Enquadramento

O latão apresenta uma boa combinação de propriedades, nomeadamente em termos de condutividade térmica e eléctrica, resistência à corrosão e maquinabilidade, o que justifica a sua ampla aplicação, entre outras, em sistemas de distribuição de água.

A fim de obter uma boa maquinabilidade do latão, impõe-se a adição de elementos de liga, pelo que é comum proceder-se à introdução de 1 a 3% (em peso) de Chumbo. Nos latões, o Chumbo, cuja solubilidade nessas ligas é bastante reduzida, apresenta-se na microestrutura dessas ligas sob a forma de glóbulos dispersos ao longo das fronteiras de grão. Ao longo das operações de maquinação, o chumbo funde tendo assim um efeito lubrificante ao diminuir o coeficiente de fricção entre a ferramenta e o material; por outro lado, cria descontinuidades que promovem a fragmentação das aparas, reduz a força de corte, o desgaste das ferramentas e permite aumentar a velocidade de maquinação, daí resultando ciclos mais curtos para a produção de peças ^[1,2,3]. Contudo, o Chumbo acarreta algumas preocupações ambientais - incorporação de Chumbo na água, libertação de fumos e poeiras durante as operações de fusão, vazamento e maquinação, e ainda questões quanto à deposição em aterro das areias de fundição contaminadas com Chumbo.

Como resultado destas preocupações, a Agência Americana de Protecção do Ambiente (EPA) promulgou em 1991 uma directiva que se aplica aos sistemas públicos de distribuição de águas, estabelecendo como nível de acção o valor de 0,015mg/l (15ppb) de Chumbo presente na água para consumo humano ^[4].

Em 1996, o governo Norte-Americano implementa uma lei conhecida como “Safe Drinking Water Act” (SDWA). A SDWA é a principal lei que assegura a qualidade da água na América do Norte, autorizando a EPA a fixar para a água para consumo os limites de contaminantes que possam causar efeitos adversos na saúde pública. A EPA adoptou a norma ANSI/NSF STANDARD 61 que estabelece que os equipamentos de fim de linha, nos sistemas de distribuição de águas para consumo humano

(equipamentos de cozinhas e bares, torneiras, equipamentos de refrigeração de água, válvulas, etc.), quando testados, não podem libertar mais de 11 ppb de Chumbo para a água. Este valor de 11 ppb é inferior aos 15 ppb aprovados em 1991 pois a EPA considera que 4 ppb podem provir de outras fontes que não os equipamentos ^[5,6].

Mais recentemente, a 30 de Setembro de 2006, o Governador Arnold Schwarzenegger, promulgou a lei AB1953 no estado da Califórnia, que restringe o valor do Chumbo a <0.25% (em peso) em todos os tubos e acessórios em contacto com água para consumo humano ^[3].

No Japão, entrou em vigor em 01/04/2003 a regulamentação sobre a água para consumo humano, que estipula que a quantidade de Chumbo libertada para a água, proveniente dos acessórios dos sistemas de distribuição, deve ser <0,01 mg/l ^[7].

A nível europeu, entrou em vigor em 03/11/1998 a regulamentação relativa à água para consumo humano (Council Directive 98/83/EC) que estipula que o teor máximo de Chumbo presente na água deve ser inferior a 0,01 mg/l ^[8].

Ainda a nível europeu, entrou em vigor em Agosto de 2001, a Norma DIN 50930-6, respeitante ao comportamento à corrosão de materiais metálicos em contacto com a água para consumo, que estipula que a quantidade de Chumbo presente na água, proveniente de acessórios em latão, deve ser <0,01 mg/l ^[9].

Com a restrição aos valores do Chumbo presentes na água, e face às questões ambientais inerentes ao uso do Chumbo, os latões de fácil maquinaria sem Chumbo estão a ser largamente estudados e desenvolvidos um pouco por todo o mundo ^[6,7,10-18].

De entre os estudos já publicados e de algumas ligas já desenvolvidas, sobressaem como alternativas para o Chumbo: uma combinação de Bismuto e Selénio (Envirobrass®) ^[5,11,18], o Silício (Ecobrass®) ^[17], o Antimónio ^[14], uma combinação de Antimónio e Magnésio ^[10], e ainda uma liga em que o Chumbo é substituído por partículas de grafite juntamente com Titânio ^[19,20]. Ainda uma referência para uma liga obtida por pulverometalurgia em que o Chumbo é substituído somente por partículas de grafite ^[21].

Com base na elevada experiência adquirida na produção de ligas de latão, e na pesquisa bibliográfica exaustiva das ligas já existentes e na influência dos diferentes elementos neste tipo de ligas, foram desenvolvidas as ligas apresentadas nesta dissertação. Omitiram-se contudo, por questões óbvias de confidencialidade, os teores de alguns elementos de liga, considerados factores chave para o sucesso

Desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo

das ligas desenvolvidas, uma vez que trata de *know-how* adquirido que se pretende que seja uma mais-valia a usar num mercado cada vez mais competitivo.

Tabela 1 – Composição química das actuais ligas de latão produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de barras de latão ^[22,23]

Designação do produto		Composição química (% ponderal)										
Identificação da liga segundo norma	Código interno	Elemento	Cu	Al	Pb	Fe	Mn	Ni	As	Sn	Zn	Total Outros
Norma EN 12165: 1998 CW 617N (CuZn40Pb2)	BASB13F	Min.	57,0	-	1,6	-	-	-	-	-	Restante	-
		Máx.	59,0	0,05	2,5	0,3	-	0,3	-	0,3		0,2
Norma EN 12164: 1998 CW 614N (CuZn39Pb3)	BASB14G	Min.	57,0	-	2,5	-	-	-	-	-	Restante	-
		Máx.	59,0	0,05	3,5	0,3	-	0,3	-	0,3		0,2

Tabela 2 – Características técnicas das actuais ligas produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de barras de latão ^[22,23]

Designação do produto		Propriedades mecânicas	Gammas de Fabrico				Outras características
Identificação da liga segundo norma	Código interno		5-12 mm	13-30 mm	31-65 mm	≥66 mm	
Norma EN 12165: 1998 CW 617N (CuZn40Pb2)	BASB13F	R _m (N/mm ²)	490/520	450/500	450/420	>350	Produção, durante a maquinação, de aparas classificadas como Tipo I* Maquinabilidade - Excelente Electrodeposição - Excelente Polimento - Excelente
		R _{0,2} (N/mm ²)	370/420	350/400	340/320	>250	
		A (%)	12/20	16/35	30/42	>45	
		Dureza (HRB)	75/67	70/64	64/58	50/60	
Norma EN 12164: 1998 CW 614N (CuZn39Pb3)	BASB14G	R _m (N/mm ²)	480/520	480/430	440/410	>350	Estampagem Liga BASB13F - Excelente Estampagem Liga BASB14G - Razoável Soldadura - Excelente
		R _{0,2} (N/mm ²)	380/420	380/330	340/310	>250	
		A (%)	10/16	14/34	30/45	50/60	
		Dureza (HRB)	85/75	75/63	67/60	50/60	

* - ver ponto 9 (fig. 28)

Desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo

Tabela 3 – Composição química das actuais ligas de latão produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de lingotes de latão ^[22,23]

Designação do produto		Composição química (% ponderal)														
Identificação da liga segundo Norma	Código interno															
		Elem.	Cu	Pb	Sn	Fe	Al	Ni	Mn	P	Si	Sb	Cr	As	B Indicativo	Zn
Norma EN 1982:Abril de 2008 CuZn39Pb1AlB-B (CB755S)	LASB2-G	Mín.	59,50	1,20	–	0,05	0,40	–	–	–	–	–	–	–	0,00030	Restante
		Máx.	60,50	1,70	0,20	0,20	0,65	0,20	0,02	0,01	0,01	0,02	0,005	0,05	0,00100	Restante
Norma EN 1982:Abril de 2008 CuZn35Pb2AlB-B (CB752S)	LASB3-DZR	Mín.	61,50	1,20	–	–	0,40	–	–	–	–	–	–	0,05	0,00030	Restante
		Máx.	63,50	1,70	0,20	0,20	0,65	0,20	0,02	0,01	0,01	0,02	0,005	0,10	0,00100	Restante

Tabela 4 – Características técnicas das actuais ligas produzidas pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} para fabrico de lingotes de latão ^[22,23]

Designação do produto		Características							
Identificação da liga segundo norma	Código interno	Tensão de ruptura (R _m) (N/mm ²)	Alongamento A (%)	Dureza HRB _T	Polimento	Profundidade da deszincificação (mm)	Tamanho médio de grão (mm)	Estrutura	Temp ^a de Trabalho (°C)
Norma EN 1982:Abril de 2008 CuZn39Pb1AlB-B (CB755S)	LASB2-G	> 350	> 25	45 a 58	BOM	-----	< 0,050	Refinada	950 a 1020
Norma EN 1982:Abril de 2008 CuZn35Pb2AlB-B (CB752S)	LASB3-DZR	> 350	> 25	30 a 40	BOM	< 0,100	< 0,050	Refinada	1050 a 1100

3 - A Empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da}

A ASB – Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} é uma empresa essencialmente vocacionada para a recuperação e transformação de metais não ferrosos, com uma actividade centralizada no fabrico de ligas de latão de acordo com as Normas EN, NP, DIN, BS, JIS e ASTM. Os principais mercados da empresa são os fabricantes de torneiras, de ferragens e de acessórios para gás, água e electricidade.

As ligas de latão produzidas pela empresa (ver tabelas 1 a 4) são ligas bifásicas ($\alpha+\beta$), sendo comercializadas sob a forma de lingote para fundição e de barra para estampagem e maquinação. Com o intuito de favorecer a maquinabilidade destas ligas bifásicas, é adicionado como elemento de liga o Chumbo (ver ponto 4.2).

O fabrico de barras e lingotes de latão envolve, de forma sucinta, as seguintes etapas:

3.1 - Recepção das Matérias-Primas e Sistemas de Carga

As *matérias-primas* (sucatas diversas de metais não ferrosos, aparas e limalhas de latão, sucatas de Cobre e lingote de Cobre, Chumbo, Zinco, Bronze, Alumínio) entram nas instalações fabris em camiões ou contentores onde são pesadas e posteriormente encaminhadas para o armazém de matérias-primas.

Todas as matérias-primas são sujeitas a controlo, e eventualmente segregadas e/ou sujeitas a triagem quanto à presença de humidade, óleos, tintas, ferro e alumínio em forma livre, papel, materiais isolantes (mica no caso de bobines de cobre), areia, serrim, pó de latão e grau de oxidação do cobre.



Figura 1 – Diferentes tipos de matérias-primas (limalha de latão, gitos de latão, lingote de Zinco electrolítico, lingote de Cobre electrolítico)

3.2 - Processo de Fusão e de Manutenção

A fusão da matéria-prima efectua-se em fornos eléctricos de indução. Os fornos utilizados são os referidos no ponto 2.6.4 do documento de referência do sector de actividade – “Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metal Industries” [24].

A Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L^{da} dispõe de três fornos de fusão (ver figuras 2 e 3): dois são fornos de indução de cadinho (Crucible Induction Furnace), com capacidade de 12 e 4,5 ton, e um de indução de canal (Channel Induction Furnace), com capacidade de 13 ton. [25].

Os fornos estão equipados com um sistema de extracção de fumos e poeiras que funciona mesmo durante os períodos de limpeza das escórias antes do vazamento.

Como se trata de um processo contínuo, os fornos de fusão não vazam totalmente a sua carga, permanecendo no seu interior cerca de 30% de metal líquido após vazamento. Estes 30% de carga fundida vão permitir um encurtamento do tempo de fusão da carga seguinte.

A temperatura dos fornos é controlada automaticamente durante a fusão e antes do vazamento de modo a minimizar quer a produção de fumos quer as perdas de elementos de liga que apresentam temperatura de vaporização relativamente baixa.

A capacidade instalada é de 191 ton/dia de produto à saída da fusão.

Após fusão das cargas, a temperaturas que rondam os 1040/1080°C, é efectuada a limpeza das escórias e retirada uma amostra para análise espectrométrica. Em função dos resultados da análise, procede-se à correcção da composição química do banho metálico (correcção efectuada sobre os elementos de liga que compõem a carga – regra geral a correcção é efectuada sobre o Chumbo e Zinco ou Cobre).

Após adição das correcções necessárias, a temperatura do banho é novamente ajustada para 1040/1080°C, temperatura à qual é efectuado o vazamento do forno de fusão para o forno de manutenção.

Os fornos de manutenção, para biletos (de 16 ton) e lingotes (de 13 ton), são fornos de indução de canal (ver fig. 4). A corrente induzida nestes fornos promove a agitação do metal líquido no seu interior, permitindo assim uma homogeneização da liga. Estes fornos de manutenção são pressurizados com azoto para minimizar a oxidação do metal. Ao serem pressurizados, permitem manter um nível constante de metal na câmara 3 (ver fig. 4), assegurando assim um abastecimento contínuo da linha de produção de biletos e de lingotes.

Os fornos de manutenção de biletos e de lingotes diferem apenas no modo como os respectivos produtos são obtidos.

No processo de vazamento contínuo (ver fig. 5), onde são obtidos os biletos, o metal líquido “entra” nos arrefecedores (ver fig. 4, item 4) onde solidifica e é arrefecido. Os arrefecedores são moldes de cobre electrolítico com uma camisa interna em grafite, refrigerados a água. O metal solidifica, adquirindo a forma da camisa de grafite. Durante este processo, um banco de tracção vai aplicando

pequenos movimentos de tracção de modo a que o metal já solidificado seja “puxado”. Ao ser puxado para fora do arrefecedor, mais metal líquido vai ocupar o seu lugar no interior do molde e, como se trata de um processo contínuo, vão-se obter biletas que são depois cortados a 4,5 m de comprimento para armazenamento e posterior extrusão.

No forno manutenção para lingotes, a alimentação (enchimento dos moldes) também é contínua; contudo, neste caso, o vazamento é efectuado para uma lingoteira com 120 moldes de ferro fundido ligados entre si por correntes – tipo carrossel (ver fig. 6), que faz movimentos de pára e arranca de cada vez que enche um molde.

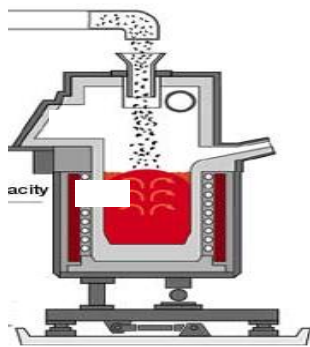


Fig. 2 – Forno de indução de cadinho

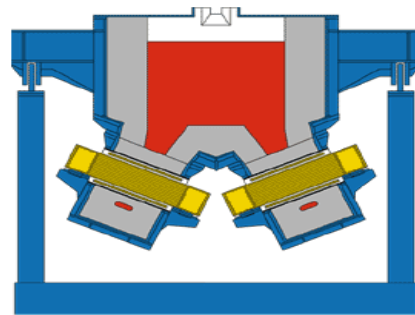


Fig. 3 - Forno de indução de canal

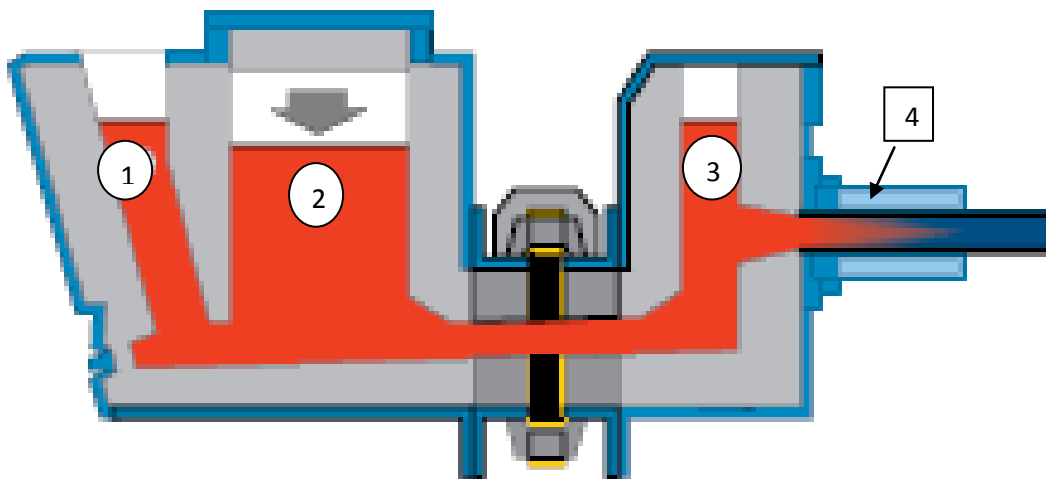


Fig. 4 – Forno de manutenção

(1 – Canal de enchimento, 2 – Câmara de pressurização, 3 – Câmara de controlo de nível, 4 – arrefecedores)

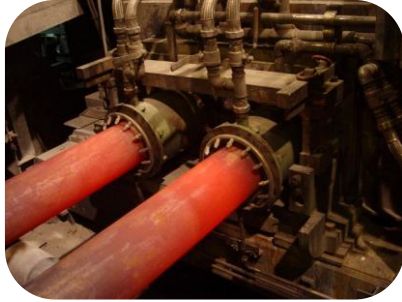


Fig. 5 – Vazamento contínuo de biletas



Fig. 6 – Vazamento para lingoteira

Uma vez concluído o vazamento, o forno de fusão recebe uma nova carga e o forno de manutenção vai alimentando a linha de produção (biletas ou lingotes).

3.3 - Extrusão Indirecta

Os biletas de diâmetro 250 mm, provenientes do sector da fusão, são cortados em comprimentos de acordo com a ordem de fabrico, e aquecidos a 750°C em forno a gás propano da prensa de extrusão, sendo em seguida extrudidos, numa extrusora de 30 MN, para produção de perfis (redondos, quadrados, sextavados, etc...), cujas medidas nominais variam de 5 a 90 mm.



Figura 7 – Etapas da extrusão: aquecimento, extrusão e saída de perfil de latão para rolo.

3.4 - Processo de Decapagem Química

Após a extrusão, os perfis para torneiar (45% da produção de perfis) daí resultantes sofrem decapagem química para remoção dos óxidos superficiais formados aquando do aquecimento às temperaturas de extrusão.

3.5 - Maquinação: Trefilagem e Estiragem

Os produtos à saída da extrusão, sob a forma de rolo ou de barra, são trefilados ou estirados, ocorrendo a redução do diâmetro de 3 a 7%, em termos relativos da dimensão final dos produtos,

através da passagem na fieira; seguem-se o, corte, o polimento, a rectificação da medida – calibração e endireitamento, um novo corte para acerto dos topos e finalmente o boleamento, no caso das barras para torneamento.

À saída de cada linha, as barras são embaladas e encaminhadas, de forma automática, para o armazém de produto acabado.



Figura 8 – Linhas de maquinação

3.6 - Armazém de Produto Acabado e Expedição



Figura 9 - Produto acabado, lingote e barra de latão

4 – Os Latões e a composição química

4.1 - Latões

Os latões são ligas metálicas binárias de Cobre e Zinco, às quais se adicionam intencionalmente alguns elementos de liga para obtenção de determinadas características. Quando o teor em Zinco é superior a 30%, a liga denomina-se “latão amarelo”.

A liga é considerada bifásica porque apresenta uma microestrutura composta por duas fases: a fase α e a fase β (ver fig. 10). Como se pode ver no diagrama de equilíbrio do sistema binário Cu-Zn (Fig. 11), a fase α é muito rica em Cobre; apresenta a mesma estrutura cristalográfica que o Cobre puro, ou seja, estrutura cúbica de faces centradas (cfc).

A fase α é uma fase pouco dura, dúctil e apropriada para a conformação mecânica a frio ^[26]. Esta fase apresenta um teor máximo de Zinco de 39% a 455°C que decai para 32,5% à temperatura de 903°C (temperatura peritética) e para cerca de 33% a 150°C ^[27].

Quando o teor de Zinco ultrapassa os 32,5%, a microestrutura dos latões mostra a presença de um segundo microconstituente denominado fase β ^[28].

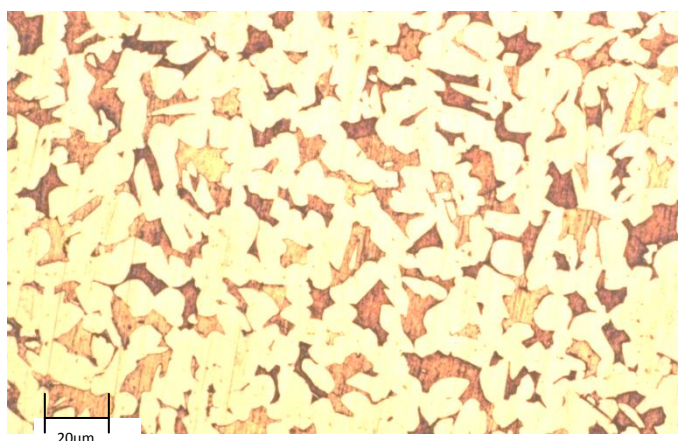


Figura 10 – Estrutura tipo da liga bifásica (fase α - cor clara; fase β – cor escura)

A fase β , com uma estrutura cristalográfica cúbica de corpo centrado (ccc), é uma fase mais dura e com maior resistência mecânica pelo que apresenta uma baixa taxa de conformação a frio ^[2,26] e boa conformação a quente ^[26].

As ligas de latão bifásicas de emprego industrial são, regra geral, ligas com teores (em peso) de Zinco entre 36 e 42%, apresentando, à temperatura ambiente, uma estrutura $\alpha+\beta$. Estas ligas de latão são usualmente extrudidas e estampadas a quente e maquinadas a frio ^[26].

4.2 - Influência dos principais elementos de liga dos latões

O elemento que mais fortemente afecta as propriedades dos latões é o Zinco. A influência do Zinco é marcante na determinação do tipo de estrutura característica dos latões (monofásica ou bifásica), definindo-se desse modo duas grandes famílias de latões.

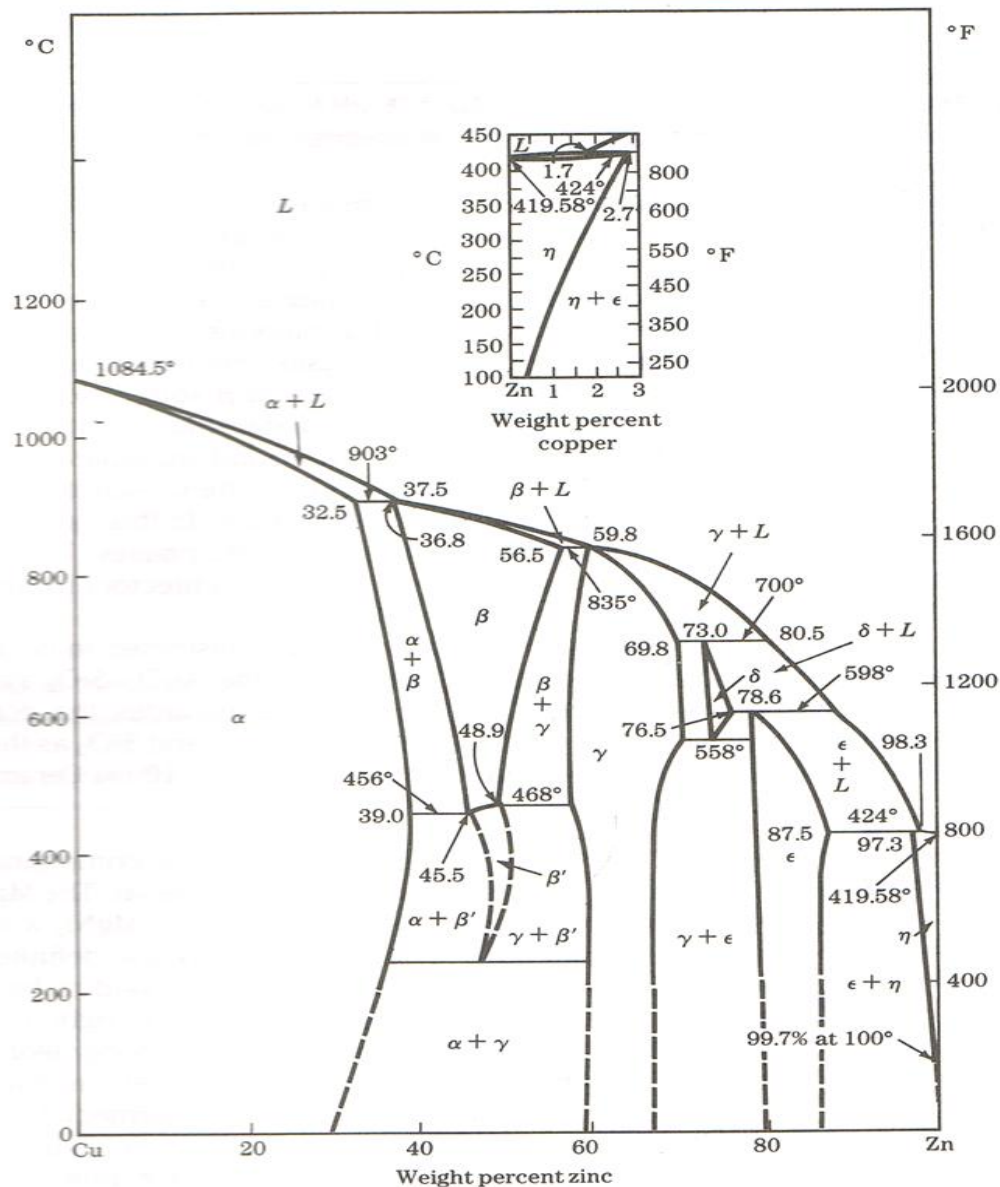


Figura 11 – Diagrama de equilíbrio Cu-Zn ^[29]

Outros elementos de liga são adicionados para afinação do tamanho de grão, aumento da fluidez da liga, da resistência à corrosão e das propriedades mecânicas, e para a desoxigenação do banho.

Alumínio (Al) - Este elemento é adicionado aos latões principalmente com o objectivo de os desoxigenar durante a fusão e para melhorar a sua fluidez e reduzir as perdas de Zinco por evaporação. Melhora a resistência à corrosão devido à formação de um filme passivo à superfície do latão ^[30, 31].

Nos latões para fundição (lingotes), promove uma melhoria do aspecto superficial das peças fundidas. Para teores relativamente elevados em Alumínio (cerca de 2%), os latões apresentam elevada resistência à corrosão, muito superior ao normal, tornando-os adequados para o fabrico de tubos de condensadores ^[30].

O Alumínio promove a formação da fase β (1% de Alumínio tem um coeficiente de equivalência de 6% de Zinco) e modifica a estrutura de grão de dendrítica para equiaxial ^[32].

Ferro (Fe) - O Ferro apresenta reduzida solubilidade no latão. É separado de forma muito fina na estrutura, actuando como refinador de grão, melhorando assim a generalidade das propriedades mecânicas, particularmente a resistência à tracção e a ductilidade ^[26,28,30-31].

Nos casos em que, na composição dos latões, existem outros elementos que possam reagir com o Ferro, existe o perigo de formação de “pontos duros”, particularmente indesejáveis para operações de polimento e de maquinação. O elemento que afecta de forma mais prejudicial estas propriedades é o Silício pois combina-se com o Ferro para dar origem a um constituinte muito duro, o Silicieto de Ferro ^[30].

Chumbo (Pb) - A solubilidade do Chumbo no latão a baixas temperaturas é muito baixa, apenas 0,04% a 800°C, pelo que se apresenta na microestrutura sob a forma de glóbulos dispersos ao longo das fronteiras de grão. Ao longo das operações de maquinação, o chumbo funde tendo assim um efeito lubrificante ao diminuir o coeficiente de fricção entre a ferramenta e o material; por outro lado, cria descontinuidades que promovem a fragmentação das aparas, reduz a força de corte, o desgaste das ferramentas e permite aumentar a velocidade de maquinação (rpm), daí resultando ciclos mais curtos para a produção de peças ^[1-3,33-34].

Nas barras, o seu teor pode atingir os 3,5%. Teores elevados em Chumbo têm, todavia, o inconveniente de baixar a resistência à tracção dos latões, especialmente a temperaturas elevadas, podendo provocar, em situações extremas, o fenómeno de fissuração a quente, durante as operações de estampagem, soldadura, ou até durante a própria solidificação de peças fundidas. Deste modo, o teor em Chumbo deve ser criteriosamente seleccionando tendo em conta as aplicações do latão ^[26].

Estanho (Sn) - O Estanho é responsável principalmente pela melhoria da resistência à corrosão dos latões ^[35]. Melhora ligeiramente as propriedades mecânicas dos latões. No entanto, teores demasiado elevados de Estanho podem ser responsáveis por fragilidade a quente, provocando fissuras das peças durante o seu arrefecimento ^[30].

Acima dos 0,8% de Estanho, regista-se um decréscimo acentuado do alongamento após ruptura. Nos latões para fundição (lingotes), e excepto nos casos em que se pretenda uma resistência à corrosão particularmente elevada, o teor de Estanho não deve ultrapassar os 0,3% ^[30].

Existem alguns estudos que indicam que o Estanho reduz a quantidade de produto necessário para promover a refinação de grão nos latões ^[32].

Manganês (Mn) - O Manganês apresenta baixa solubilidade mas melhora significativamente a resistência mecânica e à corrosão dos latões ^[26,31].

Promove ainda uma desoxigenação eficaz durante a fusão. Para teores elevados (%Mn > 1%), o latão apresenta uma dureza muito elevada, o que pode dificultar as operações de maquinação ^[30].

Níquel (Ni) - O Níquel, que apresenta elevada solubilidade nos latões bifásicos, melhora as características mecânicas e, ainda que ligeiramente, a resistência à corrosão dos latões. Porém, devido ao seu elevado custo, é pouco utilizado como elemento de liga ^[26,30].

Silício (Si) - Este elemento é um poderoso estabilizador da fase β dos latões e é um excelente desoxigenante capaz de aumentar as propriedades mecânicas dos latões bifásicos ^[26,31].

Melhora também a vazabilidade dos latões; porém, dada a sua forte tendência para formar pontos duros com o Ferro e com o Manganês, a sua presença pode induzir uma diminuição da maquinabilidade e da aptidão ao polimento dos latões ^[30].

Arsénio (As) - O Arsénio é empregue nos latões anti-deszincificantes, em baixos teores, por provocar uma melhoria sensível da resistência à deszincificação dos latões ^[36]. Acima de cerca de 0,2%, o Arsénio provoca uma deterioração importante das propriedades mecânicas dos latões ^[30].

Fósforo (P) - O Fósforo apresenta um efeito semelhante ao Arsénio no que diz respeito ao aumento da resistência à deszincificação dos latões ^[30]. Poderá também ser utilizado como desoxigenante ^[37] e para aumentar a fluidez da liga ^[28].

Antimónio (Sb) - O teor deste elemento não deve exceder 0,01% sob pena de se deteriorarem as propriedades mecânicas dos latões ^[26].

Magnésio (Mg) - O Magnésio é um desoxigenante eficaz. Por outro lado, confere ao latão uma cor mais clara. No entanto, dada a sua elevada pressão de vapor, a manutenção do Magnésio nos banhos de latão torna-se complicada pelo que as suas adições devem ser efectuadas pouco antes do vazamento ^[30].

Boro (B) e Zircónio (Zr) - São utilizados como refinadores do grão dos latões, promovem um aumento das propriedades mecânicas, apresentando ainda um efeito marcadamente benéfico sobre a aptidão do latão para o polimento. Por outro lado, um grão fino melhora ainda a resistência mecânica a quente, o que reduz os riscos de aparecimento de fissuras durante a solidificação de peças de geometria complexa ^[30].

Bismuto (Bi) - O seu efeito nos latões bifásicos é em tudo idêntico ao do Chumbo; não altera a morfologia da estrutura dos latões, reduz o tamanho de grão e facilita a sua maquinação ^[5,11,32,34,38].

Selénio (Se) – O Selénio potencia o efeito do Bismuto, permitindo assim recorrer a menores adições deste elemento para obter boa maquinabilidade ^[5,11,34,38-39].

Cério (Ce) – A solubilidade do Cério no Cobre é inferior a 0,1%. O Cério aumenta a ductilidade do Cobre e das suas ligas e actua como desoxigenante ^[41-42].

Telúrio (Te) - Melhora a maquinabilidade dos latões ^[26,34,39].

Além do Cobre e do Zinco, os elementos anteriormente referidos, quando presentes no latão, influenciam significativamente as características da liga. Assim, é comumente adoptada uma fórmula de cálculo que permite, em função dos diferentes teores dos elementos de liga presentes, definir, de uma forma mais explícita, as características da liga. Essa fórmula permite calcular o título fictício em Cobre (expressão 1) ^[2,26,30-31,43].

$$TF (Cu) = \frac{100 \times \%Cu}{(\%Cu + \%Zn + 10 \times \%Si + 6 \times \%Al + 2 \times \%Sn + \%Pb + 0.9 \times \%Fe + 0.5 \times \%Mn - 1.2 \times \%Ni)} \quad (1)$$

O título fictício em Cobre é um índice muito utilizado para caracterizar a liga de latão através da sua composição química. Uma liga com título fictício em Cobre elevado é uma liga mais dútil do que uma liga com título fictício em Cobre inferior.

5 – Resistência à Deszincificação

Em meios aquosos, as ligas de Cobre são usadas preferencialmente devido à sua excelente resistência à corrosão ^[19]; porém, nos latões bifásicos, ocorre um tipo particular de corrosão denominada deszincificação. ^[26]

A deszincificação é um tipo de corrosão selectiva resultante de uma remoção preferencial de Zinco da superfície do latão que induz a formação de uma camada porosa e frágil de Cobre e óxido de Cobre, o que poderá resultar numa deterioração das propriedades mecânicas e no aparecimento de fissuras ^[19,34,36,40,44-45].

Na figura 12 apresenta-se a estrutura, a uma ampliação de 100X, de uma amostra estampada após ensaio de resistência à deszincificação efectuado no laboratório da Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} segundo a norma ISO 6509 e/ou BS 2872 (para o mercado Inglês). As referidas normas definem como critério de aceitação do produto uma profundidade máxima de deszincificação de 200 μm , pelo que a amostra ensaiada foi alvo de rejeição pois apresenta uma elevada deszincificação (800 μm) ^[21,24].

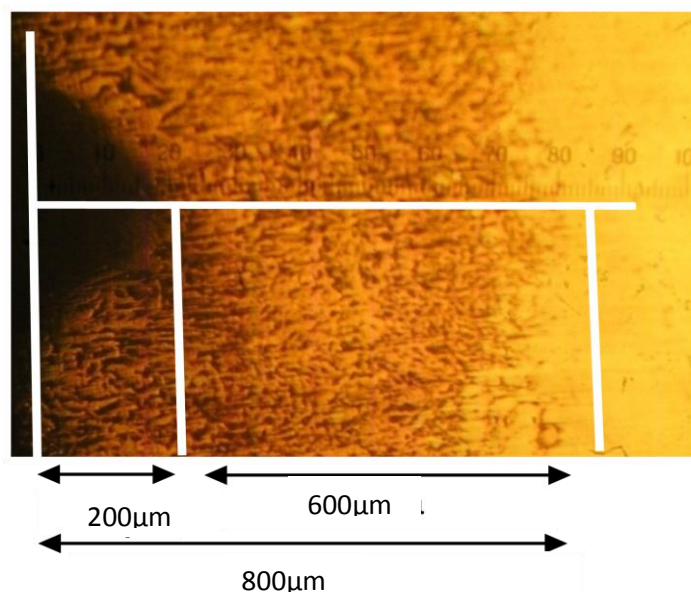


Fig. 12 – Amostra de latão após ensaio de deszincificação

Na bibliografia são descritos dois mecanismos para explicar o processo de deszincificação ^[44]: um é referido como mecanismo de dissolução selectiva do Zinco, e outro como o de dissolução simultânea do Cobre e Zinco e subsequente deposição do Cobre.

A resistência à deszincificação aumenta com o teor de Cobre na liga. Ligas de latão com teores de Zinco inferiores a 15% (% em peso) raramente sofrem deszincificação.

A adição de pequenas quantidades de Sn, e outros elementos como o As, Sb e P melhoram a resistência à deszincificação dos latões em diversos ambientes agressivos^[36,40,43,46]. Pequenas adições de Ouro e Prata, assim como uma correcta desoxigenação do banho, antes do vazamento, também potenciam o aumento da resistência à deszincificação dos latões^[46].

6 - Refinamento do Tamanho de Grão

O refinamento do tamanho de grão nos latões é efectuado mediante a adição de elementos de liga com o propósito de diminuir o tamanho de grão, o que, por sua vez, acarreta uma melhoria significativa das propriedades mecânicas da liga (tensão de rotura e resistência à fadiga), da aptidão ao polimento, da resistência à fissuração a quente, da fluidez e da qualidade superficial das peças obtidas^[32,2].

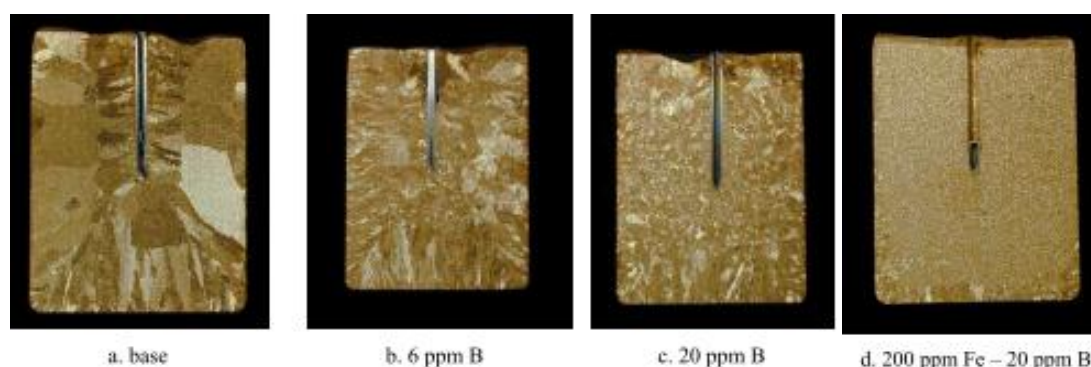


Fig. 13 - Evolução do refinamento do tamanho do grão no latão por efeito da adição de Boro e de Ferro^[32]

Na bibliografia são referenciados alguns elementos de liga usados para o refinamento do tamanho de grão de ligas de Cobre, tais como o Zircónio, o Ferro, o Boro, o Magnésio, o Cério, etc., quando adicionados individualmente ou em conjunto com outros. No caso particular dos latões bifásicos, o Ferro, o Boro e o Zircónio são os que se afiguram mais eficazes^[2].

O Zircónio tem um poder de refinamento interessante quando adicionado conjuntamente com o Boro que, por sua vez, é considerado o melhor afinador de grão para as ligas de latão isentas de Ferro. O Ferro também actua como refinador de grão pois, em virtude da sua baixa solubilidade no latão, quando se inicia a solidificação, o arrefecimento promove a precipitação de finas partículas de

Ferro que actuam como nucleadores de novos grãos. No entanto, devido à formação de pontos duros, o teor de Ferro no latão não deverá ultrapassar os 0,05%.^[32]

No caso específico do latão amarelo, experiências realizadas no MIL (Materials Technology Laboratory) sobre o refinamento do tamanho de grão evidenciaram que os outros elementos de liga também têm influência na afinação de grão, tendo-se chegado às seguintes conclusões^[32]:

- O Estanho reduz a quantidade de Boro necessário a um bom refinamento do tamanho de grão; para teores de Estanho de 0,3%, a quantidade de Boro necessária passa de 260 ppm para 30 ppm.
- O Alumínio induz a uma redução do tamanho de grão.
- As adições de Chumbo também promovem o refinamento do tamanho de grão, mesmo após a adição de Boro.
- A afinação de grão, recorrendo à adição dos três elementos de liga supracitados, pode ser alcançada com apenas 10 ppm de Boro.

O Boro é o elemento de liga mais usado para o refinamento do tamanho do grão dos latões amarelos e do latão Envirobrass®, sendo o Zircónio o mais utilizado para os latões com silício (Ecobrass®). Ambos os elementos são susceptíveis à oxidação, a perdas durante os períodos de manutenção do banho metálico e durante a refusão. Esta perda dos elementos refinadores reduz a efectividade do refinamento do tamanho de grão e denomina-se desvanecimento^[32].

Para que não ocorra desvanecimento, os latões amarelos e Envirobrass® devem compreender na sua composição pelo menos 3 ppm de Boro e 50 ppm de Ferro; nos latões com silício (Ecobrass®), o teor mínimo de Zircónio deve ser de 100 ppm^[32].

Nos latões refinados com Boro (latões amarelos e Envirobrass®), o fenómeno de desvanecimento só se faz sentir ao fim de cerca de 100 horas de manutenção do banho ou após 6 refusões. Nos latões refinados com Zircónio, esse fenómeno ocorre ao fim de apenas 1 hora^[32].

7 - Pontos Duros

Os pontos duros correspondem a compostos intermetálicos que, possuindo uma dureza superior à da liga mãe, produzem, devido ao seu arranque e posterior arrastamento, as chamadas caudas de cometa durante o processo de polimento das peças fabricadas. Os pontos duros e as caudas de cometa são inestéticos e, como tal, são considerados defeitos de fabrico (Fig.14).

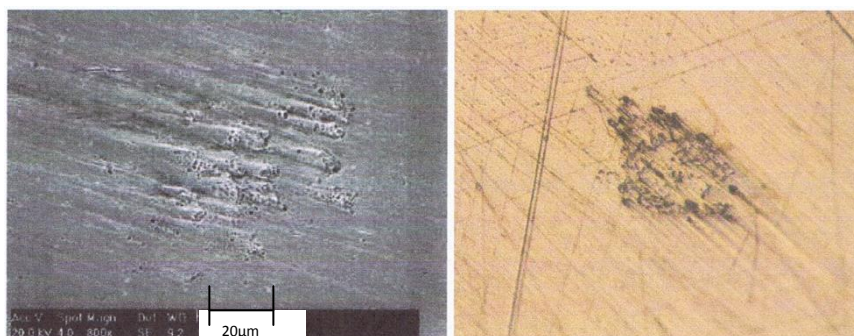


Figura 14 – Exemplos de pontos duros presentes na matriz de latões

A formação de pontos duros em latões tem sido objecto de investigação desde a década de 40 do século passado e reportam-se mais especificamente aos chamados bronzes ao Manganês. Os bronzes ao Manganês são endurecidos a partir da formação de precipitados finos e complexos que são compostos de Alumínio, Ferro e Manganês que ficam distribuídos na matriz $\alpha+\beta$. Originalmente, pensou-se que os pontos duros se formassem devido à segregação e crescimento destes precipitados por causa do excesso de Ferro, da deficiente qualidade da sucata e do processamento do banho metálico. Estes pontos duros eram de grandes dimensões, na ordem dos 3 mm de diâmetro, mas podiam ser reduzidos mantendo uma elevada temperatura de estágio do banho metálico ^[32]. A remoção ou diminuição dos pontos duros foi explicada como uma provável dissolução desses precipitados ^[2,32]. Mais tarde, foi confirmado que o Silício também desempenha um papel fundamental na formação dos pontos duros, não só nos bronzes ao Manganês mas também nos latões 60:40. Estes pontos duros demonstraram conter elevadas quantidades de Ferro, Silício, Alumínio e Cobre, assim como de Boro e Manganês, muito embora em menor quantidade ^[32].

O Boro é utilizado como refinador das ligas de latão amarelo, e existem estudos que indicam que o Boro pode formar os seus próprios pontos duros ao combinar-se com o Ferro em baixas concentrações, originando partículas de boreto de Ferro. Efectivamente, verificou-se que, à medida que os teores de Boro e Ferro vão aumentando, os pontos duros crescem de forma assinalável e

tornam-se esféricos. Estas partículas, formadas bem acima da temperatura de *liquidus* devido à reacção do Boro, do Silício e do Ferro, crescem à medida que a temperatura diminui. Investigações mais recentes atestaram que a adição de Ferro a uma liga de latão afinada, para teores superiores a 0,014%, resulta no aparecimento de inclusões de boreto de ferro em grande número. Para teores superiores a 0,06%, assiste-se à formação de “agulhas” intermetálicas de boreto de Ferro na estrutura metálica. Duas morfologias distintas de inclusões foram observadas: partículas finas e agulhas (Fig.15). Estas inclusões aparecem individualizadas ou agrupadas nas zonas intergranulares [32].

O efeito do Ferro na formação dos pontos duros em muito se deverá à sua baixa solubilidade no Cobre. A solubilidade do Ferro no Cobre puro líquido varia com a temperatura, sendo total apenas para temperaturas superiores a 1300°C. No caso das ligas de Cobre, em especial do latão 60:40, a solubilidade do Ferro é similar à alcançada no Cobre puro, sendo de 1,5% a 1020°C e de 0,04% a 950°C. O Ferro forma compostos intermetálicos finamente distribuídos na microestrutura, tal como ilustrado na figura 16. Contudo, sob certas condições (incluindo a presença de Ferro livre, e para teores superiores ao limite de solubilidade) estas inclusões podem formar inclusões de maiores dimensões – os pontos duros [28]. Este factor pode explicar a razão de diversos estudos demonstrarem que a presença de Ferro no banho, no seu estado livre, causa a formação de pontos duros por si só, sem a intervenção do Boro. Uma das provas deste facto é a descoberta que, embora a maior parte das partículas apresente elevados teores de Boro e Ferro, existem algumas partículas que são apenas constituídas por Ferro [28].

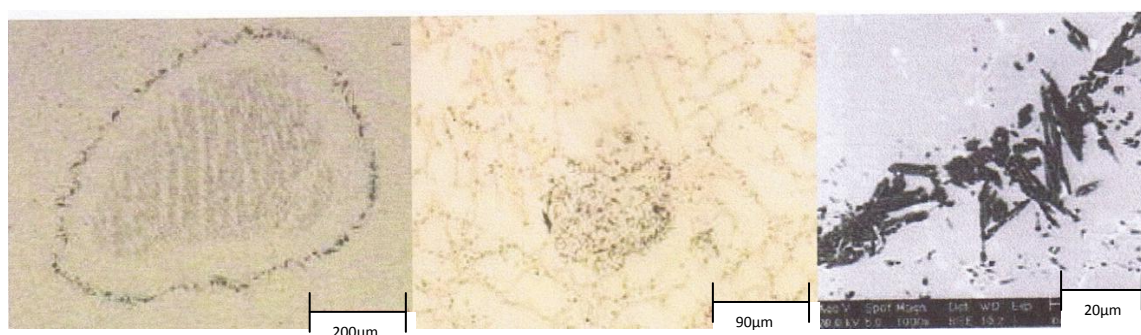


Figura 15 – Diferentes morfologias dos pontos duros em latões [28]

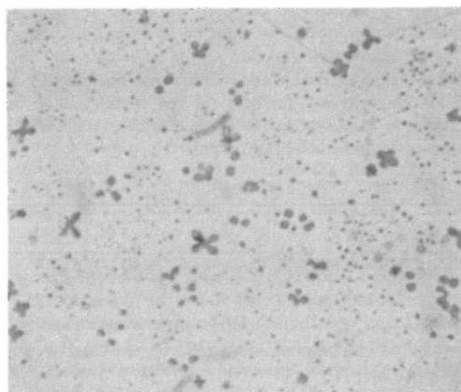


Figura 16 – Microestrutura de latão (400x) que ilustra a presença de inclusões globulares intermetálicas ricas em Ferro finamente distribuídas ao longo das fronteiras de grão ^[28]

8 – Cuidados a ter em conta para evitar a formação de pontos duros

Sendo os pontos duros uma enorme fonte de refugo de peças e acessórios na operação de polimento, devem ser tidos em conta alguns cuidados de modo a evitar/reduzir o seu aparecimento:

- Deverá ser tido em conta um cuidado suplementar no controlo do banho porque devem ser evitadas as contaminações com Ferro, que podem advir, sobretudo, da utilização de matérias-primas com elevados teores em Ferro e da utilização de ferramentas de trabalho à base daquele elemento. No caso da contaminação com Ferro se dar, devem-se então criar condições (temperatura e extensão do patamar) para uma correcta e completa dissolução do Ferro livre introduzido no banho metálico ^[32].
- Cuidado acrescido na adição de elementos de liga ^[28].
- Evitar longos períodos de manutenção do banho líquido, especialmente a temperaturas próximas da temperatura de fusão da liga ^[28].
- Evitar o uso de fluxos e fundentes contendo Boro ^[28].

9 - Procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de barra de latão

Tendo por base o know-how da empresa e a exaustiva pesquisa bibliográfica levada a cabo, foi elaborado um planeamento minucioso de toda a actividade a realizar com vista ao desenvolvimento das ligas de latão de baixo teor em Chumbo. Na Fig. 17, é apresentado o esquema do Procedimento

Desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo

experimental utilizado ao que se segue uma breve descrição das diversas etapas, recursos e ensaios realizados

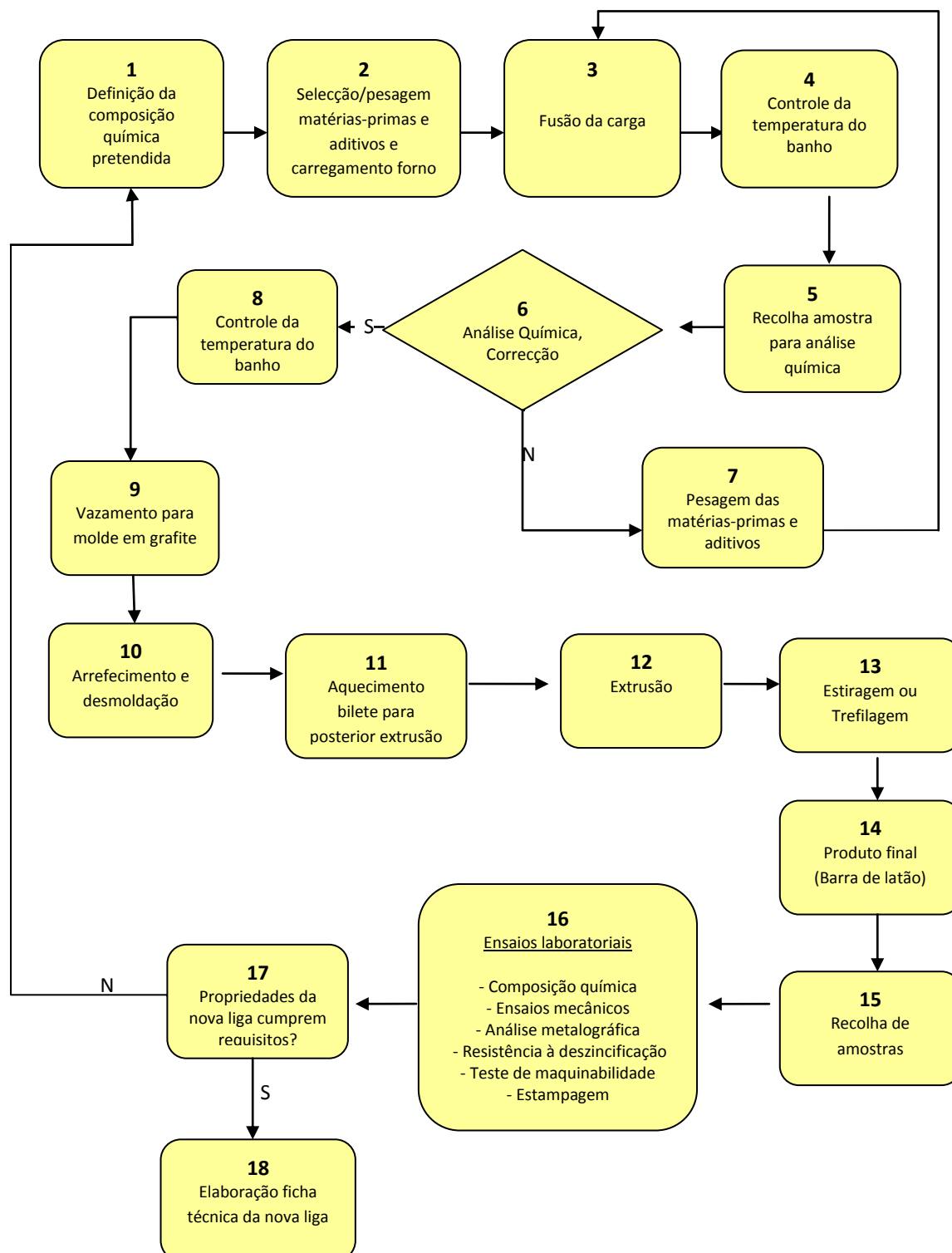


Fig. 17 – Esquema do procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de barra de latão

Etapa 1 – Tendo por base o *know-how* da empresa e a exaustiva pesquisa bibliográfica levada a cabo, estabeleceram-se as composições das ligas isentas de Chumbo que se afiguraram mais promissoras.

Etapa 2 – Para evitar a contaminação da liga com outros elementos de liga para além dos desejáveis, procedeu-se à selecção das matérias-primas com qualidade superior. Para a liga base foram usados Cobre e Zinco electrolíticos. Os restantes elementos de liga foram adicionados sob a forma pura ou de aditivos (Tabela 5).

Elemento de liga		Origem (Puro ou sob a forma de aditivo)
Cobre	Cu	Cobre electrolítico
Zinco	Zn	Zinco Electrolítico
Alumínio	Al	Cabo de Alumínio triturado
Silício	Si	Liga afinada
Boro	B	Liga afinada
Zircónio	Zr	Liga afinada
Bismuto	Bi	Bismuto electrolítico
Arsénio	As	Liga afinada
Fósforo	P	Liga afinada
Cério	Ce	Liga afinada
Estanho	Sn	Estanho

Tabela 5 – Elementos de liga utilizados e sua origem

Etapa 3 – A fusão das matérias-primas foi efectuada num forno de cadinho, de 700 kg de capacidade, aquecido a gás propano (Fig. 18). Foi utilizado um forno com esta capacidade pois o objectivo era vazar billetes, com cerca de 750 mm de comprimento e 250 mm de diâmetro, para posterior extrusão, com um peso aproximado de 500 Kg.

Após a fusão da carga, procedia-se à limpeza da escória que sobrenadava o banho assim como era efectuada a raspagem das paredes do forno de modo a remover a escória agarrada às suas paredes.



Fig. 18 – Forno de cadinho, aquecido a gás propano, de 700 kg de capacidade

Etapas 4 e 5 – Efectuada a limpeza da escória, era controlada a temperatura do banho, usando para o efeito uma cana pirométrica de imersão (Fig. 19). Verificada a temperatura, que se pretendia situar-se na gama 1000-1080°C, procedia-se à recolha de uma amostra para análise espectrométrica da composição química da liga. A recolha da amostra é efectuada numa coquilha em ferro fundido, de forma cilíndrica, com 50 mm de diâmetro (Fig. 20).



Fig. 19 – Medição da temperatura do banho



Fig. 20 – Recolha de amostra para análise

Etapas 6 e 7 – As amostras eram rectificadas (Fig. 21) e posteriormente desbastadas em lixa (de tamanho de grão 80), (Fig. 22), para eliminação de óxidos eventualmente presentes à superfície e para garantir uma superfície plana e uniforme, fundamental para uma análise espectrométrica de qualidade. Verificada a composição, procedia-se eventualmente aos acertos de carga necessários e repetia-se a amostragem e análise.



Fig. 21 – Rectificação da amostra

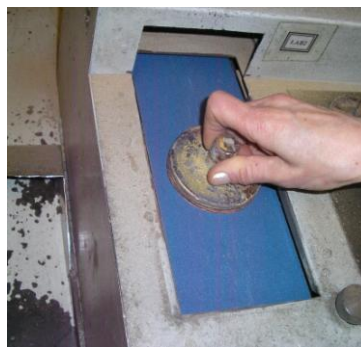


Fig. 22 – Desbaste em lixa

Etapas 8 a 10 – Antes de se proceder ao vazamento, efectuava-se o controle da temperatura do banho. O vazamento era efectuado com recurso a uma colher de vazamento, sendo efectuado para um molde de grafite (Fig. 23). Este molde tem a forma e dimensões dos biletos produzidos na empresa ASB, e é arrefecido a ar, de modo a que a solidificação se efectue em condições o mais próximas possíveis do vazamento em contínuo. Após arrefecimento procedeu-se à desmoldação dos biletos produzidos (Fig.24).



Fig. 23 – Molde de grafite



24 – Biletos produzidas

Etapas 11 e 12 - Os biletos produzidos foram aquecidos e extrudidos. Durante esta operação foram registados os dados técnicos relativos à extrusão.

Etapas 13 a 15 – Os semi-produtos extrudidos foram estirados ou trefilados, tendo sido assim submetidos a todas as operações usuais para a produção de barra de latão. Uma vez concluído o processo, foram recolhidas amostras para a realização de ensaios laboratoriais.

Etapa 16 – Foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais:

Determinação da composição química – através de um espectrómetro de emissão atómica, Marca SPECTRO, modelo Spectrolab M9.

Ensaio de tracção – ensaio realizado numa máquina de tracção, marca Shimadzu Universal, modelo AG-250KN (Fig. 25). Os provetes foram preparados segundo a norma DIN 50125.

Ensaio de dureza – Ensaio realizado num durómetro Rockwell B (Fig. 26).



Fig. 25 – Máquina de tracção Shimadzl mod. AG-250KN



Fig. 26 – Durómetro Rockwell B

Análise Metalográfica – Nestes ensaios foram verificados a microestrutura da liga, o tamanho de grão ^[47] e a repartição de fases, segundo o procedimento apresentado no Anexo 1 e recorrendo ao microscópio óptico Nikon(Fig. 27).

Ensaio de resistência à deszincificação – Estes ensaios foram efectuados de acordo com a norma ISO 6509, cujo procedimento é descrito no Anexo 2.

Critérios de aceitação:

1. Barras de liga resistentes à deszincificação - profundidade máxima de deszincificação de 100µm, em secção transversal da amostra.
2. Lingote resistente à deszincificação - profundidade máxima de deszincificação de 100µm, em secção transversal da amostra.
3. Em qualquer uma das ligas resistentes à deszincificação - profundidade máxima de deszincificação de 200µm, em secção longitudinal da amostra.



Fig. 27 – Microscópio óptico Nikon

Ensaio de maquinabilidade – De acordo com o método de teste descrito na ASTM E618-07 – “Standard Method for Evaluating Machining Performance Using an Automatic Screw/Bar Machine” ^[48], a maquinabilidade das ligas pode ser avaliada em função da tipologia das aparas e limalhas produzidas durante as operações de maquinação a velocidades elevadas, incluindo a maquinação em

máquinas automáticas de elevada velocidade. A maquinabilidade poderá ainda ser avaliada em termos de consumo de energia, taxa de desgaste das ferramentas, aspecto superficial final e morfologia das aparas e limalhas, ou ainda da combinação destas ^[48].

A morfologia das aparas é um bom indicador da maquinabilidade do latão e permite classificar (em termos de maquinabilidade) as ligas de latão em três tipos ^[49] (Fig. 28):

- Tipo I - “Free cutting Brass” – liga de latão de corte fácil que produz, durante as operações de maquinação, aparas pequenas e fragmentadas, e que permite o uso destas ligas em tornos mecânicos de alta velocidade. Estas ligas contêm Chumbo ou outros elementos para incrementar a maquinabilidade.
- Tipo II – liga de latão que embora produza aparas relativamente pequenas, apresentam-se “encaracoladas”. Este tipo de aparas poderá estar associada a uma deficiente qualidade da superfície das peças produzidas.
- Tipo III – liga de latão que produz limalhas longas, contínuas, regra geral de forma helicoidal. Com este tipo de aparas, as operações de maquinação tornam-se difíceis, morosas e potenciam o desgaste das ferramentas de corte.



Aparas das ligas do tipo I

Aparas das ligas do tipo II

Aparas das ligas do tipo III

Fig. 28 – Tipos de aparas produzidas durante as operações de maquinação

A liga CuZn36Pb3 (Free Cutting Brass), com um índice de maquinabilidade de 100% ^[23], também produzida na Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da}, sob a designação de BASB14G, é utilizada como referência para a caracterização da maquinabilidade dos latões por arranque de apra ^[49] (Fig 29).



Fig. 29 – Limalha produzida na maquinação da liga BASB14G

O ensaio de maquinabilidade neste trabalho é adaptado do método de teste descrito na ASTM E618-07 – “Standard Method for Evaluating Machining Performance Using an Automatic Screw/Bar Machine”^[48], e consiste na recolha e comparação da morfologia das aparas e limalhas libertadas na primeira passagem, aquando da maquinação dos provetes das diferentes ligas (de $\varnothing$ 25 mm para $\varnothing$ 19 mm), nas seguintes condições, típicas do torno mecânico existente na Alberto da Silva Barbosa e Filhos L.^{da}:

- Velocidade de rotação máxima do torno que maquina os provetes: 1500 rpm
 - Velocidade de Corte = 120 m/s; provete $\varnothing$ 25 mm implica uma velocidade de rotação de 1500 rpm
1. Rotação da peça – corte 1500 rpm (peça = provete $\varnothing$ 25 mm)
 2. Translação da ferramenta: avanço 0,44 mm
 3. Desbaste 3 mm por banda

Material da ferramenta de corte: pastilha

Fornecedor: SECO, pastilha VCGT 332F-AL KX

Pastilha em carboneto de tungsténio (WC)

Ângulo de folga ou incidência – 90° entre a peça e a pastilha

Ainda como primeira análise, é recolhida a limalha proveniente da serra de cortar biletos para posterior extrusão.



Fig. 30 – Pastilha de corte utilizada no ensaio de maquinabilidade

Ensaio de plasticidade a quente (estampagem) – Este ensaio é efectuado com o intuito de verificar a plasticidade a quente da liga. Não é um ensaio padronizado; é um ensaio interno da empresa. É um ensaio que permite fazer um estudo comparativo com o comportamento das actuais ligas contendo Chumbo.

Tal como descrito no ponto 4.1, a fase α é apropriada para a conformação mecânica a frio, e a fase β para conformação mecânica a quente, pelo que, para trabalhos de conformação a quente, procura-se no diagrama de equilíbrio a gama de temperaturas na qual a liga em estudo apresenta maior proporção de fase β (mantendo contudo presente a fase α).

A regra da alavanca ^[29] permite estimar, através do diagrama de equilíbrio, para uma determinada composição e a uma determinada temperatura, a fracção (em massa) das fases presentes.

Para as ligas em questão, com Tf(Cu) de cerca de 58%, aplicando a regra da alavanca (sem contudo apresentar aqui os cálculos), constata-se que é na gama de temperatura 600-730⁰C que a proporção de fase β é superior e, conseqüentemente, a plasticidade a quente da liga.

Para a realização do ensaio foram adoptadas as temperaturas de 630, 680, 700 e 720⁰C.

As amostras recolhidas são colocadas numa mufla (Fig. 31), às diferentes temperaturas, procedendo-se posteriormente à estampagem das mesmas, recorrendo a um balancé existente na empresa (Fig. 32).

Nas figuras 33 e 34 são apresentadas fotografias de amostras de ligas que apresentam boa plasticidade a quente (amostra isenta de fissuras) e com reduzida plasticidade a quente (aparecimento de fissuras na periferia).



Fig. 31 – Mufla para aquecimento das amostras para estampagem



Fig. 32 – Balancé de estampagem



Fig. 33 – Amostra, após estampagem, da liga BASB13F, actualmente produzida na Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da} - boa plasticidade a quente

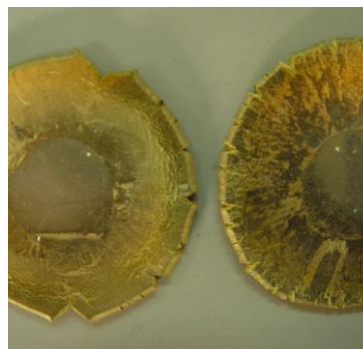


Fig. 34 – Amostra, após estampagem, de liga de latão que apresenta má plasticidade a quente (aparecimento de fissuras na periferia)

9.1 – 1ª Série de ligas produzidas com vista à produção de barra de latão de baixo teor em Chumbo

A tabela 6 apresenta o quadro resumo da composição química da 1ª série de ligas produzidas.

Tabela 6 – Composição química da 1ª série de ligas produzidas

Composição química das ligas para produção de barra (Ø 27 mm) com baixo teor de Pb												
Designação liga	%Cu	%Zn	%Al	%Pb	%Bi	%Si	%Sn	%Fe	%Ni	%As	%Tf (Cu)	Tempª vazam. (°C)
B1	57,32	38,99	0,010	3,07	<0,005	<0,005	0,196	0,29	0,087	0,013	57,00	955 ^{*1}
B2	58,00	41,93	<0,005	<0,005	<0,0005	<0,005	<0,005	0,008	0,028	0,002	57,50	1030
B3	58,57	40,92	<0,005	0,018	<0,005	0,258	<0,005	0,018	0,122	0,002	57,00	1045
B4	60,22	39,18	<0,005	<0,005	<0,005	0,494	<0,005	0,017	0,043	0,003	57,20	1040
B5	57,46	42,13	<0,005	<0,005	0,38	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,002	57,20	1027
B6	57,87	41,56	<0,005	<0,005	0,54	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,002	57,70	1035
B7	58,31	40,92	<0,005	<0,005	0,57	0,118	<0,005	0,015	0,024	0,002	57,60	1055
B8	58,27	41,38	<0,01	0,21	0,009	0,002	0,003	0,011	0,008	0,002	57,80	1050
B9	58,68	40,53	<0,001	0,001	0,557	0,104	0,002	0,006	0,006	0,002	58,00	1048
B10	58,78	40,61	0,002	0,196	0,177	0,089	0,006	0,006	0,011	0,002	58,00	1027

*1 – Temperatura medida no forno de canal pressurizado.

Notas:

- A liga B1 é a liga para torneamento actualmente produzida pela empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos, L.^{da}. É a liga seleccionada para referência, tal como referido no ponto 9.
- A liga B2 é uma liga CuZn, sem qualquer aditivo para melhorar a maquinabilidade do latão.
- Nas ligas B3 e B4 é usado o Silício como potencial substituto do Chumbo.
- Nas ligas B5 e B6 é usado o Bismuto como potencial substituto do Chumbo.
- Nas ligas B7 e B9 optou-se por uma combinação de Si+Bi como potenciais substitutos do Chumbo.
- Na liga B8 optou-se pela adição de uma pequena percentagem de Chumbo ($\pm 0,2\%$), sem qualquer outro aditivo.
- Na Liga B10 optou-se por uma combinação de Si+Bi+Pb como potenciais substitutos do Chumbo.

Por sua vez, na tabela 7, são apresentadas as características técnicas da 1ª série de ligas produzidas.

De modo a minimizar distúrbios a nível da produção no cliente, foram produzidas barras com diâmetro Ø 27 mm, para coincidir com o diâmetro em uso à data do ensaio na sua linha de produção. Foi efectuado o teste de estampagem e a determinação das propriedades mecânicas. Foi ainda

recolhida limalha resultante do corte do bilette na serra, e limalha resultante do torneamento dos provetes para o ensaio de tracção.

Tabela 7 – Características técnicas da 1ª série de ligas produzidas

Características técnicas das ligas para produção de barra (Ø 27 mm) com baixo teor de Pb									
Liga	HRB _r	Propriedades mecânicas		Teste estampagem - aspecto do rebordo da patela *1			Dados do corte de um bilette (Ø 250 mm) na serra		Dados torno mecânico
		Rm (N/mm ²)	A (%)	680°C	700°C	720°C	Tempo de corte (s)	Tipo de Limalha	Tipo de Limalha
B1	66-68	442,50	29,9	PG	PG	PG	100	I	I
B2	77-79	592,38	19,3	NG	NG	NG	105	III	II
B3	90-92	533,55	28,9	NG	NG	NG	220	III	II
B4	94-95	639,24	13,4	NG	NG	NG	190	III	II
B5	77-79	513,81	26,3	G	G	G	91	II	I
B6	72-74	515,98	28,2	NG	G	G	90	I	I
B7	80-82	542,08	23,6	NG	NG	NG	91	II	I
B8	78-80	509,61	24,1	NG	NG	NG	-	II	I
B9	80-82	547,56	19,4	NG	G	G	130	II	I
B10	81-83	495,35	11,5	G	G	G	105	II	II

*1 - (Gretado - G), (não gretado - NG), (Pouco gretado - PG)

9.2 – Discussão de resultados obtidos com a 1ª série de ligas produzidas

- Tal como seria de esperar, pois trata-se de uma liga para torneiar e não para estampar, a liga B1 apresenta uma limalha tipo I, quer na serra quer no torno. Para além disso apresenta uma reduzida aptidão à estampagem.
- A liga B2 apresenta limalhas tipo II e III, o que permite concluir da necessidade da presença de outro elemento de liga para aumentar a sua maquinabilidade.
- As ligas B3 e B4 apresentam durezas muito elevadas, associadas a limalhas tipo II e III, características de ligas de difícil maquinabilidade.
- A Liga B5, embora com propriedades mecânicas interessantes, apresenta fissuras muito acentuadas após estampagem.

Tendo por base os resultados obtidos, decidiu-se não enviar para ensaio no cliente as barras produzidas a partir das ligas B2, B3, B4 e B5. As restantes ligas foram ensaiadas no cliente (designado de forma abreviada por MF) de modo a analisar o comportamento das mesmas em processo industrial. Este ensaio consistiu na produção, em torno automático, de peças habitualmente produzidas pelo cliente.

Os parâmetros de torneamento então utilizados foram os seguintes:

- Velocidade de rotação do torno – 2000 rpm
- Profundidade de corte – 0,25 mm
- Velocidade transversal – 0,1 mm/rpm

Durante os ensaios foram recolhidos dados sobre a limalha produzida e o aspecto superficial das peças maquinadas. Foram ainda realizados ensaios de electrodeposição e de soldadura sobre as peças produzidas (Fig. 35).



Fig. 35 – Peças produzidas no cliente durante os ensaios

Apresentam-se na tabela 8 os dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente das ligas produzidas nesta 1ª série.

Tabela 8 – Dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente

Liga	Ensaio maquinagem - Tipo de limalha e aspecto superficial da peça		Ensaio de electrodeposição	Obs.
	Tipo de limalha	Aspecto superficial		
B1	I	Bom	Bom	Soldadura – Boa
B6	III	Superfície rugosa, com mau acabamento	Bom	Soldadura – Boa
B7	III	Superfície rugosa, com mau acabamento	Bom	Soldadura – Boa
B8	III	Superfície rugosa, com mau acabamento	Bom	Soldadura – Boa
B9	I	Razoável	Bom	Soldadura – Boa
B10	III	Superfície rugosa, com mau acabamento	Bom	Soldadura – Boa

9.3 – Discussão de resultados da 1ª série de ensaios no cliente

- A liga B1, tal como esperado, exibiu um comportamento exemplar nos ensaios.
- Das restantes ligas, só a liga B9 apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à maquinabilidade pelo que, na elaboração da 2ª série de ligas, foi decidido utilizar um teor de Bismuto em valores próximos ao da liga B9.

9.4 – 2ª Série de ligas produzidas com vista à produção de barra de latão de baixo teor em Chumbo

A tabela 9 apresenta a composição química da 2.ª série de ligas produzidas.

Tabela 9 – Composição química da 2ª série de ligas produzidas

Composição química das ligas para produção de barra (Ø 27 mm) com baixo teor de Pb												
Designação liga	%Cu	%Zn	%Al	%Pb	%Bi	%Si	%Sn	%Fe	%Ni	%As	%Tf (Cu)	Tempª vazam. (°C)
B1A	57,32	38,99	0,010	3,07	<0,005	<0,005	0,196	0,290	0,087	0,013	57,00	955 ^{*1}
B1B	57,35	40,60	<0,001	1,84	<0,005	0,001	0,099	0,068	0,014	0,004	57,30	955 ^{*1}
B11	58,82	39,74	0,021	0,048	0,619	0,152	0,206	0,121	0,156	0,107	58,00	1026
B12	59,32	39,41	<0,001	0,018	1,090	0,001	0,017	0,017	<0,001	0,105	59,20	1038
B13	71,80	26,09	<0,001	0,030	0,015	1,960	0,047	0,018	<0,001	0,002	60,60	1040
B14	62,97	36,66	0,049	0,134	0,007	0,004	0,014	0,008	0,001	0,132	62,30	1028
B15	76,95	20,43	<0,003	0,045	0,026	2,400	0,019	0,015	<0,003	0,004	62,90	1017
B16	76,76	21,06	<0,001	0,021	0,024	2,030	0,017	0,013	<0,001	0,003	64,50	1017
B17	77,91	18,43	<0,001	0,014	0,005	3,480	0,017	0,022	<0,001	0,001	59,00	1008
B18	72,31	23,97	<0,001	0,014	0,02	3,520	0,036	0,02	<0,003	0,002	54,60	1022
B19	75,51	21,48	<0,001	<0,01	0,009	2,840	0,015	0,014	<0,001	0,002	59,80	1007
B20	58,91	40,72	<0,001	0,139	0,144	0,002	0,011	0,005	<0,001	0,035	58,50	1043

*1 – Temperatura medida no forno de canal pressurizado

Notas:

- A liga B1A continua a figurar como liga de referência em termos de aptidão ao torneamento (BASB14-G)
- A liga B1B é a liga de referência em termos de aptidão à estampagem (BASB13-F)
- As ligas B11, B12 e B20 são ligas à base de Bismuto, com adição de algumas terras raras (que, por questões de confidencialidade, não serão divulgadas).
- As ligas B13, B15, B16, B17, B18 e B19 são ligas em que se recorre ao Silício para substituir o Chumbo.
- As ligas B15 e B16 apresentam composições muito idênticas. Efectivamente, a liga B15, ao ser extrudida, originou barra gretada/fissurada (ver Fig. 36) pelo que se decidiu preparar nova carga, com a mesma composição, e repetir a extrusão a fim de verificar se o problema tinha origem na liga ou em algum parâmetro de extrusão que estivesse fora de controlo. Os resultados obtidos foram muito idênticos pelo que não é possível produzir com esta liga barra nas condições operacionais de fabrico actuais da empresa.

Na tabela 10 são apresentados os dados técnicos relativos à 2ª série de ligas produzidas. Foi efectuado o teste de estampagem e a determinação das propriedades mecânicas. Foi ainda recolhida limalha resultante do corte do bilette na serra, e limalha produzida no torno durante a preparação dos provetes para o ensaio de tracção.



Fig. 36 – Aspecto superficial da barra da liga B15 após extrusão

Tabela 10 – Características técnicas da 2ª série de ligas produzidas

Características técnicas das ligas para produção de barra (Ø 27 mm) com baixo teor de Pb										
Liga	HRB _r	Propriedades mecânicas		Teste estampagem - aspecto do rebordo da patela* ¹			Dados do corte de um bilette (Ø 250 mm) na serra		Dados torno mecânico	Obs.
		R _m (N/mm ²)	A (%)	680°C	700°C	720°C	Tempo de corte (s)	Tipo de limalha		
B1A	67	442,5	29,9	Pouco Gretado (PG)			100	I	I	
B1B	65	456,5	27,8	NG	NG	NG	102	I	I	
B11	72	511,9	26,0	NG	NG	NG	100	I	I	
B12	66	418,6	32,4	G	G	G	92	I	I	
B13	67	460,6	28,6	G	G	G	110	III	-	Elevada pressão de extrusão
B14	62	409,4	33,9	NG estampagem difícil	NG estampagem difícil	NG estampagem difícil	105	III	-	Elevada pressão de extrusão
B15	-	-	-	-	-	-	95	III	-	
B16	-	-	-	-	-	-	105	III	-	
B17	84	672,4	39,9	G	G	G	103	III	II	
B18	60	379,1	22,4	G	G	G	105	III	II	
B19	82	588,3	38,1	G	G	G	125	III	II	
B20	76	499,4	20,5	G	G	G	122	III	II	

*1 - (Gretado - G), (não gretado - NG), (Pouco gretado - PG)

9.5 – Discussão de resultados obtidos com a 2ª série de ligas produzidas

- As ligas B15 e B16 foram excluídas dos ensaios a efectuar no cliente por razões idênticas às já referidas no ponto 9.4.
- A liga B18 foi excluída dos ensaios no cliente pois a barra produzida apresentava uma superfície escamosa.
- As restantes ligas foram ensaiadas no cliente de modo a verificar o comportamento das mesmas em processo industrial. Estes ensaios já foram referidos no ponto 9.2

Apresentam-se na tabela 11 os dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente das ligas produzidas nesta 2ª série.

Tabela 11 – Dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente

Liga	Ensaio de maquinagem - Tipo de limalha e aspecto superficial da peça		Ensaio de electrodeposição
	Tipo de limalha	Aspecto superficial	
B1	I	Bom	Bom
B11	I	Bom	Bom
B12	III	Rugoso	Bom
B13	III	Rugoso	Bom
B14	III	Superfície rugosa, com mau acabamento	Bom
B17	II	Razoável	Bom
B18	III	Superfície rugosa, com mau acabamento	Bom
B20	III	Superfície rugosa, com mau acabamento	Bom

9.6 – Discussão de resultados da 2ª série de ensaios no cliente

Da análise dos resultados das tabelas 10 e 11 constata-se que a liga B11 é de facto a que apresenta melhores resultados pelo que se optou, para a última série de ensaios, por elaborar oito ligas, tomando por base a composição da liga B11, e fazendo variar ligeiramente o teor de Bismuto, com ou sem adições de Silício. De salientar ainda que foi mantida a adição de terras raras.

9.7 – 3ª Série de ligas produzidas com vista à produção de barra de latão de baixo teor em Chumbo

Neste ponto dos trabalhos, optou-se por enviar as ligas produzidas para mais um cliente de modo a avaliar o comportamento das ligas à estampagem, seguida de maquinagem. De modo a minimizar

distúrbios a nível da produção nos clientes, foram produzidas barras com diâmetro $\varnothing$ 22 e 30 mm, para coincidir com o diâmetro em uso à data dos ensaios nas suas linhas de produção.

A tabela 12 sintetiza a composição química da 3ª série de ligas produzidas

Tabela 12 – Composição química da 3ª série de ligas produzidas

Composição química das ligas para produção de barra ($\varnothing$ 30 mm e $\varnothing$ 22 mm) com baixo teor de Pb												
Designação liga	%Cu	%Zn	%Al	%Pb	%Bi	%Si	%Sn	%Fe	%Ni	%As	%Tf (Cu)	Temp ^a vazam. (°C)
B21 Barra $\varnothing$ 30	57,82	41,37	0,001	0,093	0,616	0,001	0,039	0,014	0,001	0,013	57,82	1023
B22 Barra $\varnothing$ 30	58,33	40,97	0,001	0,035	0,392	0,117	0,015	0,116	0,003	0,003	57,73	1002
B23 Barra $\varnothing$ 30	58,66	40,41	0,001	0,057	0,67	0,143	0,01	0,008	0,004	0,003	57,93	995
B24 Barra $\varnothing$ 30	57,87	41,75	0,001	0,014	0,34	0,002	0,01	0,005	0,004	0,003	57,86	1015
B31 Barra $\varnothing$ 22	57,32	41,91	0,001	0,017	0,698	-	0,011	0,022	0,001	0,003	57,32	1020
B32 Barra $\varnothing$ 22	58,60	40,77	0,001	0,031	0,387	0,132	0,013	0,019	0,001	0,003	57,93	1015
B33 Barra $\varnothing$ 22	58,71	40,41	0,001	0,073	0,617	0,137	0,014	0,001	0,004	0,004	58,00	1010
B34 Barra $\varnothing$ 22	57,74	41,80	0,001	0,018	0,407	0,003	0,009	0,004	0,003	0,003	57,73	999

As ligas estão repartidas por dois grupos. Um grupo compreende as ligas B21, B22, B23 e B24 das quais foram produzidas barras de $\varnothing$ 30 mm. O outro compreende as ligas B31, B32, B33 e B34, das quais foram produzidas barras de $\varnothing$ 22 mm.

De referir que a composição das ligas B21 e B31 é muito idêntica, o mesmo se passando com os pares B22-B32, B23-B33 e B24-B34. A partir destes pares de ligas foram produzidas barras de diâmetros distintos pois o objectivo era realizar ensaios industriais em dois clientes que produzem peças diferentes. Um dos clientes, designado por MF, produziu peças por torneamento a partir de barra de $\varnothing$ 22 mm; o outro cliente, designado por AR, produziu peças por estampagem e posterior torneamento a partir de barra de $\varnothing$ 30 mm.

Na tabela 13 apresentam-se as características técnicas relativas à 3ª série de ligas produzidas. A exemplo das séries anteriores, foi efectuado o teste de estampagem e a determinação das propriedades mecânicas. Foi ainda recolhida limalha resultante do corte do bilete na serra, e limalha produzida no torno durante a preparação dos provetes para os ensaios de tracção.

Tabela 13 – Características técnicas da 3ª série de ligas produzidas

Características técnicas das ligas para produção de barra com baixo teor de Pb									
Liga	HRB _T	Propriedades mecânicas		Teste estampagem - aspecto do rebordo da patela* ¹			Dados do corte de um bilete (Ø 250 mm) na serra		Dados torno mecânico
		R _m (N/mm ²)	A (%)	680°C	700°C	720°C	Tempo de corte (s)	Tipo de limalha	Tipo de limalha
B21 Barra Ø 30	64	487,9	34,1	N	PG	G	105	I	I
B22 Barra Ø 30	72	497,5	34,8	N	PG	G	108	II	I
B23 Barra Ø 30	74	529,7	32,5	N	G	G	102	II	I
B24 Barra Ø 30	64	493,7	31,1	G	G	G	104	II	I
B31 Barra Ø 22	72	503,6	28,5	N	PG	N	103	I	I
B32 Barra Ø 22	79	572,6	18,7	PG	G	G	106	II	II
B33 Barra Ø 22	79	548,8	16,8	N	N	N	105	II	I
B34 Barra Ø 22	72	523,6	30,4	G	G	G	103	I	I

*1 - (Gretado - G), (não gretado - NG), (Pouco gretado - PG)

Na figura 37 são apresentados gráficos comparativos das propriedades mecânicas das ligas actuais e da liga B21.

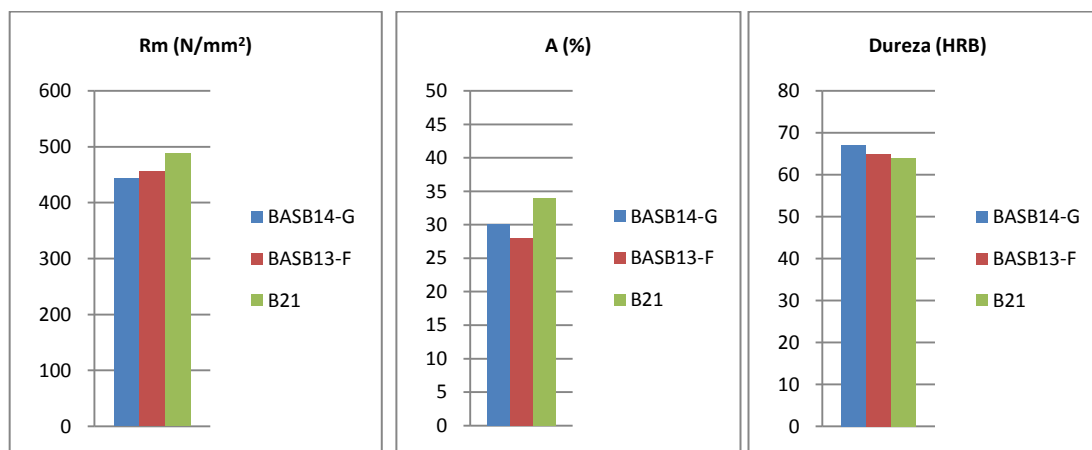


Fig. 37 - Gráficos comparativos das propriedades mecânicas das ligas actuais e da liga B21.

A análise comparativa dos resultados obtidos permite chegar à conclusão que a liga B21 apresenta propriedades mecânicas muito idênticas às das actuais ligas produzidas (ver Tabela 2).

9.8 – Discussão de resultados obtidos com a 3ª série de ligas produzidas

Tal como referido no ponto anterior, as ligas B21, B22, B23 e B24 foram ensaiadas no cliente AR. Este ensaio consistiu na estampagem de peças (Fig. 38) e sua posterior maquinagem. As restantes ligas foram ensaiadas no cliente MF.



Fig.38 – Peças produzidas por estampagem, e posterior maquinagem, durante os ensaios no cliente AR

Apresentam-se nas tabelas 14 e 15 os dados técnicos recolhidos durante os ensaios nos clientes das ligas produzidas nesta 3ª série.

Tabela 14 – Dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente AR

Liga	Ensaio estampagem e maquinagem - Tipo de limalha e aspecto superficial da peça			Ensaio de electrodeposição	Obs.
	Tipo de limalha	Aspecto superficial após estampagem	Aspecto superficial após maquinagem		
B21 Barra Ø 30	I	Bom	Bom	Bom	
B22 Barra Ø 30	II	Bom	Partiram as brocas de maquinagem	Bom	Sobreaquecimento das ferramentas de corte
B23 Barra Ø 30	I	Bom	Razoável	Bom	
B24 Barra Ø 30	III	Bom	Razoável	Bom	

9.9 – Discussão de resultados dos ensaios de estampagem e maquinagem no cliente AR

- As ligas B21 e B23 tiveram comportamentos muito semelhantes durante o ensaio de estampagem. Constatou-se que a liga B23 apresenta uma maior fluidez durante a estampagem; contudo, a liga B21 apresenta, para além de uma boa aptidão à estampagem, uma melhor maquinabilidade.

- A liga B24 origina limalhas tipo III, características de ligas de difícil maquinabilidade, e a liga B22 apresenta limalhas tipo II, de maquinabilidade reduzida, promovendo o sobreaquecimento das ferramentas de corte durante a maquinagem.
- Face ao anteriormente exposto, a liga B21 é tida como a mais adequada. Conclui-se ainda que, muito embora o Silício promova uma melhoria da fluidez da liga durante a estampagem, a sua presença provoca sobreaquecimento nas ferramentas de corte, induzindo mesmo a sua rotura.
- O teor de Bismuto mais adequado para estas ligas situa-se na gama 0,6-0,7%.

Com base nos dados anteriormente referidos, foi decidido excluir a liga B32 dos ensaios de maquinagem a realizar no cliente designado por MF.

Tabela 15 – Dados técnicos recolhidos durante os ensaios no cliente MF

Liga	Ensaio maquinagem - Tipo de limalha e aspecto superficial da peça		Ensaio de electrodeposição	Obs.
	Tipo de limalha	Aspecto superficial		
B31 Barra Ø 22	I	Bom	Bom	
B33 Barra Ø 22	I	Bom	Bom	
B34 Barra Ø 22	II	Mau ^{*1}	Bom	Peças "agarravam-se" ao macho

*1 – Peças fora de tolerância devido às dificuldades de maquinagem

9.10 – Discussão de resultados do ensaio de maquinagem no cliente MF

- A nível de maquinabilidade, as diferenças entre as ligas B31 e B33 não são perceptíveis; ambas deram origem a peças com bom acabamento superficial e dentro das tolerâncias.
- Para a liga B34, as peças produzidas apresentavam mau acabamento e, ao maquinar a segunda peça, as ferramentas de corte ficaram agarradas à peça pelo que se chega à conclusão de que a liga apresenta fraca maquinabilidade.

9.11 – Conclusões relativas ao desenvolvimento de uma liga de latão com baixo teor de Chumbo para produção de barra

- Face aos resultados obtidos nos ensaios, realizados tanto na empresa como em dois dos seus clientes, a liga B21 apresenta-se como uma liga com baixo teor em Chumbo, com boa aptidão para a estampagem e o torneamento.

- Partiu-se de uma situação em que a empresa disponibilizava aos seus clientes duas ligas com Chumbo, uma para estampar e outra para tornear, e desenvolveu-se uma liga (B21) perfeitamente adequada para substituir ambas. A liga B21 foi denominada de ECOASB20 e a sua ficha técnica pode ser consultada no site da empresa em www.asb.pt.
- Em termos de maquinabilidade das ligas de latão, o Bismuto é o elemento escolhido para substituir o Chumbo, situando-se o seu teor nos 0,6-0,7%.
- A incorporação de Silício parece promover o sobreaquecimento das ferramentas de corte durante as operações de maquinagem.
- Para todas as ligas produzidas, foi utilizado o Fósforo como desoxigenante e o Boro como refinador do tamanho de grão. O seu efeito em termos das características técnicas das ligas é muito significativo, nomeadamente no que concerne à sua aptidão ao polimento. Foram ainda adicionadas terras raras para potenciar o efeito do Bismuto, incrementando assim a maquinabilidade das ligas,.
- A microestrutura da liga B21 (Fig. 39) apresenta-se do tipo acicular, em oposição à microestrutura das actuais ligas contendo Chumbo, BASB14G (Fig. 40) e BASB13F (Fig. 41), com grãos arredondados; contudo, o tamanho médio de grão mantém-se $<0,050\text{ mm}$ ^[47].

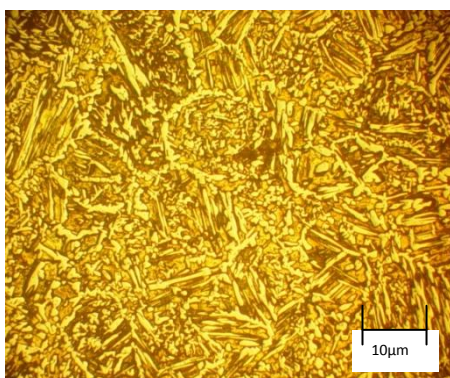


Fig. 39 – Microestrutura da liga B21, Ampliação 100x

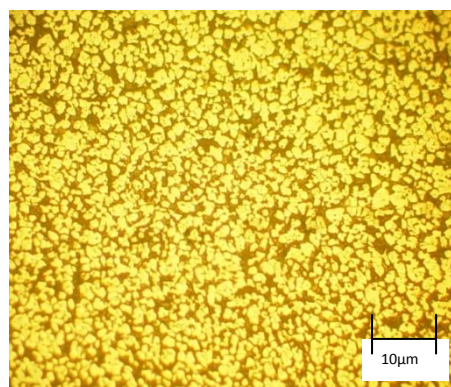


Fig. 40 – Microestrutura da liga BASB14G, Ampliação 100x

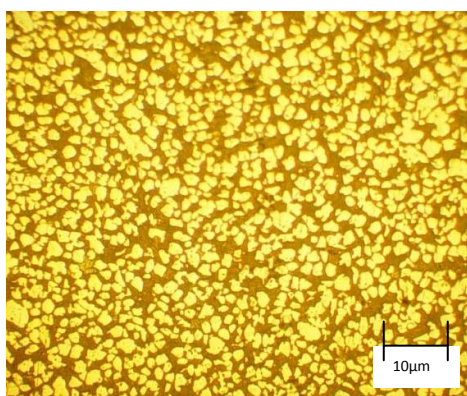


Fig. 41 – Microestrutura da liga BASB13-F, Ampliação 100x

10 - Procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de lingote de latão

Tal como no desenvolvimento da liga de latão de baixo teor em Chumbo para a produção de barra de latão, também no desenvolvimento das ligas de latão, de baixo teor em Chumbo para a produção de lingote, foi elaborado um planeamento minucioso de toda a actividade a realizar. Na Fig. 42, é apresentado o esquema do procedimento experimental utilizado, ao que se segue uma breve descrição das diversas etapas, recursos e ensaios realizados.

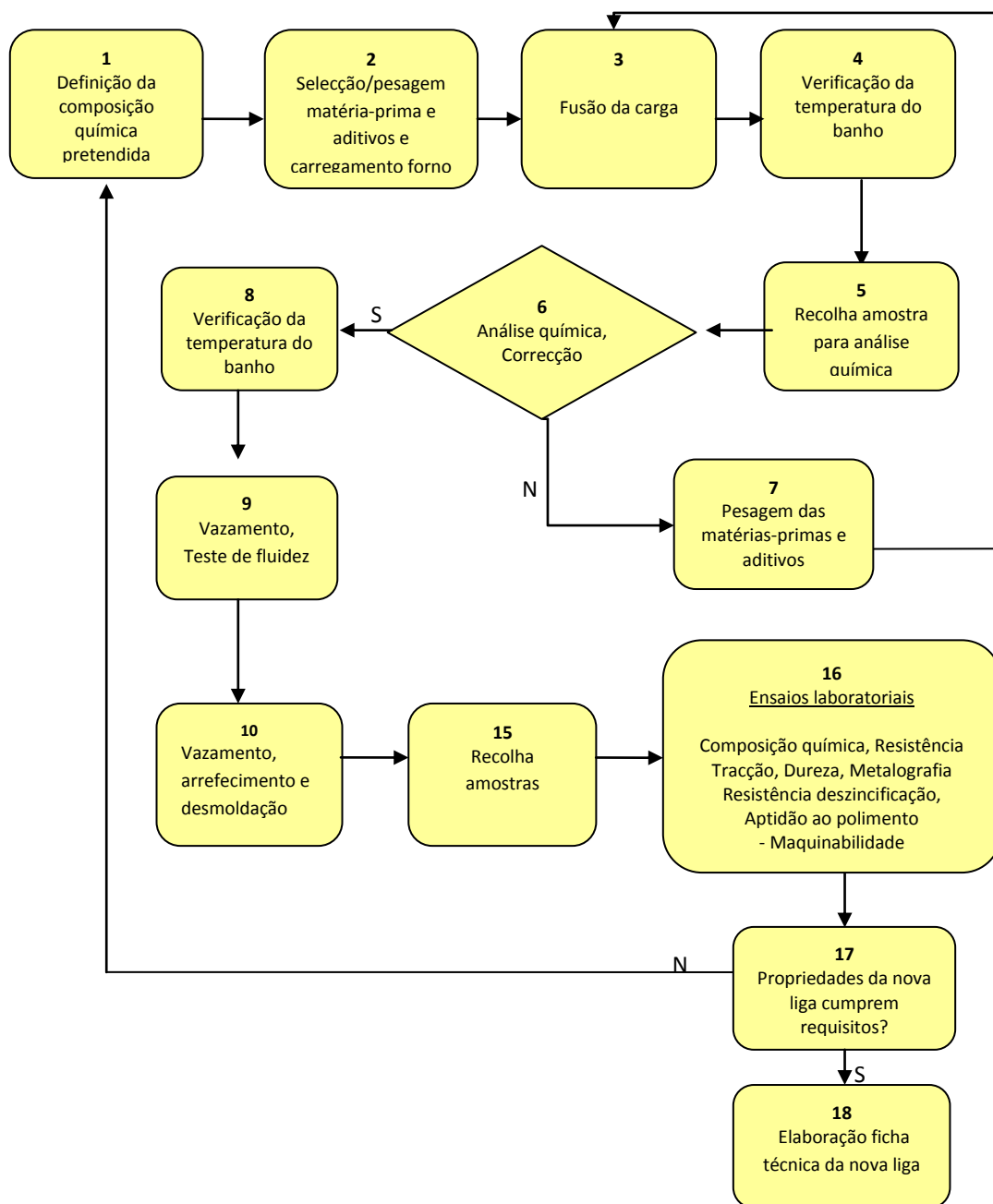


Fig. 42 – Esquema do procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de Lingote de latão.

O fluxograma relativo ao procedimento experimental utilizado no desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo, para a produção de lingote de latão difere do utilizado para a produção de barra de latão nos seguintes pontos:

Etapa 3 – A fusão é realizada num forno de cadinho, de menor capacidade, apenas 14 kg (Fig.43), pois o objectivo é a produção de lingotes com um peso unitário médio de 10 kg.

Etapa 9 – O vazamento é efectuado para lingoteira de ferro fundido (Fig. 44). Durante o vazamento das ligas para lingote, é efectuado o teste de fluidez. Este teste, não sendo padronizado, é um teste adoptado pela empresa e consiste em vazar para uma moldação de areia shell obtida a partir de um molde pré-definido e contar quantos canais são preenchidos após solidificação (9 canais =100%) (Fig. 45 e Fig. 46). Por questões de confidencialidade não são divulgadas as dimensões dos canais.



Fig. 43 – Forno de fusão de cadinho
(capacidade: 14 kg)

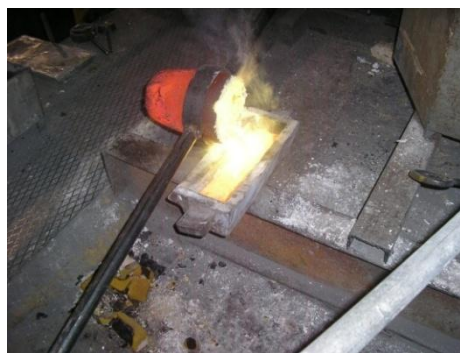


Fig. 44 – Vazamento para
lingoteira



Fig. 45 – Moldações utilizadas para o
teste de fluidez



Fig. 46 – Amostras do teste de
fluidez

Etapa 16 – É incluído o ensaio de aptidão ao polimento que consiste em fazer o polimento de uma amostra para verificar a inexistência de pontos duros, figura 47.

Neste ensaio procede-se ao corte da amostra, ao seu desbaste em lixa de grão 80, e posterior acabamento num polidor (escova giratória de material têxtil). Segue-se a observação visual da superfície polida para potencial detecção de pontos duros.



Fig. 47 – Amostras de lingote polidas, isentas de defeitos

10.1 – 1ª Série de ligas produzidas

A tabela 16 encerra um quadro resumo da composição química e das características técnicas da 1.ª série de ligas produzidas (com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de Chumbo). Nesta tabela foram apenas considerados os elementos químicos constantes na tabela.

Tabela 16 – Composição química e características técnicas da 1.ª série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de Chumbo

Lingote de latão com baixo teor de Chumbo												
Liga	%Cu	%Zn	%Si	%Ce	%Sb	%Pb	%Tf (Cu)	Temp ^a vazam. (°C)	HRB	Rm (N/mm ²)	A (%)	Polimento
L1	74,84	21,15	3,67	–	–	0,180	56,3	1075	68-71	–	–	Amostra porosa com buracos profundos
L2	74,68	21,24	3,77	–	–	0,156	55,8	1075	74-76	460,5	25,9	Amostra com segregações
L3	76,81	18,70	4,18	–	–	0,149	55,9	1061	65-72	–	–	Amostra porosa com buracos profundos
L4	74,54	22,92	2,17	–	–	0,213	62,4	1075	–	–	–	Amostra com rechepe na zona central
L5	77,20	20,07	2,13	–	–	0,243	65,0	1091	–	–	–	Amostra porosa com buracos profundos
L6	77,38	19,77	2,24	–	–	0,412	64,5	1062	30-34	316,4	49,9	
L7	78,68	16,97	4,14	–	–	0,002	57,4	1089	71-74	281,3	46,1	
L8	79,50	16,10	4,26	–	–	0,001	57,5	1095	–	330,7	17,3	Amostra porosa com buracos profundos.
L9	71,71	25,58	2,47	–	–	<0,001	58,8	1065	–	–	–	Amostra porosa com buracos profundos.
L10	73,08	24,30	2,54	–	–	0,001	59,5	1064	42-48	346,0	30,4	
L11	74,80	23,25	1,88	0,4	–	0,003	64,0	1062	30-34	375,7	69,1	
L12	73,60	24,49	1,68	0,4	–	<0,001	64,1	1073	30-32	328,8	61,5	
L13	77,55	18,44	3,60	0,4	–	0,001	58,8	1062	–	–	–	Amostra porosa com buracos profundos
L14	77,24	18,47	3,78	0,4	–	0,001	57,9	1085	–	–	–	Amostra porosa com buracos profundos
L15	64,30	34,87	–	0,4	0,77	0,020	46,9	1035	–	–	–	Amostra porosa
L16	68,80	29,27	–	0,4	1,90	0,0017	50,6	1050	–	181,5	2,37	
L17	64,70	34,50	–	0,4	0,70	0,018	47,2	1054	–	183,6	13,8	Excelente maquinabilidade

Notas:

- Nesta série não se efectuaram ensaios de fluidez e de resistência à deszincificação. Também não se efectuaram ensaios mecânicos sobre as amostras que apresentavam poros e/ou segregações.

- Para a produção destas ligas foi utilizado um desoxigenante para eliminar a porosidade do produto final; contudo, mesmo assim, algumas das ligas produzidas apresentavam poros.
- Nas ligas L1 a L10 foi utilizado o Silício como substituto do Chumbo. Estas ligas foram produzidas tendo por base uma liga já existente e patenteada – Ecobrass^{®[18]}; de realçar que os teores dos diferentes elementos de liga situam-se fora dos limites da referida patente.
- Nas ligas L11 a L14, para além do Silício, procedeu-se igualmente à adição de Cério.
- Nas ligas L15 a L17 foram utilizados o Cério, o Antimónio e o Silício como substitutos do Chumbo.
- Nas ligas L11, L12, L15, L16 e L17, o teor de Cério foi estimado por não ser possível a sua determinação com o espectrómetro da empresa Alberto da Silva Barbosa & Filhos Lda.

10.2 – Análise dos resultados da 1.ª série de ligas elaboradas para produção de lingote

Os resultados obtidos são comparados com os valores das ligas actuais (tabela 4).

As ligas à base de Sb e Ce (L15, L16 e L17) apresentam características mecânicas (tensão de ruptura e alongamento) muitíssimo baixas.

A liga de baixo teor de Si ($\pm 2\%$) e Ce ($\pm 0,4\%$) apresentam elevados valores de alongamento.

De todas as ligas produzidas, nenhuma satisfaz do ponto de vista de propriedades mecânicas e de aptidão ao polimento.

Para obter uma boa estrutura e uma boa aptidão ao polimento é essencial que a superfície do lingote solidifique de forma uniforme, sem aparecimento de rechupes, poros ou segregações. Infelizmente, nesta 1ª série de ligas não se conseguiu obter tais resultados.

A figura 48 apresenta fotografias relativas a cada um dos defeitos anteriormente descritos. Por sua vez, a figura 49 apresenta a fotografia de um lingote com uma superfície isenta de defeitos.

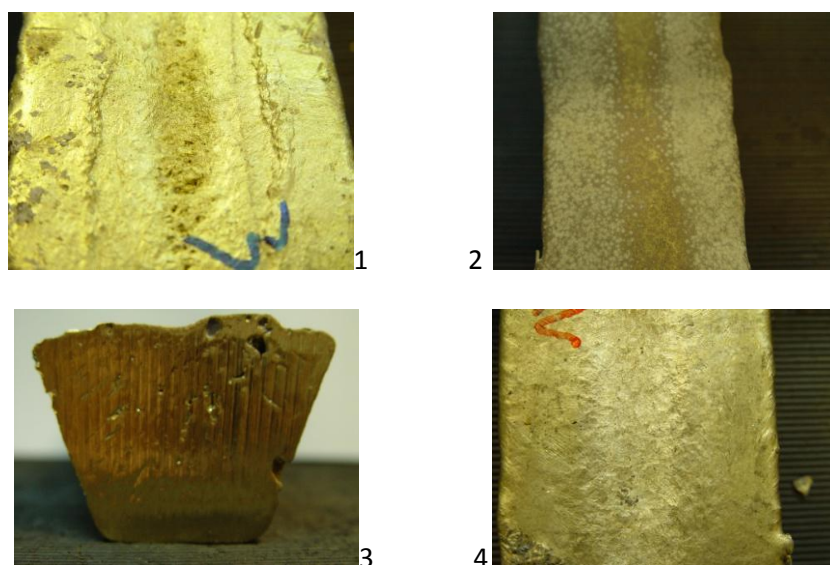


Fig. 48 – Lingotes cuja superfície apresenta rechupes (1), segregações (2), poros (3) e uma morfologia do tipo escamada (4)



Fig. 49 – Lingote com superfície uniforme após solidificação

10.3 – 2ª Série de ligas produzidas

Nesta 2ª série produziram-se ligas com baixo teor em Silício, tendo-se igualmente dado início ao estudo da incorporação de Bismuto em substituição do Chumbo.

As tabelas 17 e 18 apresentam, respectivamente, os quadros resumo da composição química e das características técnicas da 2.ª série de ligas produzidas.

Tabela 17 – Composição química da 2.ª série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de Chumbo

Lingote de latão com baixo teor de Chumbo													
Liga	%Cu	%Zn	%Al	%Pb	%Bi	%Si	%Sn	%Fe	%Ni	% Outros (As + Ti + Se + Bi + Cd +...)	B (ppm)	%Tf (Cu)	Tempª vazam. (°C)
L18	60,11	38,90	0,543	0,161	<0,001	0,204	0,009	0,05	<0,01	<0,02	7,2	57,0	1060
L19	60,63	38,46	0,510	0,215	<0,001	0,143	0,006	0,01	<0,01	<0,02	7,0	57,9	1068
L20	61,45	37,70	0,608	0,007	<0,001	0,194	0,007	0,01	<0,04	<0,02	6,7	58,2	1082
L21	61,74	37,20	0,519	0,002	0,416	0,002	0,002	0,10	<0,04	<0,02	6,5	60,0	1062

Tabela 18 – Características técnicas da 2.ª série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de Chumbo

Lingote de latão, com baixo teor de Chumbo					
Liga	Polimento industrial	Análise microestrutural	Dureza - HRB _T	Propriedades mecânicas	
				Rm (N/mm ²)	A (%)
L18	Bom	Estrutura heterogénea, com grãos aciculares	59	542,5	32,2
L19	Bom	Estrutura heterogénea, com grãos aciculares	60	482,2	31,2
L20	Bom	Estrutura heterogénea, com grãos aciculares	69	501,9	43,1
L21	Bom	Idêntica à da liga LASB2-G	48	375,6	53,2

10.4 – Análise dos resultados da 2.ª série de ligas elaboradas para produção de lingote

Os resultados obtidos são comparados com os valores das ligas actuais (tabela 4)

De todas as ligas produzidas nesta 2ª série, a única que satisfaz no conjunto de aptidão ao polimento, microestrutura, repartição de fases e propriedades mecânicas é a liga L21.

De referir que esta etapa dos trabalhos coincidiu com a das experiências efectuadas para a elaboração de ligas para produção de barra de latão, com adição de Bismuto (com teores na ordem dos 0,4-0,6%), pelo que se decidiu usar os mesmos teores de Bismuto, sem qualquer adição de Silício.

Ainda com base nos bons resultados obtidos com a liga L21, decidiu-se efectuar um ensaio à escala industrial recorrendo ao forno de indução de cadinho de 4,5 ton de capacidade usualmente utilizado na produção das actuais ligas contendo Chumbo.

Por sua vez, foram mantidas as condições de vazamento das actuais ligas (fig. 6).

10.5 – 3ª Série de ligas produzidas

As tabelas 19 e 20 apresentam, respectivamente, os quadros resumo da composição química e das características técnicas da 3.ª série de ligas produzidas, assim como de duas cargas tipo, das actuais ligas contendo Chumbo para produção de lingote (LASB2-G, LASB3-DZR).

Foi efectuado o teste de fluidez para todas as ligas. Nas ligas LASB2-G e LASB3-DZR, o teste de fluidez foi efectuado durante a produção normal destas ligas.

Procedeu-se ainda à realização do teste de resistência à deszincificação e à recolha de limalhas durante a preparação (maquinação) do provete para efectuar o ensaio de tracção.

Tabela 19 – Composição química da 3.ª série de ligas com vista à produção de lingote de latão de baixo teor de Chumbo

Lingote de Latão com baixo teor de Chumbo													
Liga	%Cu	%Zn	%Al	%Pb	%Bi	%Si	%Sn	%Fe	%Ni	% Outros Ti + Se+ Cd+ Te...	%As	%Tf (Cu)	Tempª vazam. (°C)
LASB2-G carga 309	59,64	37,97	0,545	1,54	<0,001	0,003	0,151	0,086	0,030	<0,02	0,003	57,6	1080
LASB3- DZR carga 301	62,26	35,16	0,545	1,60	<0,001	0,002	0,173	0,116	0,040	<0,02	0,104	60,2	1092
L22	60,35	38,41	0,603	0,162	0,347	0,002	0,043	0,06	0,003	<0,02	0,005	58,6	1085
L23	59,30	39,22	0,584	0,155	0,614	0,002	0,041	0,059	0,003	<0,02	0,005	57,6	1079
L24	59,64	38,82	0,579	0,105	0,619	0,002	0,041	0,061	0,003	<0,02	0,108	58,0	1084
L25	59,83	38,88	0,585	0,113	0,397	0,002	0,032	0,046	0,003	<0,02	0,091	58,2	1084
L26	62,57	35,85	0,581	0,154	0,619	0,002	0,041	0,056	0,003	<0,02	0,101	60,9	1100
L27	62,07	36,60	0,560	0,135	0,434	0,002	0,033	0,047	0,003	<0,02	0,093	60,4	1085

Tabela 20 – Características técnicas da 3.ª série de ligas com vista à produção de lingote de latão baixo teor de Chumbo

Lingote de latão com baixo teor de Chumbo									
Liga	Polimento industrial	Análise microestrutural	Dureza - HRB _T	Ensaio mecânicos		Prof. deszincificação (μm)		Tipo de limalha	Teste fluidez (%)
				Rm (N/mm ²)	A (%)	Trinca * ¹	Trinca + área vermelha * ²		
LASB2-G carga 309	Bom	ver Fig. 50	50-52	415,4	36,4	50	500	I	30
LASB3-DZR carga 301	Bom	ver Fig. 51	41-43	379,1	49,4	<50	<50	I	28
L22	Bom	Grão mais acicular que o da LASB2-G – (ver Fig. 52)	53-55	404,6	32,2	50	200	I, mas mais graúda que a da L23	31
L23	Bom	Grão mais acicular que o da LASB2-G- (ver Fig. 53)	54-55	382,0	25,4	50	450	I	28
L24	Bom	Grão mais acicular que o da LASB2-G	55-57	402,4	31,7	50	450	I	28
L25	Bom	Grão mais acicular que o da LASB2-G	55-56	404,9	30,4	<50	450	I	26
L26	Bom	Grão mais acicular que o da LASB3-DZR (ver Fig. 54)	40-42	379,7	52,6	<50	<50	I	26
L27	Bom	Grão mais acicular que o da LASB3-DZR (ver Fig. 55)	44-46	363,8	49,8	<50	<50	I, mas mais graúda que a da L26	28

*1 – zona de ataque mais pronunciado (área com 200 μm de profundidade; ver figura 12)

*2 – zona de ataque menos pronunciado (área com 600 μm de profundidade; ver figura 12)

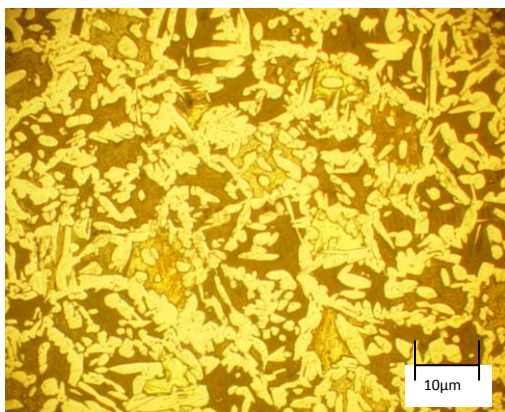


Fig.50 – Microestrutura da liga LASB2-G; Ampliação 100x

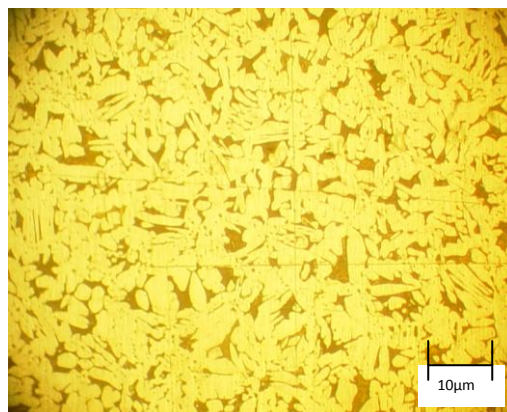


Fig.51 – Microestrutura da liga LASB3-DZR; Ampliação 100x

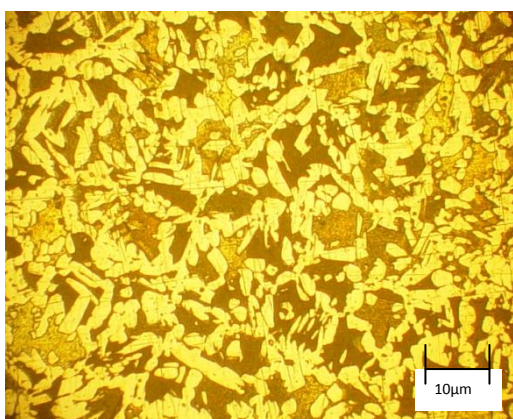


Fig.52– Microestrutura da liga L22; Ampliação 100x

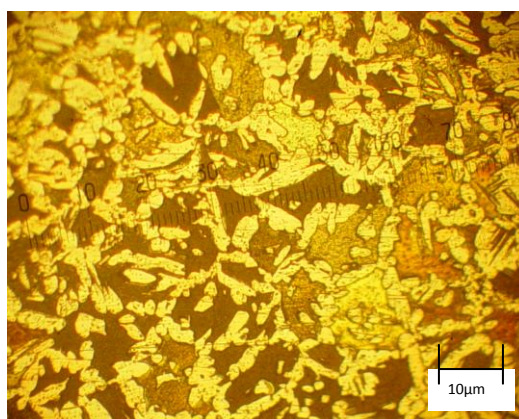


Fig.53 – Microestrutura da liga L23; Ampliação 100x



Fig.54 – Microestrutura da liga L26; Ampliação 100x

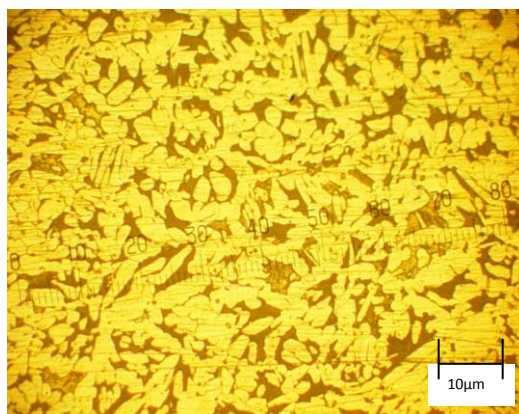


Fig.55 – Microestrutura da liga L27; Ampliação 100x

10.6 – Análise dos resultados da 3ª série e conclusões relativas ao desenvolvimento de uma liga de latão de baixo teor de Chumbo para produção de lingote

Os resultados obtidos são comparados com os valores das ligas actuais (tabela 4):

- Todas as ligas produzidas apresentam aptidão ao polimento, estrutura refinada, homogénea e propriedades mecânicas semelhantes às actuais ligas com Chumbo.
- Ao comparar as características técnicas da liga L24 com as da L26 e da liga L25 com as da L27, conclui-se que a adição de Arsénio não é suficiente, por si só, para garantir uma boa resistência à deszincificação, sendo necessário um teor mínimo de 62% de Cobre para assegurar tal resistência.
- As ligas L24 e L25, embora possuam aproximadamente o mesmo teor de Arsénio que as ligas L26 e L27, apresentam profundidades de deszincificação superiores a 100 µm.
- Face ao exposto no ponto anterior, as ligas L24 e L25 não são adequadas para substituir a actual liga LASB3-DZR, pelo que ficam desde já excluídas.
- As ligas L22 e L23 apresentam boas características técnicas, apresentando-se como alternativas adequadas à actual liga LASB2-G. De referir ainda que a liga L23 apresenta uma limalha de tamanho inferior, o que constitui uma vantagem em termos de maquinabilidade. Assim, optou-se por considerar a liga L23 como a alternativa mais adequada da actual liga LASB2-G. Esta liga foi denominada ECOASB2 e a sua ficha técnica pode ser consultada no site da empresa (www.asb.pt).
- As ligas L26 e L27 apresentam boas características técnicas, potenciando-se como substitutas da actual liga LASB3-DZR; tendo por base as mesmas razões referidas no ponto anterior, optou-se por considerar a liga L26 como a melhor substituta para a actual liga LASB3-DZR. Esta liga foi denominada ECOASB3 e a sua ficha técnica pode ser consultada no site da empresa (www.asb.pt).
- Comparando as microestruturas das ligas produzidas e das actuais (Figs. 50 a 55), verifica-se que ambas apresentam boa estrutura (boa distribuição de fases). No entanto, as ligas contendo Bismuto (em substituição do Chumbo) apresentam um grão mais acicular. De salientar que na elaboração das novas ligas se utilizou o mesmo refinador do tamanho de grão que na produção das ligas de latão contendo Chumbo.

Na produção de todas as novas ligas foi utilizado o Fósforo como desoxigenante do banho e o Boro como refinador do tamanho de grão. Por questões de confidencialidade, visto constituir *know-how* da empresa, não poderão ser divulgados os teores desses dois elementos cujos efeitos nas características técnicas das ligas são muito significativos, nomeadamente no que se refere à aptidão ao polimento. Foram ainda adicionadas Terras Raras a fim de potenciar o efeito do Bismuto, incrementando assim a maquinabilidade das ligas; contudo, os teores e designação das mesmas não poderão ser divulgados pelas razões apresentadas anteriormente.

Na figura 56 são apresentados gráficos comparativos das propriedades mecânicas das ligas actuais e das ligas L23 e L26.

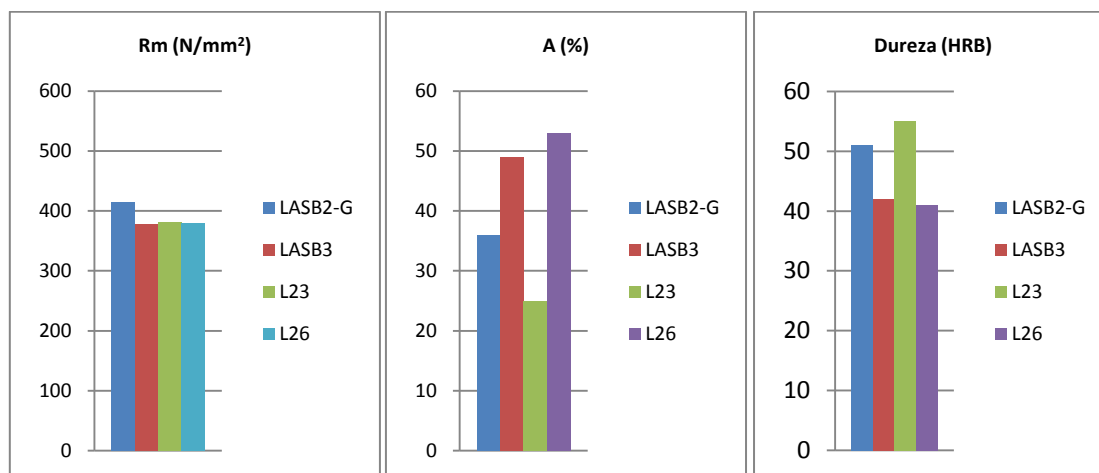


Fig. 56 - Gráficos comparativos das propriedades mecânicas das ligas actuais e das ligas L23 e L26.

A análise comparativa dos resultados obtidos permite chegar à conclusão que as ligas L23 e L26 apresentam propriedades mecânicas muito idênticas às das actuais ligas produzidas (ver Tabela 4).

11 - Procedimento experimental utilizado na análise metalográfica quantitativa e no estudo da repartição do Bismuto pelos microconstituintes

A realização da análise metalográfica quantitativa teve por objectivo a determinação da proporção das fases presentes na microestrutura de cada amostra. Por outro lado, recorreu-se à microsonda electrónica de varrimento (EPMA) do LNEG a fim de desenvolver o estudo da repartição do Bismuto pelos microconstituintes. Para a realização destes trabalhos foi adoptado o procedimento apresentado na Fig. 57.

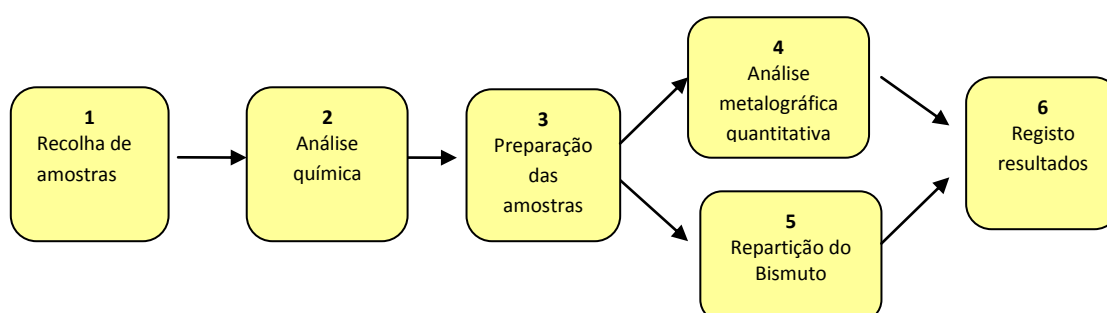


Fig. 57 – Esquema do procedimento experimental utilizado na análise metalográfica quantitativa e no estudo da repartição do Bismuto pelos microconstituintes

Foram recolhidas 8 amostras representativas (uma por carga) da nova liga com Bismuto para a produção de lingote (L23) e 2 amostras da liga já comercializada LASB2-G (Tabela 21).

Desenvolvimento de ligas de latão, de baixo teor em Chumbo

Todas as amostras foram recolhidas na mesma zona dos diferentes lingotes (ver Fig. 58) de modo a garantir, tanto quanto possível, a reprodutibilidade das mesmas condições de solidificação. A composição química das diferentes amostras foi determinada por espectrometria de emissão. Procedeu-se ainda à realização de ensaios de dureza.

As amostras recolhidas foram preparadas segundo os métodos descritos nos anexos 3 e 4.

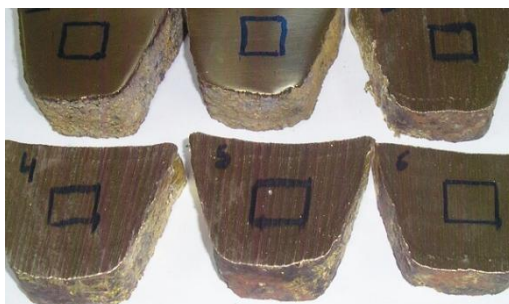


Fig. 58 – Posicionamento da zona de recolha das amostras em cada lingote

Tabela 21 – Composição química e dureza das amostras utilizadas na análise metalográfica quantitativa

Lingote de latão de baixo teor em Chumbo, contendo Bismuto											
	%Cu	%Zn	%Al	%Pb	%Bi	%Si	%Sn	%Fe	%Ni	%As	Dureza HRB _T
Min (%)	59,50	Diferença	0,40	—	0,55	—	—	—	—	—	
Max (%)	60,50	Diferença	0,65	0,20	0,70	0,010	0,200	0,200	0,200	0,050	
Amostra 1	59,67	38,95	0,604	0,035	0,595	0,003	0,017	0,085	0,025	0,003	62
Amostra 2	59,69	38,81	0,579	0,115	0,610	0,035	0,051	0,073	0,022	0,005	63
Amostra 3	60,16	38,38	0,596	0,095	0,593	0,046	0,029	0,077	0,009	0,004	62
Amostra 4	59,92	38,48	0,608	0,108	0,594	0,012	0,141	0,080	0,025	0,004	61
Amostra 5	59,33	39,08	0,672	0,083	0,650	0,011	0,065	0,063	0,021	0,005	63
Amostra 6	59,96	38,47	0,586	0,124	0,584	0,037	0,126	0,085	0,011	0,003	62
Amostra 7	60,14	38,38	0,589	0,103	0,567	0,013	0,114	0,053	0,013	0,003	62
Amostra 8	60,00	38,53	0,597	0,113	0,581	0,015	0,073	0,058	0,009	0,003	64
Lingote de latão com Chumbo, sem Bismuto											
	%Cu	%Zn	%Al	%Pb	%Bi	%Si	%Sn	%Fe	%Ni	%As	Dureza HRB _T
Min (%)	59,50	Diferença	0,40	1,20	—	—	—	—	—	—	
Max (%)	60,50	Diferença	0,65	1,70	0,050	0,010	0,200	0,200	0,200	0,050	
Amostra 9	59,64	37,97	0,545	1,54	0,001	0,003	0,151	0,086	0,030	0,003	51
Amostra 10	59,58	38,15	0,545	1,45	0,013	0,004	0,107	0,096	0,026	0,006	53

A análise metalográfica quantitativa foi desenvolvida com recurso ao software “PAQUI” existente no Laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da FEUP.

Esta análise quantitativa consistiu na aquisição, tratamento e processamento de 45 imagens da microestrutura de cada amostra (por cada imagem, é visualizado um histograma bicolor que representa a % de distribuição de fases, tal como exemplificado na Fig. 59).

No final, são recolhidos dados quantitativos relativamente à repartição de fases que se encontram resumidos na Tabela 22.

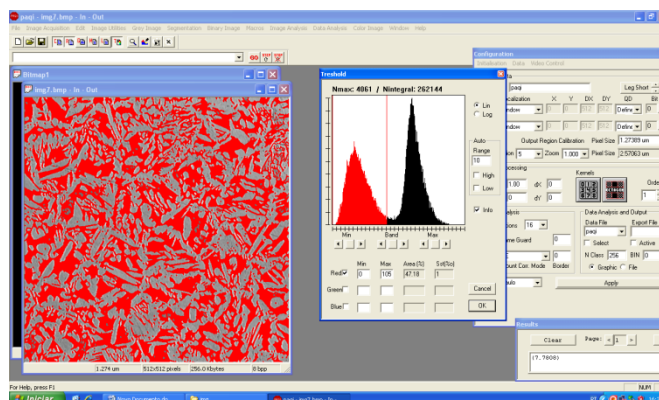


Fig. 59 – Imagem da microestrutura de uma das amostras e respectivo histograma

11.1 – Resultados da análise metalográfica quantitativa

Tabela 22 – Resultados da repartição de fases na microestrutura

Lingote de latão de baixo teor em Chumbo, contendo Bismuto						
	A	B	C	D	E	Identificação da liga
	% fase β				% fase α (1-A)	ECOASB2
	Média	Máx.	Min.	Desvio padrão		
Amostra 1	55,28	58,89	47,80	2,33	44,72	
Amostra 2	56,28	58,61	52,65	1,28	43,72	
Amostra 3	55,38	59,36	49,54	2,15	44,62	
Amostra 4	52,17	54,60	48,33	1,39	47,83	
Amostra 5	53,31	56,78	50,91	1,44	46,69	
Amostra 6	57,03	61,86	50,66	2,24	42,97	
Amostra 7	56,10	60,76	53,34	1,66	43,90	
Amostra 8	53,37	56,54	49,26	1,85	46,63	
Lingote de latão com Chumbo, sem Bismuto						
	A	B	C	D	E	Identificação da liga
	% fase β				% fase α (1-A)	LASB2
	Média	Máx.	Min.	Desvio padrão		
Amostra 9	42,89	47,26	32,78	4,21	57,11	
Amostra 10	46,69	54,82	31,00	4,37	53,31	

11.2 - Discussão dos resultados da análise quantitativa

A análise microestrutural das diferentes amostras (Figs. 50 a 55) permite aquilatar do elevado grau de homogeneização das ligas produzidas, constatando-se ainda que, nas ligas de latão com Chumbo, a fase predominante é a fase α e, nas ligas de latão de baixo teor de Chumbo e com Bismuto, a fase predominante é a fase β .

Tal como referido no ponto 4.1, a fase α é uma fase dúctil e pouco dura, e a fase β é uma fase mais dura e com maior resistência mecânica. Os resultados das durezas obtidos (Tabela 21) vêm ao encontro do que seria de esperar uma vez que as ligas de latão de baixo teor de Chumbo e com Bismuto apresentam uma dureza mais elevada que a das outras amostras.

11.3 - Repartição do Bismuto pelos microconstituintes

Neste estudo recorreu-se à microsonda electrónica de varrimento, modelo JEOL JXA 8500F, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (ex-INETI), pólo de S. Mamede de Infesta.

Procedeu-se ao estudo das amostras 4 e 6 da liga de latão com baixo teor de Chumbo e com Bismuto, e das amostras 9 e 10 da liga de latão contendo Chumbo. Para além do Bismuto, procedeu-se ainda ao mapeamento do Zinco e do Cobre. Os mapas de distribuição dos referidos elementos são apresentados nas figuras 60 a 63.

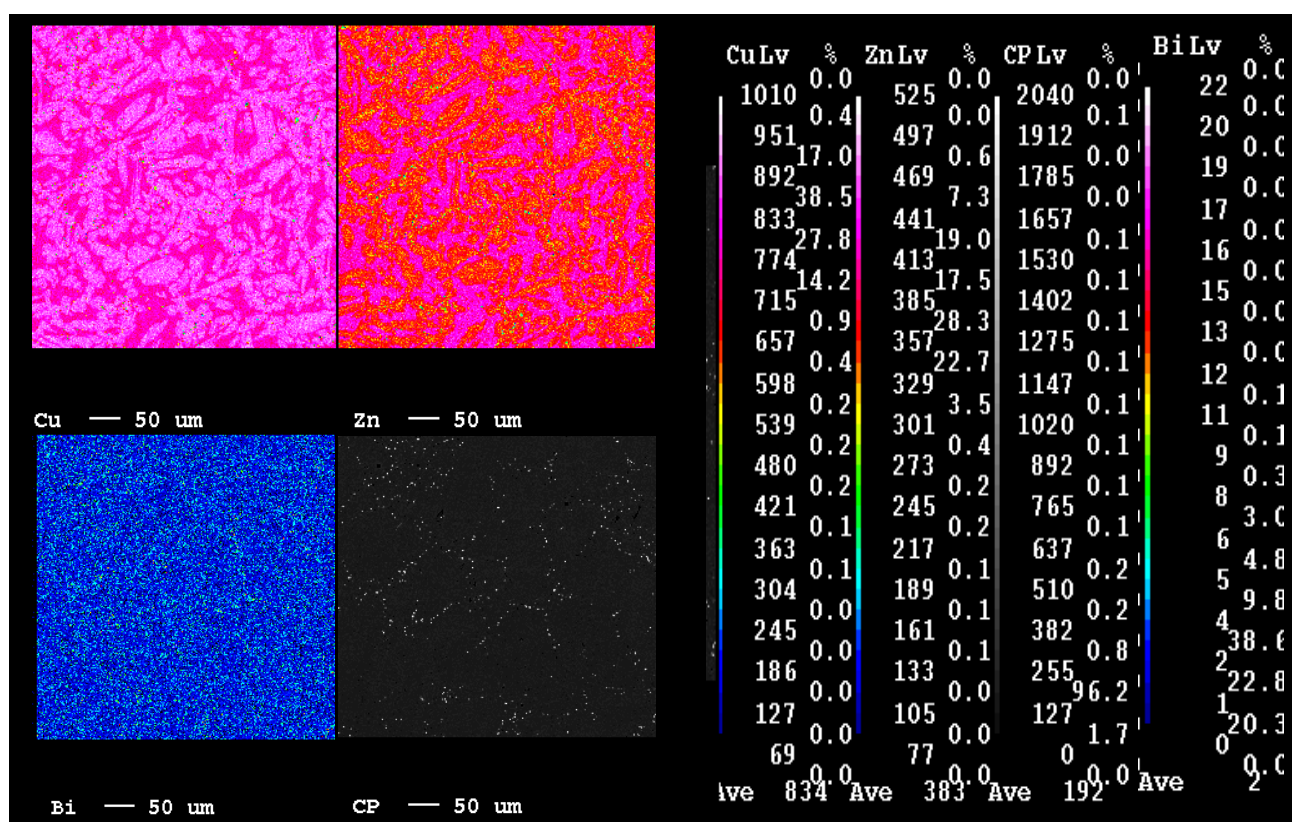


Fig. 60 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões rectrodifundidos (CP) da amostra 4

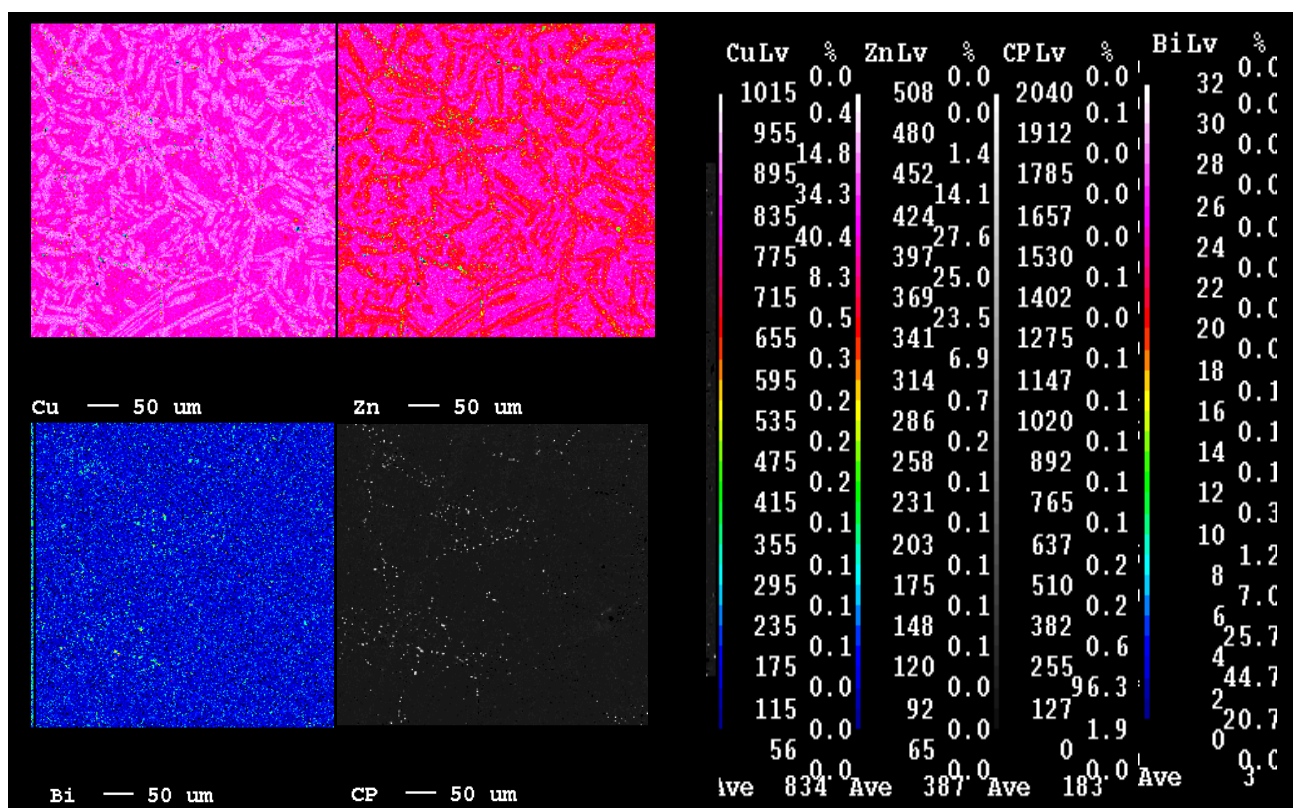


Fig. 61 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões rectrodifundidos (CP) da amostra 6

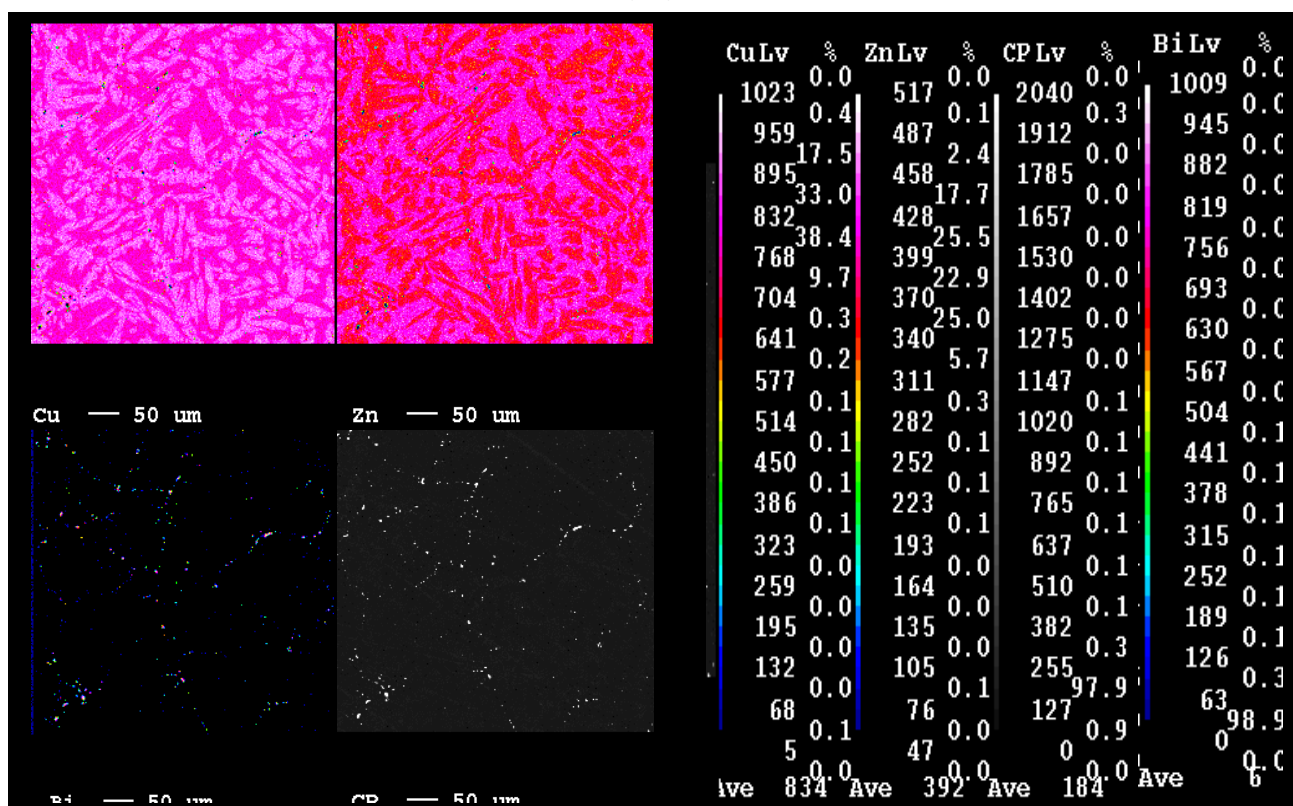


Fig. 62 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões rectrodifundidos (CP) da amostra 9

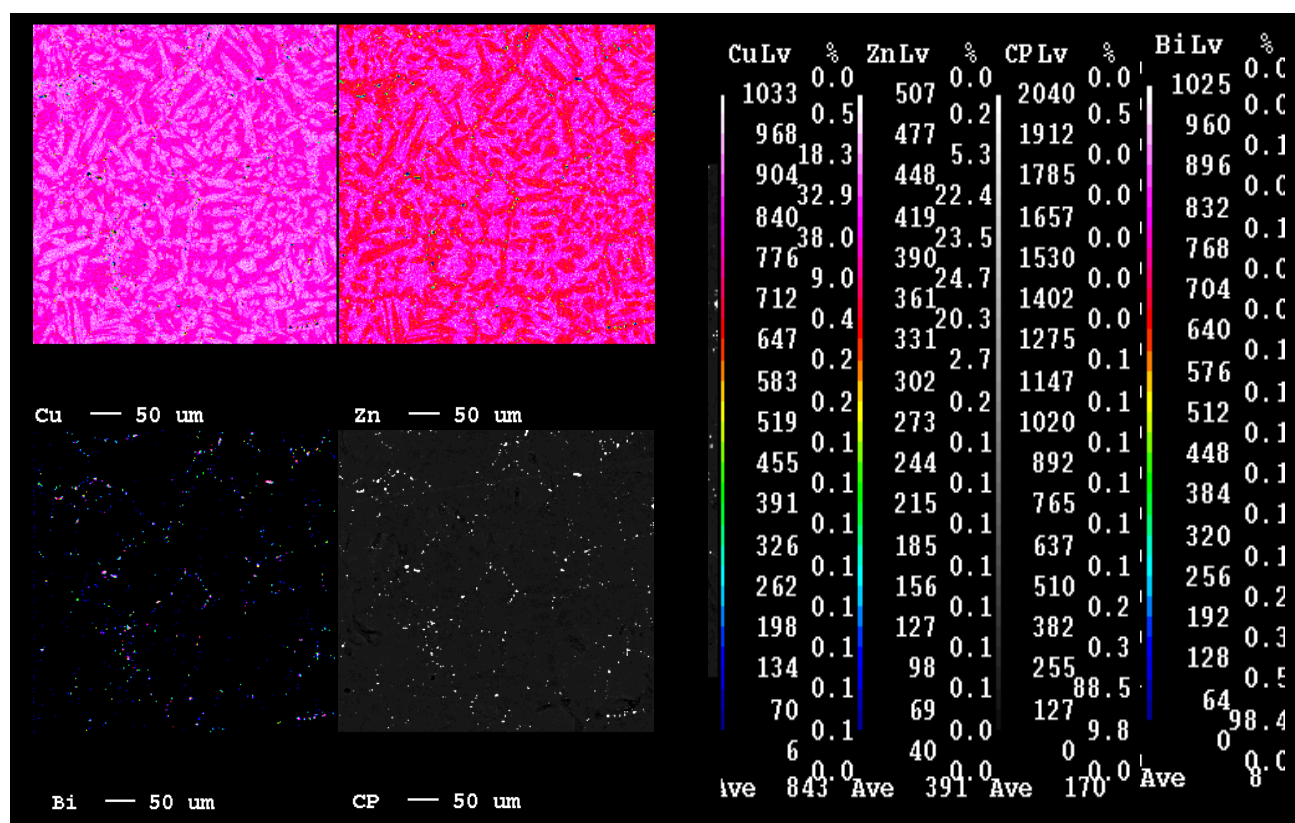


Fig. 63 - Mapas de distribuição dos elementos Bi, Cu e Zn e imagem de electrões rectrodifundidos (CP) da amostra 10

Da análise das figuras, é possível concluir o seguinte:

- Nas amostras 4 e 6 (ligas de baixo teor em Chumbo), o Bismuto está distribuído de forma uniforme ao longo de toda a matriz, muito embora, tendo por base a imagem de electrões rectrodifundidos (CP), se possa admitir uma maior concentração, se bem que mínima, ao longo das juntas de grão.
- Os mapas relativos ao Cobre e ao Zinco parecem ir ao encontro dos resultados obtidos na análise quantitativa de imagem através do software “PAQUI”.

12 - Conclusões Finais

As principais conclusões a retirar do trabalho desenvolvido são as seguintes:

1. O objectivo proposto foi atingido, e foram desenvolvidas três ligas de latão de baixo teor em Chumbo:
 - a. A liga ECOASB20 afigura-se como uma liga com boa aptidão para a estampagem e maquinagem, adequada para substituir as duas ligas tradicionais com Chumbo, uma para estampar e outra para tornear, que a empresa vem comercializando.
 - b. A liga ECOASB2 apresenta boas características técnicas, afigurando-se como alternativa adequada à actual liga LASB2-G.
 - c. A liga ECOASB3 apresenta boas características técnicas, afigurando-se como alternativa adequada à actual liga LASB3-G.
2. Em termos de maquinabilidade das ligas de latão, recorreu-se ao Bismuto para substituir o Chumbo, situando-se o seu teor na gama 0,6-0,7%. Foram ainda adicionadas Terras Raras para potenciar o efeito do Bismuto, incrementando assim a maquinabilidade das ligas desenvolvidas.
3. Durante o desenvolvimento da liga ECOASB3, foi possível constatar que a adição de Arsénio não é suficiente, por si só, para garantir uma boa resistência à deszincificação, sendo necessário um teor mínimo de 62% de Cobre para assegurar essa resistência.
4. A análise microestrutural das amostras da liga ECOASB2 permite aquilatar do elevado grau de homogeneização das ligas produzidas. Constata-se ainda que, nas ligas de latão com Chumbo, a fase predominante é a fase α e, nas ligas de latão de baixo teor de Chumbo e com Bismuto, a fase predominante é a fase β .
5. As primeiras conclusões apontam para o Bismuto se apresentar repartido de forma uniforme ao longo de toda a matriz, muito embora se possa admitir uma maior concentração, se bem que mínima, ao longo das juntas de grão; contudo, será necessário um estudo mais aprofundado sobre um maior número de amostras para validar tal constatação.

13 - Referências Bibliográficas

- [1] – C. Vilarinho, J.P. Davim, D. Soares, F. Castro, J. Barbosa; “Influence of the chemical composition on the machinability of brasses”; Journal of Materials Processing Technology 170(2005) 441-447; Elsevier 2005.
- [2] – Gabriel Sousa Castro, “Estudo e otimização da liga de latão utilizada na Grohe Portugal, S.A.”; Tese de Mestrado Integrado Engenharia Metalúrgica e de Materiais; FEUP 2008.
- [3] – http://www.productionmachining.com/articles/adjusting_to_unlead.aspx, acessado em Outubro 2009.
- [4] - Seung-Jae, Yoon-Seok Choi, Jung-Gu Kim, Han-Jun Oh, Choong-Soo Chi; “Stress corrosion cracking properties of environmentally friendly unleaded brasses containing bismuth in Mattsson’s solution”, Journal of Materials Science and Engineering A345 (2003) 207-214; Elsevier 2003.
- [5] – www.cooper.org; Non-Leaded Red Brass and Yellow Brass Casting Alloys (EnviroBrass® - SeBiLOY®); Copper Development Association Inc, acessado em Outubro 2009.
- [6] – <http://www.epa.gov/OGWDW/Sdwa/>, Environmental Protection Agency, acessado em Novembro 2009.
- [7] – www.copper-brass.gr.jp/english/shindoulin/Pbless.html, Japan Copper and Brass association, acessado em Outubro 2009.
- [8] – <http://ec.europa.eu/environmental/water>, EUROPEAN COMMISSION, acessado em Outubro de 2010.
- [9] – Deutsche Norm DIN 50930-6, “Corrosion behavior of metallic materials in contact with water part 6: Effects on drinking water quality”, August 2001.
- [10] – Zhu Quanli, Wu Weidong, Liu Kaizou, Chen Gengchun & Chen Weiping; “Study on microstructure and properties of brass containing Sb and Mg”; Science in China Series E: Technological Sciences, vol. 52 (2172-2174); August 2009.
- [11] – Asarco Incorporated; “Machinable Lead-free Copper alloys and additive and method for making the alloys”; International patent classification: C22C 9/04, International publication number: WO 97/00977; World Intellectual Property Organization, 9 January 1997.

- [12] – National Bronze & Metals, Inc. www.nbmlleadfreebrass.com, acessado em Outubro 2009.
- [13] – Ningbo Powerway Group Co., LTD; “Lead-free free cutting Brass”; International patent classification: C22C 9/04, International publication number: WO/2005/071123; World Intellectual Property Organization, 04.08.2005
- [14] – Xiao Lai-rong, Shu Xue-Peng, Yi Dan-Qing, Zhang Xi-Min, Qin Jing-Li e Hu Jia-Rui; “Microstructure and properties of unleaded free-cutting brass containing stibium”; Transactions of Nonferrous Metals Society of China 17(2007)s1055-s1059; Science Press 2007.
- [15] – Katsuyoshi Kondoh, Hisashi Imai, Yoshiharu Kosaka, Akimichi Kojima, Junko Umeda; “Machinable Cu-40%Zn composites containing Graphite Particles by powder metallurgy process”; Journal of Metallurgy, volume 2009; Hindawi Publishing Corporation, 2009.
- [16] – www.nkcorp.co.uk/product_e/lead-less.html , Nakayama-Corporation; acessado em Outubro 2009.
- [17] – Wieland Werke AG, www.wieland.de, acessado em Outubro 2009.
- [18] – Chase Brass and Copper Company. LCC, www.chasebrass.com, acessado em Outubro 2009.
- [19] – P.K. Rohatgi, D. Nath, J.K. Kim, A.N. Agrawal; “Corrosion and dealloying of cast lead-free copper alloy-graphite composites”; Journal of Corrosion Science 42(2000) 1553-1571; ELSEVIER 2000.
- [20] – P.K. Rohatgi; “Development of lead-free copper alloy-graphite casting”; Annual Technical Progress Report, University of Wisconsin – Milwaukee, February 1996
- [21] – Norma EN ISO 6509, “Corrosion of metals and alloys – Determination of dezincification resistance of brass”, February 1995.
- [22] – European Standard EN 12165: 1998, “Copper and Copper alloys – Wrought and unwrought forging stock, April 1998.
- [23] – European Standard EN 12164: 1998 + Amendment A1: 2000, “Copper and Copper alloys – Rod for free machining purposes”, September 2000.
- [24] - “Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries”, http://ftp.jrc.es/eippcb/doc/nfm_2d_07_2009_public.pdf; acessado em Novembro de 2009.

-
- [25] – Induga Industrieöfen und Giesserei-Anlagen Gmbh & Co, www.indug.com, acedido em Novembro 2009.
- [26] – Vincenzo Loconsolo, Luca Nobili; *“Manuale degli Otonni”*; prima edizione; Consedit sas; - maggio 1995;
- [27] – Metals Handbook – volume 8; “Metallography, structures and phase diagrams”, 8th edition, American Society for Metals, 1973.
- [28] - American Foundrymen`s Society, Casting Copper-Base Alloys, 1984.
- [29] – William F. Smith; Principles of Materials Science and Engineering; McGraw-Hill International Editions - second edition, 1990.
- [30] – Fernando Portela de Castro, José Manuel Junqueira; *“Latões para Fundição”*; coleção cadernos de Metalurgia Nº3; CETEM – Centro Técnico de Engenharia Mecânica e de Materiais Lda; 1996
- [31] – N. B. Pugacheva, Structure of commercial $\alpha+\beta$ brasses, Metal Science and Heat Treatment, vol. 49, nº 1-2, 2007.
- [32] – M. Sadayappan, J.P. Thomson, M. Elboujdaini, G. Ping Gu and M. Sahoo; “Grain Refinement of Permanent Mold Cast Copper Alloys”; Final Report – MTL Report 2004-6 (TR-R); US Department Energy - Materials Technology Laboratory; April 2004;
- [33] – Konrad J. A. Kundig; Copper: it`s Trade, Manufacture, Use, and Environmental Status; International Copper Association, ASM International, 1999.
- [34] – Allison Butts; Copper: The Science and Technology of Metal and it`s alloys and Compounds; Reinhall Publishing Corporation; New York 1954.
- [35] – R. Karpagavalli, R. Balasubramaniam; “Influence of Arsenic, Antimony and Phosphorous on the microstructure and corrosion behavior of brasses”; J Mater Sci 42:4954-4958; Springer Science+Business Media, 2007.
- [36] – E. Brandl, R. Malke, T. Beck, A. Wanner, T. Hack; “Stress corrosion cracking and selective corrosion of copper-zinc alloys for the drinking water installation”; Materials and Corrosion 2009, 60, nº4; Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [37] – American Foundrymen`s Society, Copper-Base Alloys Foundry Practice; 1965.
-

- [38] - A. La Fontaine, V.J. Keast; "Compositional distributions in classical and lead-free brasses", *Journal of Materials Characterization* 57 (2006) 424-429; Elsevier 2006.
- [39] – Metals Handbook- vol2, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals", Ninth Edition, 1979.
- [40] - C. Vilarinho, D. Soares, F. Castro; "Influence of the chemical composition and volume fraction of phases on the dezincification resistance of brasses"; *METAL* 2001, 15-17.5.2001, Ostrava, Czech Republic.
- [41] – T. Chandra, J. J. Jonas, D. M. R. Taplin; "The mechanical behavior of cerium-modified alpha-beta brass at high temperatures; *Journal of Materials Science* 11 (1976) 1843-1848, 1976
- [42] – U. K. Duisemaliev, A.A. Presnyakov, K.S. Saparov, N. A. Kozhamberdin; "The solubility of cerium in copper and its effect on the properties of brasses"; Kazakh Polytechnical Institute, 1970.
- [43] – Léon Guillet and Albert Portevin; *An introduction to the Study of Metallography and Macrography*; G. Bell and Sons, Ltd. 1922.
- [44] – R. Karpagavalli, R. Balasubramaniam; "Development of novel brasses to resist dezincification"; *Journal of Corrosion Science* 49(2007) 963-979; Elsevier 2007.
- [45] - Metals Handbook – volume 13; "Corrosion", 8th edition, American Society for Metals, 1973.
- [46] – D.D Davies, Dip.App.Chem., MIM; "A Note on the dezincification of brass and the inhibiting effect of elemental additions"; Copper Development Association Inc. , July 1993.
- [47] – Norma EN ISO 2624, Copper and Copper Alloys – Estimation of average grain size, May 1995.
- [48] – E 618-07, Standard Test Method for Evaluating Machining Performance of Ferrous Metals Using an Automatic Screw/Bar Machine; ASTM International, 2007.
- [49] – J. R. Davis, ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys, ASM International, December 2001.

14 – Anexos

Anexo 1

Procedimento laboratorial do Ensaio Metalográfico

O procedimento a seguir é o seguinte:

1. Corte de amostras;
2. Rectificação da superfície a analisar em torno mecânico;
3. Desbaste da superfície metálica, de forma sequencial, com lixas de grão 80, 250, 500, 1200 e 4000, seguido de acabamento com pasta de diamante de 3 μm ;
4. Limpeza da superfície com água destilada e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$);
5. Ataque da superfície com solução alcoólica de Tricloreto de Ferro Hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$);
6. Limpeza da superfície com água destilada e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$);
7. Secagem da superfície com algodão e ar comprimido;
8. Observação ao microscópio óptico (pré-focagem de 100 X), Fig. 26;
9. Registo de dados e/ou impressão de fotografias.

Anexo 2

Procedimento laboratorial do Ensaio de Resistência à Deszincificação ^[26]

O procedimento a seguir é o seguinte:

1. Na amostra, marcar a área a cortar na secção transversal - dimensões de 11 mm x 11 mm;
2. Identificar a amostra com caneta vibratória ou tinta indelével;
3. Cortar as amostras;
4. Ajustar a área para 100 mm² (10 mm x 10 mm) com lixa de grão 80;
5. Colocar as amostras nas resinas (50 ml de resina para 10 ml de endurecedor, agitar bem até se obter baixa viscosidade, vaziar para as formas que contêm as amostras com a identificação voltada para cima; a camada de resina deverá ultrapassar em pelo menos 15 mm o topo da amostra metálica;
6. Cura das resinas durante 6 a 8 h à temperatura ambiente;
7. Desmoldar as amostras;
8. Desbastar a superfície metálica, de forma sequencial, com lixas de grão 80, 250 e 500;
9. Ligar a estufa e estabilizar a temperatura nos 75°C ± 3°C;
10. Colocar as amostras num goblé de boca larga de 300 a 500 ml;
11. Preparar a solução de Cloreto de Cobre Dihidratado (solução recente) - 12,7 g de Cloreto de Cobre Dihidratado para um litro de água (medida com proveta);
12. Medir 250 ml (proveta) de solução de Cloreto de Cobre Dihidratado (solução recente) e colocá-la no goblé onde se encontra a amostra;
13. Colocar o(s) goblé(s) na estufa. As amostras permanecerão no seu interior durante 24h. Colocar uma etiqueta na estufa com a data e hora de remoção das amostras;
14. Retirar as amostras da estufa e, logo a seguir, da solução (com uma tenaz ou colher de plástico), e passá-las por água;
15. Desbastar as amostras segundo a secção longitudinal, até aparecer a zona metálica, com lixa de grão 80;
16. Desbastar a amostra, de forma sequencial, com lixas de grão 80, 250, 500, 1200 e 4000, e, finalmente, proceder ao seu acabamento com pasta de diamante de 3 µm;
17. Efectuar a leitura, em microscópio óptico e para uma ampliação de 100 X, da maior profundidade (num segmento de ± 5 mm relativamente ao centro da amostra) de corrosão recorrendo para tal ao retículo graduado colocado na ocular - menor divisão 10 µm;
18. Registrar a leitura;
19. Teste ao ácido: efectuar um orifício no material a analisar com uma broca de 10 mm de diâmetro, limpar o orifício (com ar comprimido) e enchê-lo com a solução de Cloreto de Cobre Dihidratado ácido. Ao fim de 30 s limpar com papel absorvente e visualizar a cor da amostra. Cor preta significa liga resistente à deszincificação; cor vermelha significa liga não resistente à deszincificação. Registrar

Anexo 3

Procedimento laboratorial do Ensaio Laboratorial para Determinação da Distribuição de Fases na Microestrutura

O procedimento a seguir é o seguinte:

1. Corte das amostras;
2. Rectificação da superfície a analisar em torno mecânico;
3. Desbaste da superfície metálica, de forma sequencial, com lixas de grão 80, 250, 500, 1200 e 4000, seguido de acabamento com suspensão aquosa de diamante de 6 e 1 μm ;
4. Limpeza da superfície com água destilada e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$);
5. Ataque da superfície da amostra, inicialmente com uma solução constituída por água oxigenada (1/3) + amoníaco (1/3) + água destilada (1/3), durante 5 segundos e, em seguida, por solução alcoólica de Tricloreto de Ferro Hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) durante 5 segundos;
6. Limpeza da superfície com água destilada e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$);
7. Secagem da superfície com algodão e ar comprimido;
8. Observação ao microscópio óptico com utilização do software “PAQUI” para aquisição e tratamento das imagens obtidas;
9. Registo e/ou impressão de dados e imagens.

Anexo 4

Procedimento do Ensaio Laboratorial para estudo da Distribuição do Bismuto pelos Microconstituintes

O procedimento a seguir é o seguinte:

1. Corte das amostras;
2. Rectificação da superfície e montagem das amostras em resina, tendo o cuidado de manter as faces o mais paralelas possível;
3. Desbaste da superfície metálica, de forma sequencial, com lixas de grão 80, 250, 500, 1200 e 4000, seguido de acabamento com suspensão aquosa de diamante de 6 e 1 μm ;
4. Limpeza da superfície da amostra com água destilada e álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$);
5. Secagem da superfície com algodão e ar comprimido;
6. Observação e análise das amostras na microsonda electrónica;
7. Registo e/ou impressão de dados e imagens.