

U. PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

M 2016



TOPÁZIO

— SILVER STORIES —

ANÁLISE DE DEFEITOS EM CHAPAS DE LATÃO PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DECORATIVA

JOÃO TIAGO MACHADO PINTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM

ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

ORIENTADOR

PROFESSOR DOUTOR MANUEL FERNANDO GONÇALVES VIEIRA

SUPERVISORA

ENG.^a SARA SILVA (TOPÁZIO - 1874)

CANDIDATO	JOÃO TIAGO MACHADO PINTO	Código 200906441
TÍTULO	ANÁLISE DE DEFEITOS EM CHAPAS DE LATÃO PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DECORATIVA	
DATA	26 DE JULHO DE 2016	
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 17:30 h	
JÚRI	Presidente	Prof. ^a Doutora Maria Ascensão Lopes DEMM/FEUP
	Arguente	Prof. Doutor Aníbal Guedes DEM/EEUM
	Orientador	Prof. Doutor Manuel Vieira DEMM/FEUP

Resumo

Esta dissertação surge da necessidade de estudar características microestruturais e mecânicas, e parâmetros de processamentos de chapas de uma liga CuZn37 da empresa Topázio-1874, com o objetivo de identificar e minimizar a probabilidade de ocorrência de não conformidades.

Foram analisadas amostras provenientes de diferentes lotes, com espessuras e estados de fornecimento distintos. A microestrutura foi analisada através de microscopia ótica e o tamanho de grão caracterizado através do *software* LAS. As propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaios de tração e microdureza Vickers. A identificação dos defeitos foi realizada com microscopia eletrônica de varrimento (SEM) e a caracterização química por microanálise por raios-X (EDS). Foram ainda realizadas análises de termografia que permitiram obter gradientes de temperatura em peças sob processamento térmico, como a brasagem e o recozimento.

Foram identificadas diferenças significativas das propriedades mecânicas das chapas de latão o que pode afetar o processamento posterior. Na análise por SEM e EDS identificaram-se defeitos e contaminações na superfície das amostras bem como uma possível volatilização do zinco. Alguns destes defeitos poderão estar associados à dimensão do maçarico com que se opera em processos térmicos, o que provoca uma considerável variação das temperaturas da peça de trabalho.

Palavras-chave

Latão; CuZn37; Microscopia eletrônica de varrimento; Conformação mecânica; Brasagem; Volatilização do zinco; Termografia

Abstract

This work arises from the need to study microstructural and mechanical characteristics, and processing parameters in sheets of CuZn37 alloy from Topázio-1874 Company, in order to identify the causes and minimize the the probability of occurrence of non-conformities.

Samples were analyzed from lots with different thicknesses and providing different states. The microstructure was analyzed by optical microscopy and grain size characterized through LAS software. Mechanical properties were obtained by tensile tests and microhardness Vickers. Defects on the samples were detected by using Scanning Electron Microscope (SEM) and chemical characterization by X-Ray Microanalysis (EDS). Thermographic analysis were performed in order to obtain temperature gradients in parts under thermal processing such as brazing and annealing.

Significant differences were identified in mechanical properties of brass sheets which may affect the subsequent processing. Through SEM and EDS analysis we were able to identify the presence of defects and contaminations on the surface of the sample as well as a possible zinc volatilization. Some of these defects may be associated with the size of the torch that operates in thermal processes, which can lead to considerable variation in temperature of the workpiece.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas.....	x
Agradecimentos	xi
Abreviaturas e acrónimos.....	xii
1. Topázio 1874.....	1
2. Enquadramento do tema.....	2
3. Introdução	3
3.1. Ligas Cu-Zn (Latões)	3
3.2. Microestrutura do Latão.....	5
3.3. Influência dos elementos de liga	6
3.4. CuZn37.....	9
3.5. Repuxamento	10
3.5.1. Repuxamento manual	11
3.5.2. Repuxamento por Corte	12
3.5.3. Repuxamento por tubo.....	13
3.5.4. Influência do aumento de temperatura e efeito do repuxamento nas propriedades mecânicas	14
3.6. Lubrificantes e Lubrificação na conformação mecânica	14
3.7. Brasagem.....	15
3.7.1. Tocha de Brasagem.....	17
3.8. Metais de adição e Fluxos.....	19

3.8.1.	Metal de adição - Ag-Cu-Zn-Sn.....	20
3.9.	Volatilização do Zn através de processos de Brasagem/Soldadura.....	21
3.9.1.	Tocha de Brasagem.....	21
3.10.	Dezincificação	23
4.	Caracterização do processo de produção	24
5.	Materiais e procedimento experimental.....	27
5.1.	Preparação Metalográfica.....	27
5.2.	Microscopia ótica e quantificação do tamanho de grão	28
5.3.	Microdureza Vickers	29
5.4.	Ensaio de Tração	30
5.5.	Microscopia eletrónica de varrimento e Microanálise por raios- X	31
5.6.	Análise de Termografia	32
6.	Análise e discussão de resultados	34
6.1.	Análise de microestruturas através de microscopia ótica....	34
6.2.	Durezas	37
6.3.	Quantificação do tamanho de grão.....	39
6.4.	Ensaio de Tração	41
6.5.	SEM e EDS	45
6.6.	Análise de Termografia	49
7.	Conclusões	52
8.	Sugestões de trabalho futuro.....	54
9.	Bibliografia.....	55

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplos de peças de latão com defeitos existentes na superfície. a) Protótipo de chaleira. b) Aquecedor.	2
Figura 2 - Parte do diagrama de equilíbrio Cu-Zn com indicação das estruturas, tratamentos térmicos e conformação de algumas fases [7].....	4
Figura 3 - Latão α com composição 70-30 [8].	5
Figura 4 - Latão α - β com composição 60-40 [8].	6
Figura 5 - Defeitos comuns em componentes repuxados [19].	10
Figura 6 - Repuxamento manual [20].	12
Figura 7 - Lei sinusoidal na conformação por corte [21].	13
Figura 8 - Processo de brasagem através da tocha de brasagem [24].	18
Figura 9 - Composição e propriedades térmicas de metais de adição usados em operações de brasagem.	19
Figura 10 - Temperatura de ebulição/Sublimação de alguns elementos químicos [33].	22
Figura 11 - Dezincificação de uma liga de latão α - β [36].	23
Figura 12 - Exemplos de defeitos revelados na superfície de uma peça prateada. a) imagem obtida com ampliação. b) imagem obtida sem ampliação.	26
Figura 13 - Exemplo de amostras de latão montadas a frio.	27
Figura 14 - Microscópio Ótico Axiocam MRC5 Zeiss.	29
Figura 15 - Dúrometro - Duramin (Microdureza Vickers).	30
Figura 16 - Máquina de tração Shimadzu UH 1000kNI [38].	31
Figura 17 - - Equipamento de SEM e EDS - FEI Quanta 400 FEG ESEM/EDAX Genesis X4M [39].	32
Figura 18 - Microestrutura da amostra A com um estado de fornecimento G030 obtida através de microscopia ótica.	34

Figura 19 - Microestrutura da amostra b, com um estado de fornecimento G030, obtida por microscopia ótica.	35
Figura 20 - Microestrutura de um latão CuZn37 (α + β) após ataque químico de uma solução de 50 ml de HNO ₃ 65% e água destilada [40].	36
Figura 21 - Microestruturas de um latão CuZn37 obtidas por microscopia ótica. a) Amostra F com uma espessura de 2,5mm que sofreu um tratamento R350. b) Amostra G com uma espessura de 4mm que foi submetida a um tratamento R350.	36
Figura 22 - Resultados de ensaios de tração de uma chapa de latão (CuZn37). Adaptado de [41].	38
Figura 23 - Gráfico de regressão linear entre o diâmetro médio de grão (μ m) e a dureza (HV) de três amostras.	40
Figura 24 - Gráfico da resistência mecânica de um ensaio de tração realizado na amostra F1	42
Figura 25 - Gráfico da resistência mecânica de um ensaio de tração realizado na amostra H1	43
Figura 26 - Gráfico da resistência mecânica obtida por ensaios de tração da amostra G1	44
Figura 27 - Imagens obtidas por SEM, de defeitos existentes num protótipo de chaleira. À esquerda identificação das zonas Z1 e Z2. À direita Identificação das zonas Z3, Z4 e Z5.	46
Figura 28 - Gráficos de análise EDS das respectivas zonas assinaladas nas imagens SEM apresentadas na figura 24	47
Figura 29 - À esquerda: Imagem obtida por SEM e identificação da zona Z3. À direita gráfico EDS da respetiva zona Z3.	48
Figura 30 - À esquerda: Imagem obtida por SEM e identificação da zona Z1. À direita: gráfico EDS da respetiva zona Z1.	49
Figura 31 - Imagens obtidas por termografia. 1) Brasagem da rolha metálica. 2) Brasagem de chapas com maçarico normal. 3) Brasagem de chapas com maçarico grande. 4) Brasagem de bule. 5) Recozimento de vaso. 6) Recozimento de tiras entrelaçadas	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição química da liga CuZn37 [15].	9
Tabela 2 - Designação da liga de cobre CuZn37 [14].	9
Tabela 3 - Propriedades físicas da liga CuZn37 [13].	9
Tabela 4 - Especificações e composição química de uma liga de brasagem Ag-Cu-Zn-Sn [30, 31].	21
Tabela 5 - Durezas obtidas no grupo de amostras 1.	37
Tabela 6 - Durezas obtidas no grupo de amostras 2	39
Tabela 7 - Diâmetros médios de grão dos três provetes do grupo de amostras 2 analisado	40
Tabela 8 - Resultados das principais características de ensaios de tração em provetes de latão (CuZn37)	41
Tabela 9 - Especificações detalhadas das análises de termografia realizadas.	49

Agradecimentos

Ao professor Manuel Vieira, por ter aceitado este desafio e por toda a ajuda, acompanhamento e disponibilidade demonstrada no decorrer deste trabalho.

À Eng.^a Sara Silva e à *Topázio-1874* por terem possibilitado a elaboração desta dissertação em ambiente empresarial e por todo o auxílio e acompanhamento prestado no decorrer do trabalho.

Ao pessoal do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais por toda a disponibilidade demonstrada sempre que necessário.

Ao CINFU por toda a ajuda e colaboração prestada na realização de ensaios mecânicos e análise de termografia.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, avós, irmã e sobrinho por me terem proporcionado todas as condições necessárias durante o meu percurso académico e educação e pelo incessante apoio demonstrado quotidianamente.

À minha namorada por todo o crédito, incentivo e ajuda prestada de forma incansável.

Aos meus amigos, de longa data e de curso, que desde sempre me apoiaram e ajudaram no meu crescimento e desenvolvimento.

Abreviaturas e acrónimos

MO - *Microscopia ótica*

SEM - *Scanning Electron Microscope* (Microscopia eletrónica de varrimento)

EDS - *Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

AWS - *American Welding Society*

ISO - *International Organization for Standardization*

CFC - *Cúbica de faces centradas*

CCC - *Cúbica de corpo centrado*

α - *Alfa*

β - *Beta*

1. Topázio 1874

A Topázio é propriedade da Ferreira Marques & Irmão, uma empresa com tradição na arte de trabalhar o ouro e a prata, fundada em 1874 na cidade do Porto, por Manuel José Ferreira Marques.

Aproveitando todo o conhecimento no trabalho manual adquirido pelo desenvolvimento de peças de ouro, a Topázio começou a trabalhar as primeiras peças de prata na década de 20. Mas só na década de 30 é que se procedeu ao registo de peças exclusivas, tanto de ouro como de prata.

Em 1934 é criada a marca Topázio como forma de apresentar os novos desenhos da empresa e de modernizar os processos de produção, mas foram as filigranas que mereceram especial atenção. Apesar de serem desenhos clássicos, alguns já com dezenas de anos, esta categoria de produtos empurrou a marca Topázio para a fama.

A Topázio já era uma conceituada marca de obras de ourivesaria artesanal a nível nacional, mas na década de 60 apresenta-se, pela primeira vez, a nível internacional na Feira de Hannover começando a marcar a sua posição como verdadeiro “craftsman” da prata a nível mundial.

O valor da prata como matéria-prima atingiu valores extremos durante a década de 70, dando início a uma nova fase da Topázio. Alocando o conhecimento de quase um século na produção e arte de peças em ouro e prata, foi possível oferecer ao mercado uma solução mais económica: o banho de prata.

Hoje, com cerca de 85 trabalhadores e uma fábrica com 4.000 m² de área ativa coberta, a Topázio destina 25% da sua produção à exportação, tendo como principais destinos Rússia, Itália, Reino Unido, República Checa, Alemanha, Marrocos e Estados Unidos, estando empenhados em implementar a marca em mercados como Canadá, Angola, Médio Oriente, América Latina e China, entre outros lugares no mundo. O mercado nacional absorve os restantes 75% da produção [1].

2. Enquadramento do tema

A Topázio - 1874 é uma empresa conotada na arte do trabalho de ouro, prata, latão e outros materiais. A necessidade deste estudo surgiu devido ao aparecimento de defeitos superficiais em chapas de latão quando estas já se encontram conformadas mecanicamente e submetidas a um banho de prata. Isto obriga a um retrocesso da produção de todas as peças que padeçam desta anomalia.

A caracterização deste tipo de ligas, em particular, a sua microestrutura, propriedades mecânicas e processos de conformação inerentes ao trabalho deste metal são essenciais para uma melhor compreensão e posterior análise de defeitos. A descrição e análise do processo de produção bem como a caracterização do meio-ambiente nas quais estas ligas estão inseridas são outras ferramentas essenciais no estudo e compreensão dos defeitos. Alguns exemplos de defeitos presentes nas peças podem ser analisados na figura em baixo apresentada.

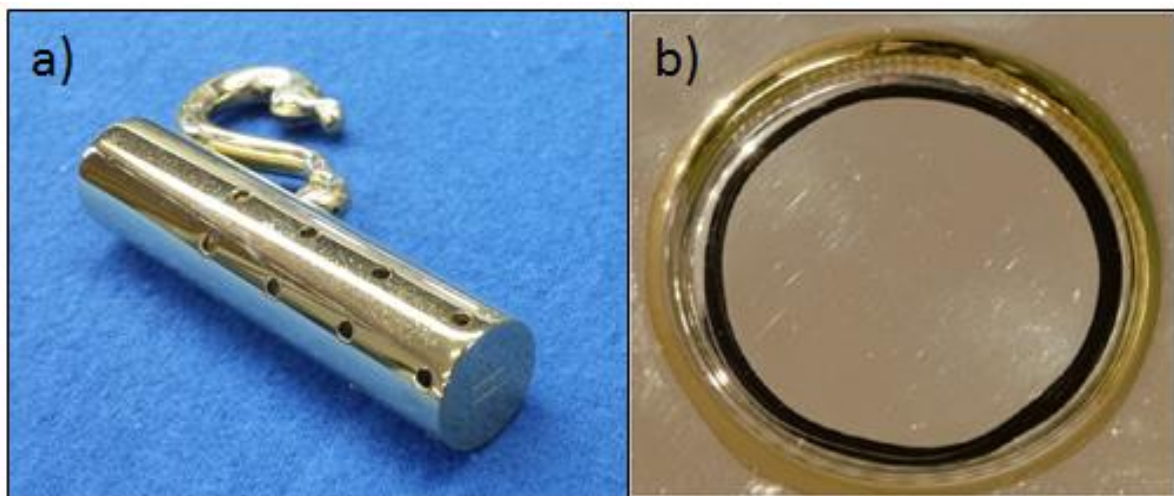


Figura 1 - Exemplos de peças de latão com defeitos existentes na superfície. a) Protótipo de chaleira. b) Aquecedor.

3. Introdução

Os latões são ligas metálicas de cobre e zinco, às quais se adicionam alguns elementos de liga para a obtenção de determinadas características [2].

O latão é um material de excelência e primeira escolha para muitos dos componentes direcionados para a indústria elétrica, eletrônica e engenharia de precisão. Devido a uma combinação única de propriedades este material torna-se indispensável quando é necessário um ciclo de vida longo associado a um baixo custo [3].

Muitas das suas aplicações resultam da elevada condutividade elétrica e térmica, em consonância com aplicações que exijam resistência mecânica em determinadas áreas da engenharia. A vasta gama de cores, aprimorada por outras variações que podem ser produzidas através da adição de um outro elemento de liga, para uma grande diversidade de utilizações decorativas [4].

A maioria dos latões apresenta boa resistência à corrosão. Em latões com teores entre 0 e 40% de zinco, a adição de uma pequena quantidade de estanho melhora a resistência em ambientes marítimos. Latões com 20 a 36% de teor em zinco são, contudo, sujeitos a corrosão seletiva, conhecida como dezincificação, quando expostas a soluções ácidas ou salinas [4].

3.1. Ligas Cu-Zn (Latões)

Nestas ligas adicionam-se intencionalmente alguns elementos de liga para a obtenção de determinadas características. Os latões podem conter elementos como o estanho, alumínio, silício, manganês, níquel ou chumbo, sendo que estas adições raramente excedem os 4%. Em geral, estas ligas apresentam boa resistência mecânica e à corrosão, no entanto, a sua microestrutura e propriedades dependem do teor em zinco. Quando o teor em zinco é superior a 20%, a liga denomina-se “latão amarelo” e quando inferior denomina-se por “latão vermelho” [2, 5].

Os latões são monofásicos até 35% de zinco, apresentando a fase α uma estrutura de cúbica de faces centradas (CFC). Esta fase é pouco dura e apresenta

uma elevada ductilidade, sendo então apropriada para processos de conformação mecânica a frio [2, 5, 6].

As ligas com 35% a 58% são consideradas bifásicas ($\alpha + \beta$). A fase β , apresentando uma estrutura cristalográfica cúbica de corpo centrado (CCC) ordenada, é uma fase mais resistente do que a fase α , porém menos dúctil, pelo que apresenta uma baixa taxa de conformação a frio mas boa conformação a quente (entre 454 e 465 °C a fase β' sofre uma transformação de ordem \leftrightarrow desordem que lhe altera a ductilidade). As ligas bifásicas ($\alpha + \beta$) são significativamente mais apelativas a serem trabalhadas a elevadas temperaturas em comparação com as ligas monofásicas (α), podendo inclusive ser extrudidas sob a forma de barras de secção complexa, sólida ou oca [2, 5, 7].

A partir de 50% de Zn, começa a formar-se uma nova fase intermetálica (fase γ) que sendo extremamente frágil, limita a sua aplicação industrial. As ligas de latão bifásicas de emprego industrial são, regra geral, ligas com teores de Zn entre os 36 e os 42%, apresentando, à temperatura ambiente, uma estrutura $\alpha + \beta'$. Estas ligas são usualmente extrudidas e estampadas a quente e maquinadas a frio [2, 5].

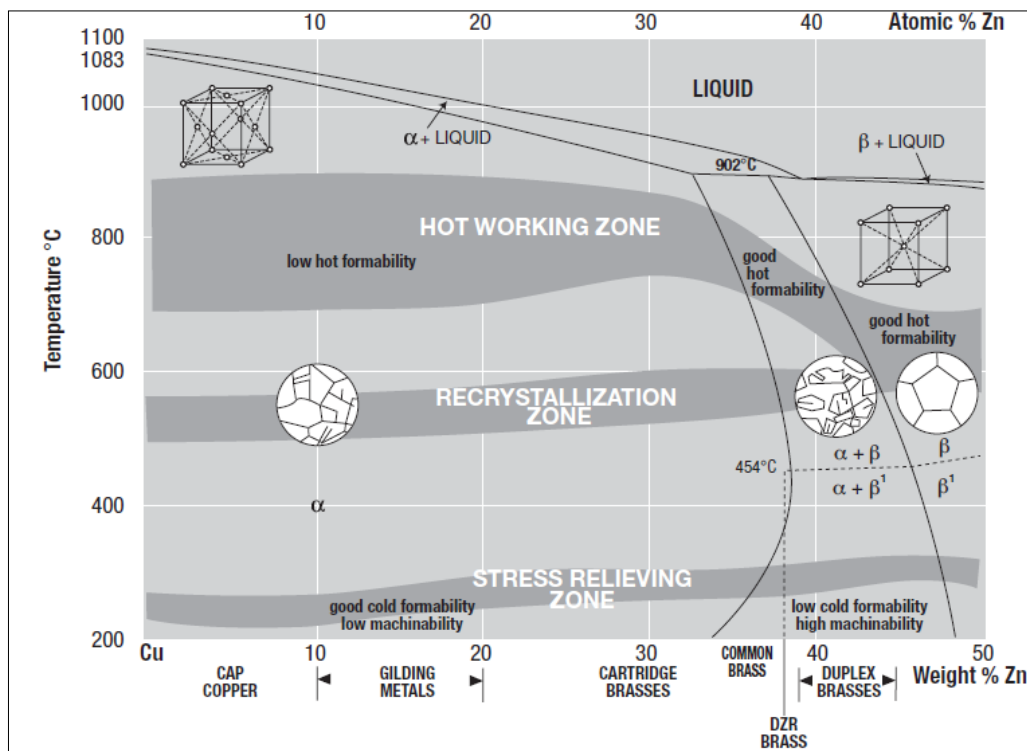


Figura 2 - Parte do diagrama de equilíbrio Cu-Zn com indicação das estruturas, tratamentos térmicos e conformação de algumas fases [7].

3.2. Microestrutura do Latão

Para concentrações em zinco de 30%, no estado de equilíbrio, a liga é monofásica. Os latões α são geralmente de uma única fase, mas nem sempre isso acontece. À medida que a liga arrefece forma-se a fase α , o que leva a uma alteração da composição química do fundido remanescente. Ora, isto pode resultar num crescimento dendrítico dos grãos, assim como num excesso de zinco no fundido restante que resulta na formação da fase β , em simultâneo com a fase α . Pelo que por forma a evitar a formação das duas fases ($\alpha + \beta$), procede-se a um recozimento que ajuda a difusão do zinco e, por conseguinte, a composição química do líquido torna-se mais uniforme, pois o aumento de temperatura permite que ocorra uma alteração do gradiente de concentração do zinco e, assim uma homogeneização da composição da liga, formando-se apenas uma fase, nomeadamente a fase α [8].

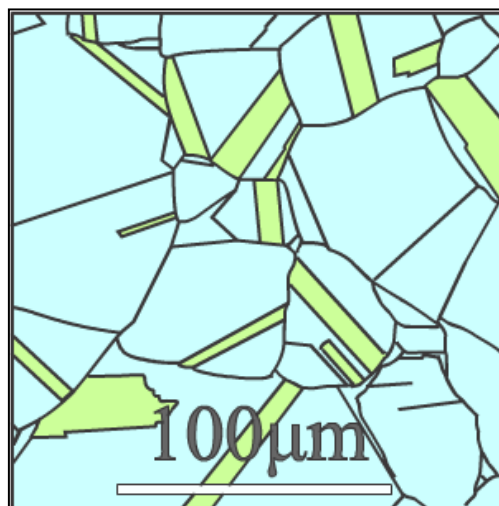


Figura 3 - Latão α com composição 70-30 [8].

A figura em cima apresentada mostra a presença de uma única fase. Os latões α têm até 30% de Zn em solução sólida. É igualmente possível observar maclas de recozimento, sendo estas defeitos de empilhamento [8].



Figura 4 - Latão α - β com composição 60-40 [8].

Os latões bifásicos (α + β) têm concentrações de zinco entre os 35 e os 58%. A fase α (primária) precipita em primeiro lugar e pode formar uma estrutura *Widmanstätten*, solidificando sob a forma de agulhas ao longo de direções de crescimento preferenciais [8].

A fase α (secundária) precipita a partir da solução sólida da fase β . O exemplo apresentado na figura 4 mostra a microestrutura de um latão arrefecido rapidamente ao ar, apresentando uma “*Basketweave*” que consiste numa textura que apresenta múltiplos grãos horizontais e verticais. A fase β compõe a matriz de fundo, e é a fase mais rica em zinco [8].

3.3. Influência dos elementos de liga

O zinco é, de longe, o elemento de liga mais importante nas ligas de cobre. Atua como um desoxidante quando adicionado em quantidades iguais ou inferiores a 5%, o fósforo pode também ser adicionado de forma a garantir uma total desoxidação. Quando o conteúdo em zinco é aumentado, a densidade, o ponto de fusão, a condutividade elétrica e térmica e o módulo de elasticidade (módulo de Young) diminuem, mas, em contrapartida, a resistência mecânica, a dureza, e o coeficiente de expansão térmica aumentam.

Outros elementos de liga são adicionados, em teores baixos, com o objetivo de afinar ou melhorar as propriedades ou características da liga. A influência dos

vários elementos de liga passíveis de serem adicionados ou de aparecerem inadvertidamente (sob a forma de impurezas) na liga de latão pode ser descrita da seguinte forma [9, 10]:

Al - O alumínio dissolve-se nas soluções sólidas α e β , promovendo o seu endurecimento, aumentando a resistência à rotura e a dureza, e afeta as temperaturas de transformações de fase. Além disso, melhora a resistência à corrosão devido à formação de um filme de Al_2O_3 que protege a superfície.

As - O arsénio é frequentemente adicionado em pequenas quantidades a ligas de latão α , a fim de garantir uma proteção contra a corrosão por dezincificação.

Fe - A adição do ferro promove o aumento da taxa de formação de núcleos de solidificação e recristalização e dificulta o subsequente crescimento dos grãos, promovendo assim o refinamento da estrutura. O ferro produz um efeito especialmente favorável no latão quando combinado com manganês, níquel e alumínio. Estes latões possuem alta resistência à corrosão. A combinação da adição do ferro em conjunto com o manganês promove em latões bifásicos ($\alpha+\beta$) o aumento da dureza e resistência à tração, com uma pequena diminuição da sua ductilidade.

Mn - O manganês aumenta a resistência à tração de latões, a ductilidade e a resistência à corrosão.

Ni - O níquel reduz a susceptibilidade de corrosão por fissuração nos latões. Em latões bifásicos promove o aumento da sua dureza e resistência à tração, sem uma perda significativa da sua ductilidade melhorando as suas propriedades mecânicas quando submetido a elevadas temperaturas.

Pb - O chumbo apresenta uma particularidade: por um lado, é um aditivo prejudicial porque segrega nas fronteiras de grão na forma de filmes que são responsáveis pela fragilidade a quente do latão, por outro lado, é um elemento necessário com o objetivo de melhorar a capacidade de processamento mecânico, não promovendo nenhum efeito sobre a resistência à corrosão [7, 11].

Sn - O estanho é adicionado para proporcionar uma maior resistência à corrosão. Em latões bifásicos promove um ligeiro aumento da sua dureza e resistência à tração.

Si - Aumenta a resistência à corrosão e ao desgaste (devido à formação de silicatos) e melhora as propriedades de processamento (a moldabilidade, soldabilidade, e capacidade de deformação plástica) até à temperatura de 183°C. O seu principal efeito do ponto de vista da corrosão é aumentar o teor da fase β . Uma adição de 0,5 a 1% de silício proporciona uma desoxidação do fundido durante o fabrico da liga, reduz a volatilização de zinco durante a brasagem e promove um acabamento superficial liso e com baixa rugosidade [12].

3.4. CuZn37

É a principal liga para processos de conformação. Apesar dos latões com menor teor em zinco apresentarem melhores propriedades para conformação a frio, a liga CuZn37 é a liga mais utilizada. A sua principal utilização deve-se a razões económicas (preço mais baixo do zinco em relação ao cobre); as propriedades de conformação da liga satisfazem a procura de muitas aplicações. Como o conteúdo de zinco aumenta na liga, a resistência mecânica aumenta, porém é acompanhada por uma diminuição da sua condutividade. Além disso, deve notar-se que à medida que aumenta o teor em zinco, a tendência para fissuração por corrosão aumenta em caso de exposição a uma atmosfera amoniacal. É uma liga que apresenta também boas propriedades antimicrobianas [13, 14].

Tabela 1 - Composição química da liga CuZn37 [15].

Composição química (ASTM) [wt.%]						
Cu	Al	Fe	Ni	Pb	Sn	Zn
62-64	<0,05	<0,1	<0,3	<0,1	<0,1	Restante

Tabela 2 - Designação da liga de cobre CuZn37 [14].

Norma	Designação da liga
EN	CuZn37
DIN CENT/TS 13388	CW508L
UNS	C27200

Tabela 3 - Propriedades físicas da liga CuZn37 [13].

Propriedades Físicas	
Temperatura de Fusão (°C)	≈920
Densidade (Kg/m ³)	8440
Condutividade elétrica (MS/m)	116

3.5. Repuxamento

O repuxamento é um processo de conformação mecânica de chapas metálicas de formas axissimétricas e sem costura, através de uma combinação de força e rotação. Com base nas técnicas utilizadas, aplicações e resultados obtidos, o método pode ser dividido em quatro principais categorias: o repuxamento manual, repuxamento de energia, conformação por corte e repuxamento de tubo [16, 17].

O repuxamento permite obter bons acabamentos superficiais e boas propriedades mecânicas. As suas principais limitações devem-se à dificuldade de obtenção de peças com geometrias complexas e à dependência da habilidade do operador para um bom desempenho [16, 17].

O processo deve ser refinado a fim de evitar a formação rugas e curvaturas. Não existe desbaste apreciável do material, de modo que os diâmetros iniciais devem ser consideravelmente superiores aos diâmetros das peças acabadas. Enquanto o repuxamento do metal pode ser mais rápido do que a maquinação, este não é tão rápido como uma típica operação de estampagem.

Um dos defeitos mais frequentes é o de encurvadura. De forma a reduzir o diâmetro para a dimensão do mandril sem que ocorra deformação (encurvadora), uma combinação de tensões de compressão tangenciais e de trações radiais são induzidas progressivamente no material [16, 17, 18].

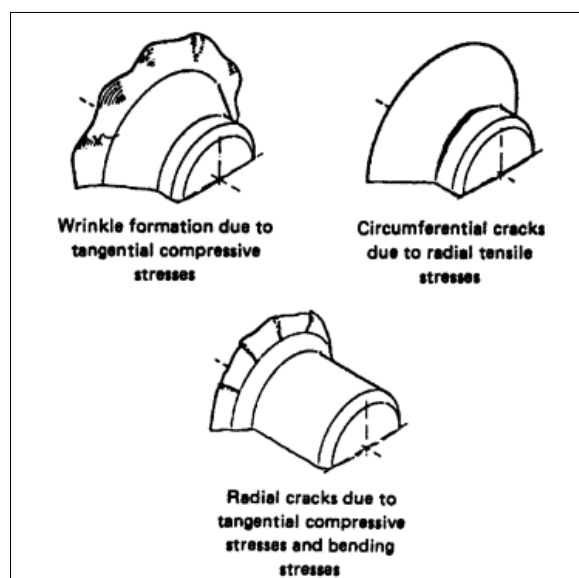


Figura 5 - Defeitos comuns em componentes repuxados [19].

A aplicação de demasiada tensão em qualquer direção é extremamente indesejável, podendo resultar na formação de rugas ou fissuras circunferenciais. Em determinados casos, o trabalho contínuo numa peça que já tenha sofrido a formação de rugas pode resultar em fissuração radial. Geralmente este defeito é causado quando a margem vertical da peça é repetidamente achatada ou sofre excesso de trabalho em zonas previamente deformadas [18].

3.5.1. Repuxamento manual

O repuxamento manual é um processo mecânico utilizado a nível industrial, este processo é de uso recorrente na *Topázio-1874*.

O repuxamento manual não envolve desbaste considerável do metal de trabalho. A operação é realizada com a utilização de um torno de repuxar e consiste em pressionar uma ferramenta contra um metal por estampar que é girado pelo *head-stock*. O operador trabalha a partir do eixo central para fora, forçando gradualmente o fluxo do metal para se adaptar à forma do padrão como ilustrado na figura 6. Vários dispositivos mecânicos são utilizados para aumentar a força que pode ser aplicada à peça de trabalho. Qualquer metal que é suficientemente dúctil para ser modelado a frio por outros métodos pode ser repuxados. A maioria dos repuxamentos é feita sem aplicar calor na peça de trabalho. Por vezes o metal é pré-aquecido para aumentar a ductilidade ou para permitir que secções mais espessas possam ser repuxadas [16, 17].

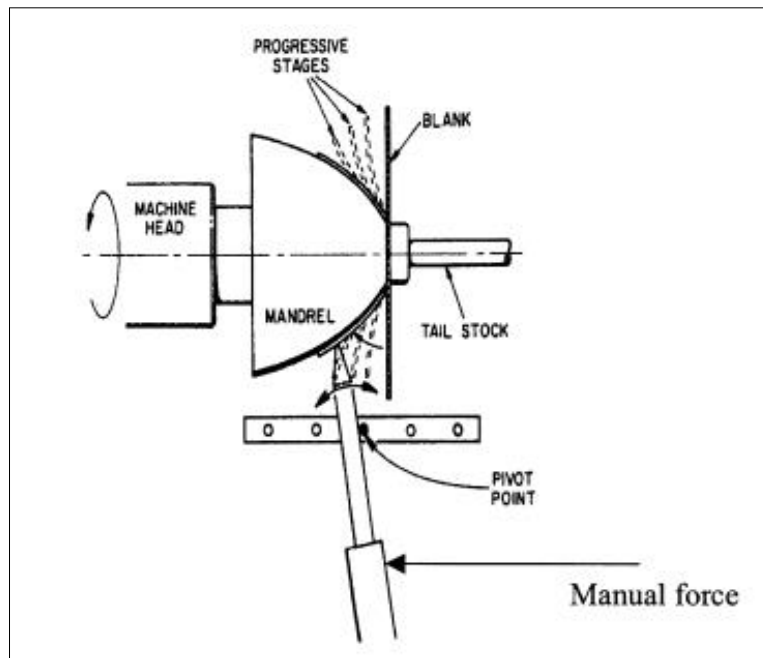


Figura 6 - Repuxamento manual [20].

Vantagens:

O repuxamento manual tem várias vantagens sobre um outro processo competitivo de conformação, a prensa:

- As ferramentas são mais baratas e os investimentos em equipamentos essenciais são relativamente baixos;
- O tempo de instalação é mais curto;
- Mudanças do design na peça de trabalho podem ser feitas a um custo reduzido.

Desvantagens:

- São necessários operadores qualificados, porque uma vez que a uniformidade dos resultados depende muito da habilidade do operador;
- O repuxamento manual é geralmente mais lento do que a prensa [16].

3.5.2. Repuxamento por Corte

No processo de repuxamento por corte o metal é simultaneamente conformado e desbastado por forças de corte. Praticamente todos os metais dúcteis podem ser processados através do repuxamento de energia. A gama de produtos vai desde pequenos itens (por exemplo componentes para *hardware*) produzidos em

grande quantidade a grandes componentes direcionados para a indústria aeroespacial com um baixo volume de produção [16].

Conformação por corte é um processo de extrusão de ponto rotativo para repuxamento que pretenda obter formas cónicas ou hemisféricas. Cargas axiais e radiais do (s) rolo (s) provocam uma redução significativa na espessura da chapa. Isto produz altas tensões compressivas de corte na direcção transversal, (da espessura do material) resultando numa redução da espessura que obedece segundo a equação da lei sinusoidal (ver figura 7) [21].

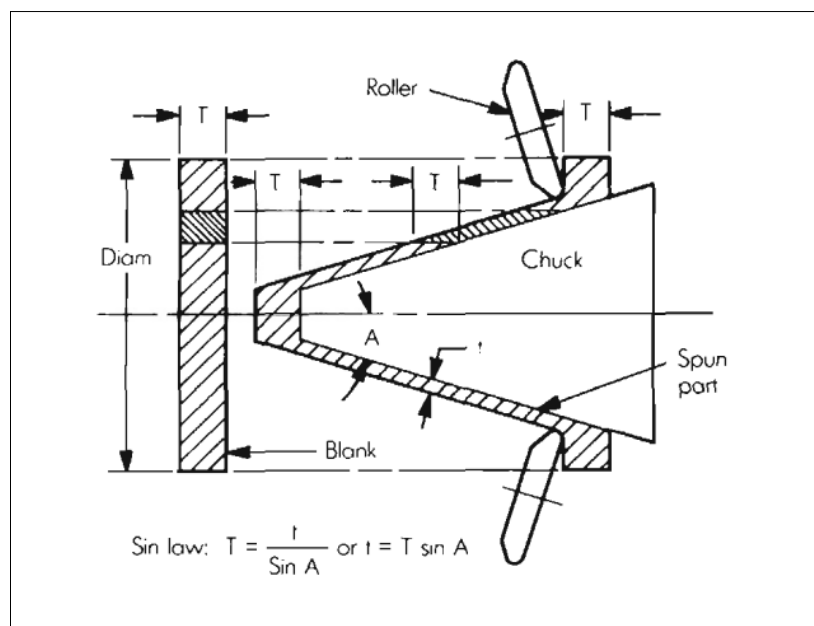


Figura 7 - Lei sinusoidal na conformação por corte [21].

Este processo é uma variação do processo de repuxamento por energia. O metal exigido para a conformação é obtido a partir da espessura inicial, sendo os diâmetros iniciais aproximadamente iguais aos diâmetros das peças acabadas. A forma final pode ser cónica, parabólica, hemisférica ou sob a forma de qualquer outra superfície de revolução dentro das restrições exigidas [21].

3.5.3. Repuxamento por tubo

O repuxamento por tubo é utilizado de forma a reduzir a espessura da parede e aumentar o comprimento de tubos ou formas previamente formadas, este processo é efetuado sem provocar alterações no seu diâmetro interior. As reduções na espessura da parede podem atingir os 90% e o aumento no comprimento pode atingir

os 800% sem que seja necessário efetuar tratamentos térmicos como por exemplo um recozimento entre etapas. Este método segue uma regra puramente volumétrica, a lei sinusoidal não se aplica uma vez que não existe nenhum ângulo interno [21].

3.5.4. Influência do aumento de temperatura e efeito do repuxamento nas propriedades mecânicas

É comum ocorrer o aquecimento das peças de trabalho com vista a facilitar o movimento do metal durante o processo de repuxamento

A indução de calor no processo de repuxamento aumenta os limites de conformação para a maioria dos materiais. Os materiais que geralmente requerem aquecimento são aqueles com baixa ductilidade à temperatura ambiente. Estes incluem ligas de titânio, tungstênio, berílio, metais refratários e a maioria das superligas.

O sobreaquecimento deve ser evitado. Quando a conformação é realizada abaixo da temperatura de recristalização do material, irá promover-se um aumento substancial das propriedades mecânicas da parte repuxada.

No repuxamento a resistência à tração e a tensão de cedência aumentam, em contrapartida a ductilidade diminui. A magnitude deste efeito depende da redução da espessura da chapa e da susceptibilidade que o metal tem para ser trabalhado quando encruado.

Em muitas aplicações, o aumento na resistência mecânica gerado por este processo de conformação, é altamente desejável. Em outras aplicações, a modificação das propriedades mecânicas não é desejada, sendo então necessário realizar um recozimento na peça [16, 21].

3.6. Lubrificantes e Lubrificação na conformação mecânica

Lubrificantes são componentes de relativo baixo-custo pertencentes a um sistema de conformação mecânica. Os lubrificantes são importantes e muitas vezes indispensáveis para uma eficiente conformação no fabrico de peças [5].

Mecanismos de lubrificação em conformação metálica referem-se à forma como o lubrificante aplicado entre a peça de trabalho e a matriz interage entre os dois, sabendo de que forma afeta as suas condições mecânicas [22].

A aplicação de um determinado lubrificante depende dos tipos de operações de conformação e materiais a serem trabalhados. As diferenças no desempenho dos lubrificantes são expectáveis tendo em conta as diferenças existentes na composição da superfície e sua rugosidade.

A Lubrificação num processo de repuxamento por energia requer o uso de um fluido que serve como lubrificante e refrigerante. Devido à grande quantidade de calor gerado, é comum utilizar-se um fluido à base de água. Uma suspensão coloidal de zinco misturado com uma pasta de lítio é adequada para a maioria dos metais [16], [23].

Um lubrificante eficiente proporciona as seguintes vantagens:

- Redução ou eliminação do desgaste e escoriação que ocorre entre o contacto da chapa metálica e a matriz;
- Controlo da fricção;
- Distribuição mais uniforme da tensão e, por conseguinte, um aumento geral do nível de deformação;
- Diminuição do calor adjacente ao processo de conformação;
- Lubrificantes devem satisfazer um conjunto de requisitos de forma a serem utilizados numa operação mecânica:
- Viscosidade do lubrificante deve ser adequada ao longo das variações da temperatura e pressões encontradas;
- Compatibilidade química com a peça e a matriz;
- Facilidade de aplicação, remoção e eliminação;
- Compatibilidade com operações de soldagem, selantes e sistemas de pinturas [16].

3.7. Brasagem

A brasagem é um processo de união, entre duas peças em conjunto com um terceiro elemento, o metal de adição. O material de adição é fundido e distribuído

por ação capilar entre as superfícies de contacto das peças metálicas que se pretendem unir. No processo de brasagem não ocorre a fusão de nenhum dos metais de base, apenas se funde o metal de adição. Na brasagem, o metal de adição tem uma temperatura de fusão que está acima de 450°C, mas abaixo do ponto de fusão do metal base a ser unido. Se a junta é adequadamente concebida e a operação de brasagem corretamente executada, então, a junta soldada poderá ser mais dura do que o metal de adição a partir do qual foi formado após a solidificação. Este resultado notável deve-se às pequenas folgas utilizadas durante a brasagem, à ligação metalúrgica que ocorre entre o metal base e o de adição e às restrições geométricas que são impostas na junta, formando uma ligação metalúrgica forte à medida que vai solidificando [24, 25].

A brasagem tem três características distintas:

1. A coalescência ou unificação de um conjunto de duas ou mais partes para formar uma estrutura é conseguida através do aquecimento da montagem ou da região das partes a serem unidas a uma temperatura igual ou superior a 450°C;
2. As partes unidas e o material de adição são aquecidos a uma temperatura suficientemente alta para fundir apenas o material de adição;
3. Após a sua fusão, o material de adição, espalha-se na junta de solda molhando as superfícies do metal base [25].

A Brasagem apresenta várias vantagens em relação à soldagem:

- Quaisquer metais podem ser unidos, incluindo metais dissimilares;
- Certos métodos de brasagem podem ser realizados de forma rápida e consistente, permitindo assim obter altas taxas de produção;
- Geralmente é requerido menos calor e energia em comparação com uma soldadura por fusão;
- Maior acessibilidade a áreas de união, do que em processos de soldagem;
- Materiais com espessuras diferentes podem ser unidos com relativa facilidade;
- As propriedades metalúrgicas dos materiais de base não são criticamente afectadas [25, 26].

As desvantagens e limitações que a brasagem inclui são:

- A junta de solda obtida por brasagem é, por norma, menos resistente que uma junta obtida por soldagem;
- Temperaturas de serviço elevadas enfraquecem a junta de solda;
- A cor do metal na junta de solda pode não coincidir com a cor apresentada pelo metal de base, o que pode constituir um problema a nível estético;
- Exigência de experiência e habilidade do operador na execução do processo;
- Apresenta limitações de tamanho das peças [25, 26].

3.7.1. Tocha de Brasagem

O processo de tocha por brasagem utiliza uma chama de gás combustível como fonte de calor para o processo. O gás mistura-se com o ar ou oxigénio para produzir uma chama, a qual é aplicada à peça de trabalho até que o conjunto atinja a temperatura de brasagem adequada [27].

Um metal de adição é adicionado na junta de solda, geralmente em forma de haste ou fio. Os combustíveis utilizados neste processo de união são o acetileno, propano e outros gases como o ar ou oxigénio. A tocha de brasagem é frequentemente operada de forma manual, exigindo-se operadores experientes e especializados no controlo de aplicação de chama e interpretação de temperaturas de trabalho. Este método de ligação metálica pode ser utilizado sem operações de produção mecanizadas e em trabalhos de reparação [24].

O sobreaquecimento deverá ser evitado, pois pode provocar uma difusão rápida, algo indesejado neste processo. Utilizar gás natural é adequado numa tocha de brasagem, pois a temperatura da chama é relativamente baixa, reduzindo-se assim o perigo de sobreaquecimento [25].

Técnica:

A chave para realizar uma brasagem correta através de tocha, consiste em aquecer uniformemente todos os componentes a serem brasados. Esta técnica pode requerer que se opere em primeiro lugar o maçarico nos componentes de maiores dimensões e em seguida nos de menores dimensões. Uma vez que o material de adição irá fluir para a parte mais quente de uma montagem, a chama deve ser

aplicada de um modo tal que o fluxo de material de adição se deposite na direção pretendida.

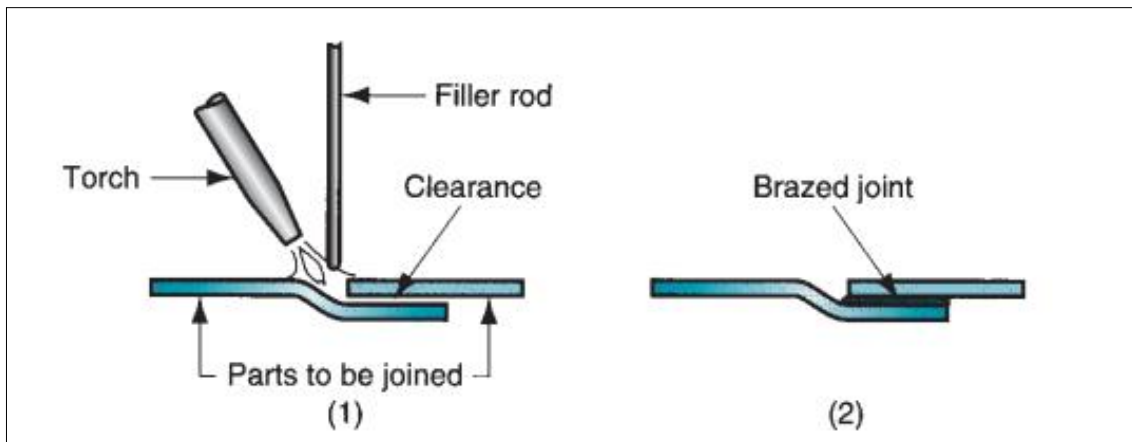


Figura 8 - Processo de brasagem através da tocha de brasagem [24].

A tocha de brasagem apresenta várias vantagens, que incluem:

- Flexibilidade e versatilidade: metais com diferentes tamanhos podem ser ligados com bastante facilidade;
- Custo de equipamento bastante reduzido;
- Automação é possível na maioria dos casos;
- Portabilidade do equipamento;
- Velocidade - a chama da tocha é das formas mais rápidas e eficientes de aquecimento do metal a ser ligado, especialmente quando se tratam de metais que apresentem finas espessuras [27].

Algumas desvantagens resultantes deste processo de união são:

- Sobreaquecimento - quando se usa uma tocha que induz uma chama a elevadas temperaturas é fácil provocar um sobreaquecimento nos metais base, de adição ou fluxos;
- Habilidade - exige-se alta habilidade de execução do processo e experiência no manuseamento do mesmo, a fim de se conseguir produzir juntas de solda consistentes;
- Incêndio - é fácil deflagrar um incêndio com o tipo de equipamento utilizado neste processo sabendo-se igualmente que se está a trabalhar na presença de gases e combustíveis inflamáveis;

- Oxidação/Descloração pode ocorrer nas superfícies a ligar;
- Resíduos de fluxo necessitam ser removidos após a brasagem [27].

3.8. Metais de adição e Fluxos

A brasagem pode proporcionar a formação de juntas fortes com quase qualquer metal de adição caso se verifique que os métodos de brasagem e o design projetado da junta sejam selecionados e aplicados corretamente [25].

Diversas características que os metais de adição devem possuir são:

1. Fluidez adequada à temperatura de brasagem de forma a garantir o fluxo por ação capilar e proporcionar uma correta distribuição na liga;
2. Estabilidade para evitar a libertação prematura de elementos de baixo ponto de fusão do metal de adição;
3. A tensão superficial na fase líquida deve ser baixa de forma a obter uma boa molhabilidade;
4. Características de baixa volatilização dos elementos de liga de metal de adição quando submetido à temperatura de brasagem;
5. Capacidade de ligação com o metal base que proporcione a formação de uma liga com um ponto de fusão mais elevado;
6. Dependendo das necessidades de serviço, ter a capacidade de produzir ou evitar interações do metal de adição/metal base [24, 25].

AWS CLASS	UNS NUMBER	COMPOSITION, WT%						LIQUIDUS		SOLIDUS	
		Ag	Cu	Zn	Cd	P	Sn	°C	°F	°C	°F
BAG-1	P07450	45	15	16	24	...	...	620	1145	605	1125
BAG-1A	P07500	50	15.5	16.5	18	...	...	635	1175	625	1160
BAG-2	P07350	35	26	21	18	...	...	700	1295	605	1125
BAG-7	P07563	56	22	17	...	...	5	650	1205	620	1145
BAG-8	P07720	72	28	...	...	...	...	780	1435	780	1435
BAG-18	P07600	60	30	...	...	...	10	720	1325	600	1115
BCUP-1	C55180	...	95	...	...	5	...	925	1695	710	1310
BCUP-2	C55181	...	97	...	...	3	...	795	1460	710	1310
BCUP-5	C55284	15	80	...	...	5	...	800	1475	645	1190

Figura 9 - Composição e propriedades térmicas de metais de adição usados em operações de brasagem [27].

Os fluxos de brasagem são à base de água, dissolvem-se na junta e inibem a formação de óxidos e de outros produtos indesejados que podem aparecer no decorrer da brasagem [24, 28].

Um bom fluxo deve apresentar:

- Baixa temperatura de fusão;
- Baixo índice de viscosidade de forma a que se possa deslocar através do metal de adição;
- Facilidade de molhagem;
- Proteção na junta de solda até à solidificação do metal de adição ocorrer. O fluxo deve ser fácil de remover após a operação de brasagem. Alguns dos principais constituintes do fluxo incluem o bórax, fluoretos e cloretos. Existem alternativas ao uso de fluxos, devendo o processo ocorrer em vácuo, ou numa atmosfera que iniba a formação de óxidos [24].

3.8.1. Metal de adição - Ag-Cu-Zn-Sn

Metais de adição à base de prata têm sido amplamente utilizados para brasagem nas indústrias aeroespacial, automóvel e de construção, pois estas ligas de brasagem têm a particularidade de tornar possível a soldadura entre metais ferrosos e não ferrosos, com a exceção do alumínio e magnésio, formando também juntas de boa qualidade. A liga BAg-1 é considerada pela *American Welding Society* (AWS) como o metal de adição para brasagem com o ponto de fusão mais baixo (~ 620°C), no entanto, esta liga é classificada como tóxica devido à presença de cádmio (Cd). Posto isto, atualmente a liga BAg-7 é denominada como a liga sem cádmio com menor ponto de fusão, variando entre os 620 - 650° C [29]. Devido a estas características é considerada uma liga de excelência para brasagem.

A liga BAg-7 (com a designação ISO Ag156) é uma liga típica de brasagem, que pode ser utilizada na maioria das operações. É de fácil utilização, e apresenta baixo ponto de fusão, na Tabela 4 estão apresentadas as especificações [30]:

Tabela 4 - Especificações e composição química de uma liga de brasagem Ag-Cu-Zn-Sn [30, 31].

Ag	Cu	Zn	Sn	Si
56	22	17	5	-
Ponto de Fusão (°C)			620 - 650	
Temperatura de Brasagem (°C)			652 - 760	

3.9. Volatilização do Zn através de processos de Brasagem/Soldadura

3.9.1. Tocha de Brasagem

O baixo custo de equipamento é uma grande vantagem na tocha de brasagem, o que é particularmente útil para conjuntos envolvendo massas desiguais [32].

Várias precauções devem ser tomadas quando se aplica uma tocha de brasagem em cobre e ligas de cobre. Quando é necessário brasar este tipo de ligas que contenham óxidos, uma atmosfera redutora na chama deve ser evitada, pois pode promover a fragilização por hidrogénio. Para estes cobs, uma chama neutra ou ligeiramente oxidante e um ciclo de brasagem curto são necessários, precavendo assim este defeito. Os latões estão sujeitos a volatilização do zinco quando se encontram sobreaquecidos ou quando submetidos por muito tempo ao processo de brasagem. Uma correta aplicação de fluxo suprime a volatilização de zinco [32].

As ligas contendo elementos que formam facilmente óxidos refratários (alumínio, berílio, crómio e silício) devem ser protegidas através de um fluxo e não devem ser expostas a uma chama oxidante. Uma das diferenças mais notáveis entre a brasagem de tocha manual em aços e a brasagem de tocha manual em ligas de cobre é que o aço pode suportar taxas de aquecimento muito rápidas, enquanto algumas ligas de cobre estão sujeitas à formação de fissuras se forem aquecidas muito rapidamente quando o metal está sob alta restrição/imobilização durante o processo [32].

Como mencionado anteriormente, devem-se tomar as devidas precauções aquando da seleção de uma atmosfera que seja inerte em relação a todos os metais inerentes no processo de ligação. O vácuo pode degradar certos materiais, nomeadamente o latão a temperaturas de brasagem, devido à perda de zinco por

volatilização em consequência da elevada pressão de vapor deste elemento. Da mesma forma, ligas contendo manganês são instáveis em elevado vácuo a temperaturas muito acima dos 750 °C e não são recomendados para utilização nestas condições. A figura 10 apresenta as temperaturas de ebulição/sublimação de elementos selecionados a 10^{-10} atm (10^{-2} MPa). Para os metais a serem unidos sob pressão reduzida, as temperaturas do processo devem ser consideravelmente inferior à temperatura de ebulição/sublimação [33].

Element	Boiling/sublimation temperature	
	°C	°F
Cd	100	212
Zn	150	302
Mg	210	410
Sb	300	572
Bi	350	662
In	525	977
Mn	550	1022
Ag	630	1166
Al	725	1337
Sn	730	1346
Cu	780	1436
Cr	800	1472
Au	880	1616
Pd	905	1661
Fe	950	1742
Co	1020	1868
Ni	1025	1877
Ti	1130	2066
Mo	1680	3056
W	2230	4046

Values are rounded. Note the high position of tin and the low position of manganese and zinc in the table in relation to their melting points.

Figura 10 - Temperatura de ebulição/Sublimação de alguns elementos químicos [33].

Os latões são amplamente utilizados na indústria e em aplicações ligadas à engenharia devido à sua elevada resistência à corrosão, elétrica e por possuírem uma alta condutividade térmica. Eles são facilmente moldados, no entanto, são materiais de difícil união por soldadura. O principal problema com estas ligas em processos de soldadura é a evaporação do zinco durante o processo de soldagem. Após a união, o metal de solda torna-se poroso. Além disso, uma vez que a quantidade de zinco na liga é reduzida devido à evaporação, o latão perde as propriedades físicas e químicas que normalmente possui [34].

3.10. Dezincificação

A dezincificação é uma forma de corrosão na qual o zinco é atacado seletivamente, ocorre em ligas que contêm zinco, nomeadamente os latões. Os latões duplex ($\alpha+\beta$) que contêm mais do que 30% de zinco são mais propensos à perda de zinco.

Ocorre sobretudo em ligas com menos de 85% de cobre. “Lixiviação seletiva” é um termo comum, quando se refere à corrosão de um ou mais constituintes de uma liga de solução sólida [35, 36].

Um tipo de dezincificação normalmente observado é o uniforme (figura 7).

A dezincificação pode ocorrer preferencialmente em fronteiras de grão em latões α e β (figura 11).

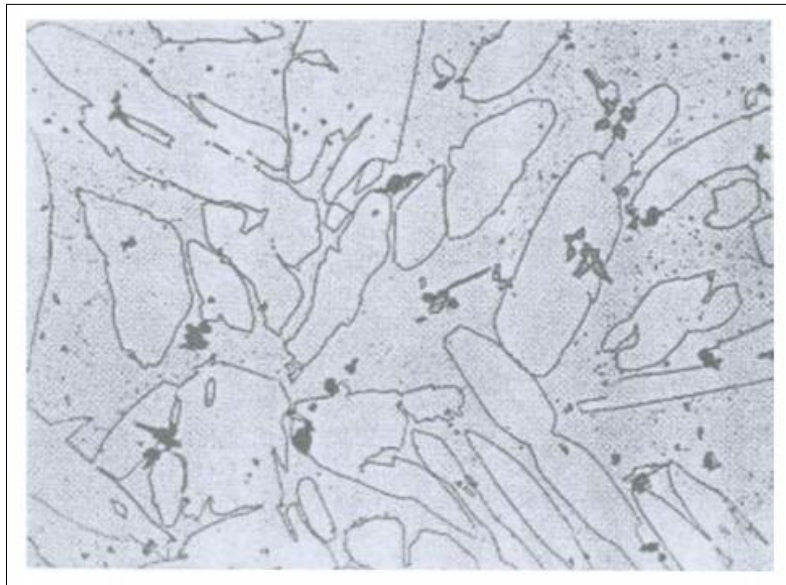


Figura 11 - Dezincificação de uma liga de latão α - β [36].

A dezincificação ocorre geralmente em água sob condições estagnadas. Ligas de latão que contenham mais do que 15% de Zn são suscetíveis à dezincificação [36].

4. Caracterização do processo de produção

Foi realizada uma descrição de um processo típico de produção que permitisse compreender de melhor forma as etapas inerentes ao processo de produção, desde a matéria-prima ao seu acabamento final. Esta caracterização é essencial quando necessitamos de proceder a uma melhoria no processo de produção ou quando pretendemos estudar variáveis que possam estar a afetar o estado final da peça tendo como objectivo a optimização do seu processo e a melhoria contínua da produção. Como tal apresentamos:

- 1) Chapa inicial de latão (CuZn37) podendo a mesma ter sido submetida a dois estados de fornecimento distintos: G030 e R350, recozida e meia dura respectivamente.
- 2) A chapa é cortada e procede-se à estampagem da mesma.
- 3) Em determinados casos, dependendo da necessidade de maior deformação, procede-se a um recozimento/aquecimento da liga, a fim de reduzir as tensões internas resultantes dos processos de conformação mecânica que a chapa é submetida. Chapas endurecidas necessitam de maior indução de calor de forma a contrariar o encruamento gerado pela deformação da chapa nos processos de conformação.

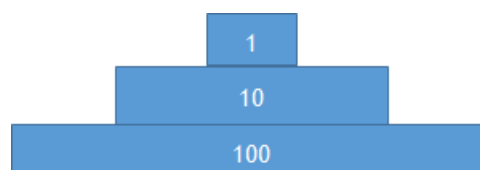
Opções: Recozimento de alívio de tensões residuais a 400°C entre 10-15 minutos (embora sendo esta opção quase sempre descartada, devido ao custo inerente do processo e do tempo que demora a realizar) ou recorrendo-se ao aquecimento da peça através do uso de um maçarico (prática mais frequente) - Nesta última operação, o controlo é significativamente menos apertado e preciso, devido à incapacidade de controlo de temperatura da chama, ficando a cargo do operador a interrupção do procedimento de aquecimento. Não é possível determinar a temperatura atingida no latão, algo que porventura poderá estar ligado ao aparecimento de defeitos.

- 4) Repuxamento - Este processo de conformação ocorre após a estampagem ou em determinados casos logo após o corte da chapa (depende da peça que estiver a ser fabricada). Neste processo de conformação mecânica volta a ser

utilizado um maçarico a fim de melhorar a capacidade de trabalho sobre a peça, com o objectivo de reduzir o encruamento.

- 5) Seguidamente, a peça poderá passar por um processo de brasagem, dependendo da sua necessidade, sendo uma vez mais sujeita a elevadas temperaturas. É utilizado um decapante ácido no decorrer deste processo. É possível voltar a constatar que no decorrer da brasagem, não existe controlo da temperatura de chama.
- 6) Polimento - é no decorrer do polimento que, de forma geral, são detetadas irregularidades/defeitos. Após o polimento e caso esteja tudo conforme, a peça passa por uma sequência de lavagens, desengorduramentos e posteriormente um banho de prata (prateação). Caso sejam detetados defeitos no polimento a peça é levada a um banho de cobre que serve de nivelador da superfície da peça, ocultando desta forma o defeito. Após este passo é que se torna então possível realizar novamente o banho de prata. Idealmente, pretende-se evitar estes dois passos, com vista a diminuir o refugo interno. Caso o defeito seja identificado apenas após a prateação, então, terá que se proceder a uma desprateação, aumentando ainda mais o tempo de reprocessamento da peça e o refugo. Esta ocorrência num panorama da gestão pela qualidade pode ser compreendida através da seguinte regra em baixo apresentada:

Regra de 1-10-100



- I. Em que o 1 representa o custo de prevenção de um defeito;
- II. O 10 retrata o custo de correção de um defeito antes de chegar ao cliente;
- III. O 100 descreve o custo de correção de um defeito depois de chegar ao cliente [37].

O problema retratado insurge-se no segundo patamar, o 10, no qual se deseja alterar de forma a evitar a criação de refugo interno.

7) Acabamento: a peça sofre um acabamento final que consiste em polir a superfície e tornando-a brilhante, sendo que após esta etapa de produção é realizada uma inspeção final da peça. A inspeção final da peça consiste numa avaliação da conformidade através de medições, ensaios ou comparações do produto final com o objetivo de identificar produtos defeituosos. O inconveniente da inspeção final é que não existe preocupação com as causas que possam ter originado um produto defeituoso.

Estes defeitos ocorrem de forma aleatória sendo quase impossível prever quando é que um determinado lote irá produzir peças conformes ou não conformes.

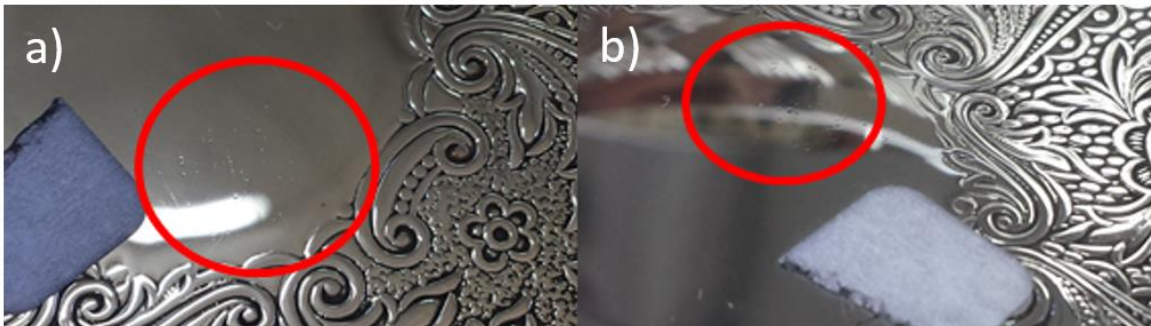


Figura 12 - Exemplos de defeitos revelados na superfície de uma peça prateada. a) Imagem obtida com ampliação. b) Imagem obtida sem ampliação.

5. Materiais e procedimento experimental

Com o objetivo de analisar microestruturas e características mecânicas foi necessário realizar uma correta preparação das amostras. Devido à baixa espessura das amostras e de irregularidades que possam existir junto da sua superfície das mesmas, foi necessário proceder a uma série de passos com vista a uma preparação adequada da amostra.

5.1. Preparação Metalográfica

Foi selecionado um conjunto de amostras de chapas com diferentes espessuras com o objetivo de serem preparadas para análise e caracterização microestrutural.

Devido ao tamanho reduzido e baixa espessura das chapas de latão foi então necessário proceder à montagem a frio das amostras. O método de preparação consistiu numa mistura de 100 mL de resina e 10 mL de endurecedor que foi depois colocado em moldes próprios juntamente com as amostras. Seguiu-se um período de endurecimento da mistura à temperatura ambiente por cerca de 12 horas. Exemplos das amostras preparadas podem ser observados na figura 13 em baixo apresentada.

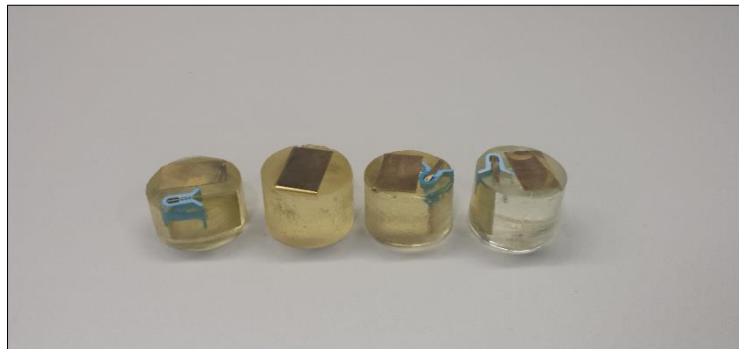


Figura 13 - Exemplo de amostras de latão montadas a frio.

Após a montagem das amostras procedeu-se à etapa de polimento que por sua vez se divide em desbaste e acabamento. Durante o desbaste foram utilizadas lixas de SiC de forma sequencial com uma granulometria de 120, 180, 320, 600 e 1000 mesh. Nesta fase o equipamento deve funcionar a uma velocidade de 300 rotações por minuto. O acabamento, por fim, permite produzir um espelhamento e brilho nas amostras e para tal utilizaram-se panos juntamente com a adição de suspensões líquidas de diamante de $6\mu\text{m}$ e posteriormente de $1\mu\text{m}$, a uma velocidade de 150

rotações por minuto. Finalizada a etapa de polimento, e já tendo garantido a remoção de todos os riscos da sua superfície bem como outras impurezas, as amostras foram sujeitas a um ataque químico, o qual permite a observação da microestrutura através de microscopia ótica.

O ataque químico foi selecionado consoante o que se pretendia observar na microestrutura. O ataque escolhido foi então uma solução de 50 mL de HNO_3 e 50 mL de H_2O , solução essa adequada para revelar fronteiras de grão, fissuras e outros defeitos. O ataque foi realizado em condições de segurança, no interior de uma *hotte* à temperatura ambiente, a amostra foi imersa na solução entre 3 a 5 segundos tendo sido de seguida lavada em água destilada e por fim submetida à sua secagem.

5.2. Microscopia ótica e quantificação do tamanho de grão

A análise microestrutural foi realizada através da utilização de microscopia ótica. Utilizou-se um microscópio óptico *Axiocam MRC5 Zeiss* (figura 14) onde foi possível registar diversas imagens das microestruturas atacadas pela solução 50 mL de HNO_3 + 50 mL de H_2O . As fronteiras de grão ficaram bem definidas assim como outros defeitos cristalinos como as fronteiras de macla. Obtiveram-se microestruturas (com objetivas de x10 e x20) com o propósito de analisar as suas propriedades e tendo como base de comparação microestruturas de ligas idênticas obtidas em bibliografia, conseguindo-se assim averiguar a sua conformidade.



Figura 14 - Microscópio Ótico Axiocam MRC5 Zeiss.

De seguida procedeu-se à quantificação do tamanho de grão, desta feita com recurso a um microscópio óptico *Leica DM4000M / DFC420* com um *software LAS*, com o objetivo de caracterizar o tamanho de grão das amostras. Esta caracterização é importante a fim de se conseguir proceder à relação entre a dureza e o tamanho de grão, relação essa descrita através da equação de *Hall-Petch*. Este *software*, por norma, faz o reconhecimento automático das fronteiras de grão a analisar, no entanto, devido à baixa precisão e exatidão de resultados na análise das amostras, foi necessário recorrer a uma ferramenta do software de caracterização que permite realizar essa análise através da edição manual dos grãos.

5.3. Microdureza Vickers

Foram realizados ensaios mecânicos de microdureza Vickers, com recurso a um durómetro - *Duramin* (figura 15). Foram selecionadas dez amostras diferentes (variando apenas a espessura da chapa) e realizadas três indentações na superfície planar de cada amostra e três indentações na superfície transversal, estando estas contidas num denominado “grupo de amostra 1”. Em seguida efetuaram-se ensaios de microdurezas Vickers num “grupo de amostras 2”, sendo estas amostras retiradas de um diferente lote de matéria-prima, com diferentes espessuras e com a particularidade de serem submetidas a ensaios mecânicos de tração. Neste grupo de amostras foram apenas selecionadas três amostras que se consideraram pertinentes de analisar face à obtenção de determinados valores através do ensaio de tração,

foram efectuadas igualmente três indentações na superfície planar de cada uma das mesmas.

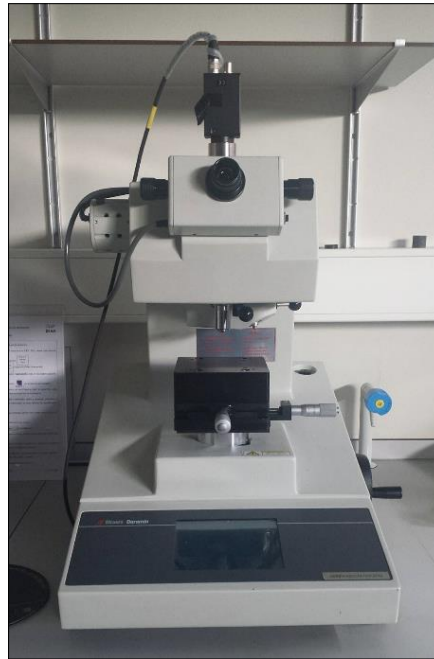


Figura 15 - Dúrometro - Duramin (Microdureza Vickers).

Os ensaios de dureza foram executados segundo a norma vigente NP EN ISO 6507-1:2011 - *Metallic materials Vickers hardness test*. Foi utilizada uma carga de indentação de 50p com uma duração de indentação de 15 segundos. O valor nominal de carga foi de 0,4903 N.

5.4. Ensaio de Tração

Para a realização dos ensaios de tração foram recolhidas novas amostras de chapas de latão utilizadas na empresa Topázio, denominadas de grupo de amostras 2. Foram selecionadas nove chapas com diferentes espessuras para a execução do ensaio, no entanto de forma a tornar os valores obtidos credíveis, procedeu-se à realização do teste de tração de pelo menos duas amostras por cada chapa. As chapas de latão foram previamente maquinadas no INEGI de forma a cumprir todos os requisitos necessários para a execução do ensaio, ao abrigo da norma NP EN ISO 6892-1:2012 B.

Os Ensaio de tração foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos do CINFU. O equipamento utilizado foi uma máquina *Shimadzu UH 1000kNI* (figura 16),

a execução do ensaio teve como principal objetivo recolher os valores de R_m - Resistência à tração, $R_{p0,2}$ - tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, A - extensão após rotura e deformação homogénea.



Figura 16 - Máquina de tração Shimadzu UH 1000kNI [38].

5.5. Microscopia eletrónica de varrimento e Microanálise por raios-X

Realizaram-se análises de microscopia eletrónica de varrimento (SEM) com o intuito de obter imagens de alta resolução da superfície das amostras e realizou-se uma Microanálise por raios-X (EDS), sendo esta última uma técnica analítica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra. Foram recolhidas para análise um conjunto de três peças não conformes, um protótipo de chaleira e duas bases de garrafa, que tinham sido anteriormente rejeitadas pela empresa para venda devido à existência de defeitos visíveis na sua superfície. A análise através de SEM e EDS exige uma boa preparação das amostras, devendo as mesmas apresentar um tamanho reduzido e superfície devidamente limpa, livres de gorduras ou outras impurezas. Cortaram-se pequenas amostras onde estavam presentes esses defeitos e foram lavadas com recurso ao uso de ultrassons, acetona, secagem e a devida conservação da amostra num ambiente que não promovesse a contaminação superficial da mesma. A análise foi realizada no CEMUP e o equipamento utilizado foi um *FEI Quanta 400 FEG ESEM/EDAX Genesis X4M*. Procedeu-se à recolha de imagens de zonas específicas que continham a presença de

defeitos em três peças distintas: protótipo de chaleira, base de garrafa e aquecedor e em seguida procedeu-se à caracterização química das amostras.



Figura 17 - - Equipamento de SEM e EDS - FEI Quanta 400 FEG ESEM/EDAX Genesis X4M [39].

5.6. Análise de Termografia

A técnica de termografia permite mapear um corpo ou região, com o objetivo de distinguir áreas de diferentes temperaturas. Esta técnica permite a visualização artificial da luz dentro do espectro infravermelho.

A termografia foi realizada na *Topázio* e aplicou-se esta técnica em quatro processos de brasagem e em dois de recozimento. Foi utilizado um maçarico pequeno em peças de pequenas dimensões ou baixa espessura, sendo que em peças maciças ou de elevada espessura foi utilizado um maçarico grande. Os ensaios podem ser descritos da seguinte forma:

1. Brasagem de uma “rolha metálica” em que se utilizou uma solda de prata para brasagem juntamente com um decapante em pó universal (*Super-Flo*) especialmente desenvolvido para ligas de brasagem com largo intervalo de fusão (550-800°C). Esta liga e este fluxo foram utilizados em todas as operações de brasagem.
2. Brasagem aplicada para o processo de união entre duas chapas de latão de fina espessura. Neste processo utilizou-se um maçarico pequeno.
3. Repetiu-se um ensaio de brasagem para o processo de união entre duas chapas metálicas, sendo que neste ensaio optou-se pela escolha de um maçarico grande.

4. Brasagem de um componente de um “bule” em latão.
5. Recozimento de um “vaso” em latão. Este recozimento foi realizado através da utilização de um maçarico grande em que o material foi recozido em movimento rotativo do material de forma a uniformizar o aquecimento da peça. Este recozimento é realizado no processo de repuxamento de forma a aliviar as tensões internas do material, diminuindo o seu encruamento e consequentemente aumentando a sua capacidade de deformação.
6. Recozimento de “tiras entrelaçadas” de latão com baixa espessura. Devido às pequenas dimensões do material optou-se por um maçarico pequeno.

Em todos os ensaios enunciados foram realizados mapas de temperatura das peças com recurso a uma câmara termográfica *Flir* e reproduziu-se uma simulação realista de uma operação de brasagem e recozimento.

6. Análise e discussão de resultados

A fim de tentar ajudar a procurar as causas e anomalias existentes nos materiais anteriormente evidenciados, neste capítulo, analisou-se e discutiu-se os resultados obtidos nos diversos ensaios mecânicos e metalográficos.

6.1. Análise de microestruturas através de microscopia ótica

A figura 18 apresenta uma microestrutura da amostra A, uma chapa metálica de CuZn37 recozida (G030) com uma espessura de 1,8 mm, obtida através de microscopia ótica. É possível observar as fases α e β , sendo α a fase mais escura do grão e β a mais clara.

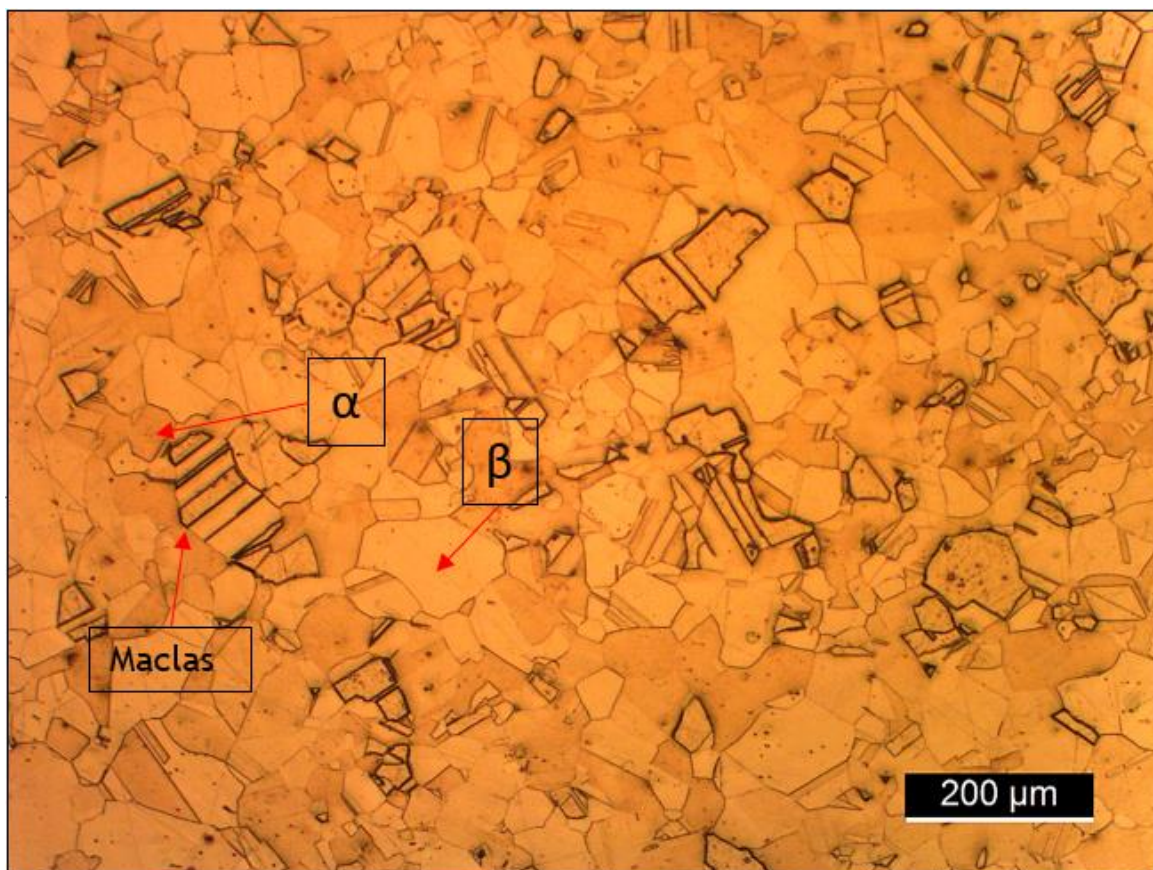


Figura 18 - Microestrutura da amostra A com um estado de fornecimento G030 obtida através de microscopia ótica.

As maclas são resultantes de deslocamentos atômicos produzidos por tensões de corte (maclas de deformação) ou durante a realização de um tratamento térmico

(maclas de recozimento). As maclas de recozimento ocorrem por norma em metais com estrutura CFC (fase α da liga CuZn37) e as de deformação são observáveis em metais CCC (fase β da liga CuZn37). Podemos admitir que a formação de maclas se deve à deformação mecânica realizada, quer por laminagem, estampagem, repuxamento ou por outro processo de conformação a frio, no entanto não se pode descartar a possibilidade de ocorrência da formação das maclas se dever a realização de um tratamento térmico de recozimento (G030).

Outro exemplo semelhante ao retratado na figura 18 está apresentado na figura 19:

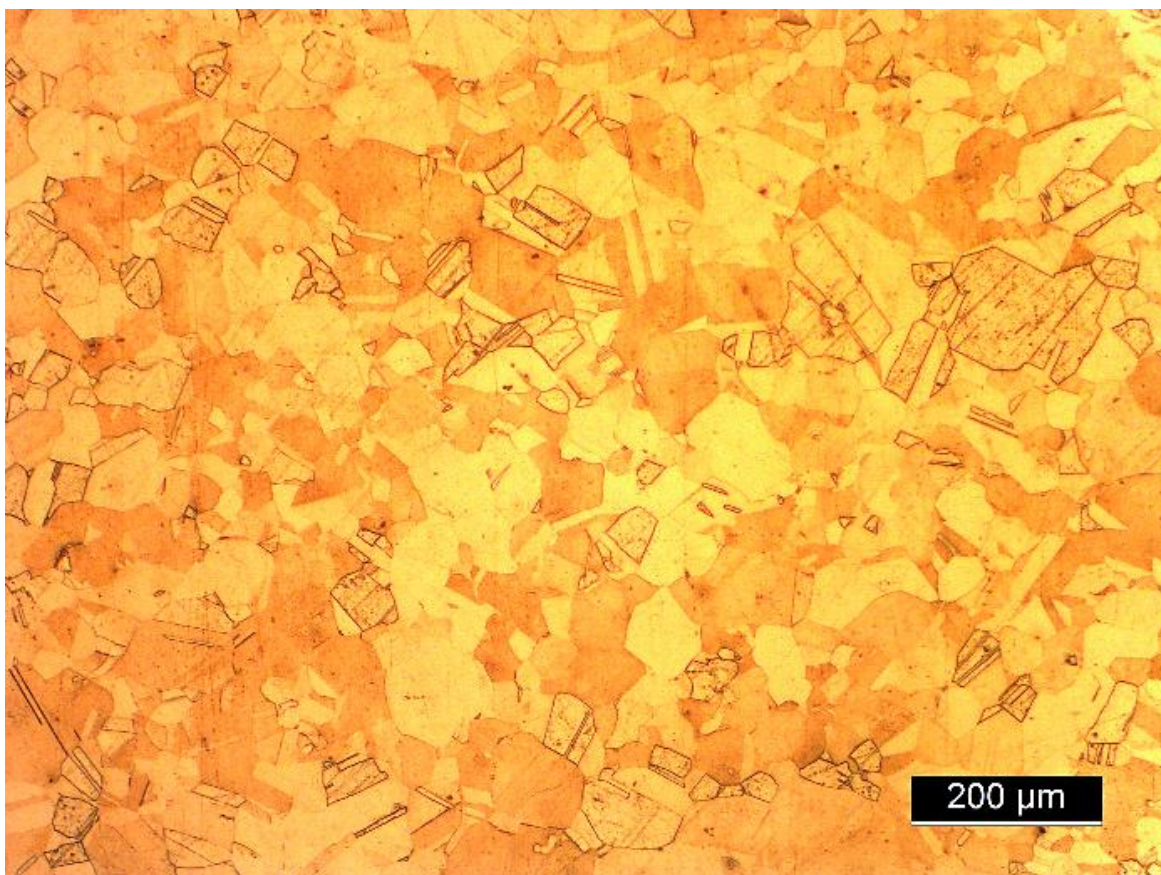


Figura 19 - Microestrutura da amostra b, com um estado de fornecimento G030, obtida por microscopia ótica.

Para comparação, a figura 20 ilustra a microestrutura de uma chapa de latão CuZn37 (obtida na bibliografia) com as fases α e β apresentadas e identificadas, não sendo no entanto possível identificar a existência de maclas de deformação ou de recozimento.

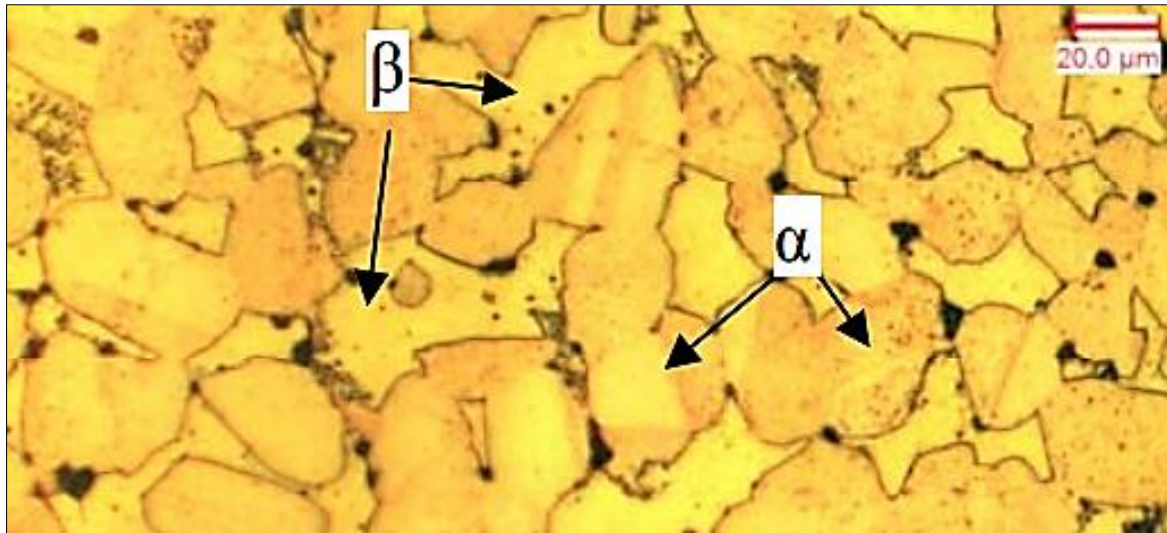


Figura 20 - Microestrutura de um latão CuZn37 ($\alpha+\beta$) após ataque químico de uma solução de 50 ml de HNO_3 65% e água destilada [40].

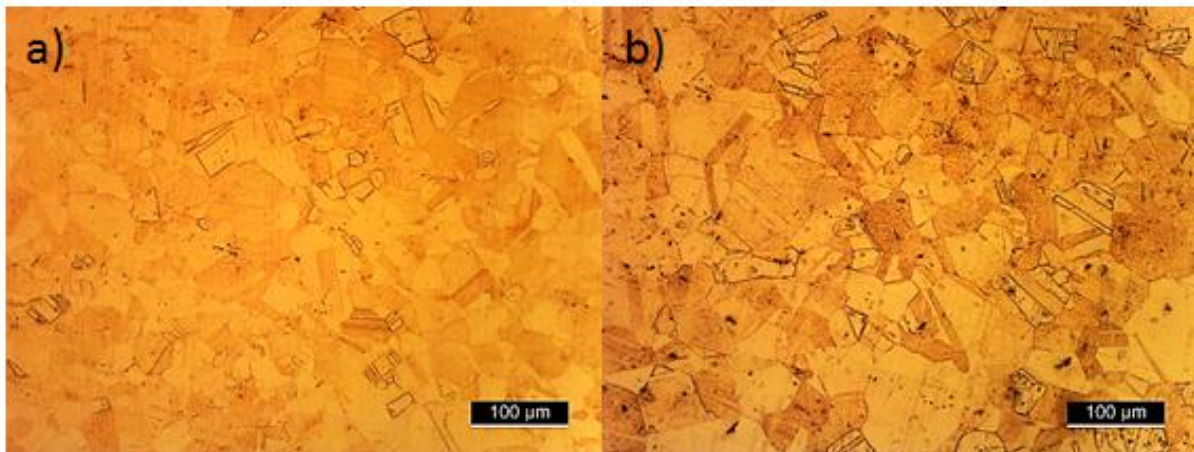


Figura 21 - Microestruturas de um latão CuZn37 obtidas por microscopia ótica. a) Amostra F com uma espessura de 2,5mm que sofreu um tratamento R350. b) Amostra G com uma espessura de 4mm que foi submetida a um tratamento R350.

As imagens da figura 21 apresentam duas microestruturas de um latão CuZn37 reveladas após um ataque químico de uma solução de 50 mL de HNO_3 e 50 mL de H_2O . As microestruturas são relativamente semelhantes, sendo que a amostra F tem uma espessura de 2,5mm e amostra G espessura de 4mm. As duas chapas foram, segundo a sua ficha técnica, submetidas a um endurecimento R350 (meio duro) o que provoca um aumento da sua dureza, entre outras propriedades mecânicas.

As fases α e β são visíveis em ambas as imagens assim como a existência de maclas de deformação possivelmente geradas por deformações mecânicas prévias, efeitos da realização de laminagens na chapa metálica.

6.2. Durezas

Conforme referido no procedimento experimental, foram realizadas durezas no grupo de amostras 1, que contemplava dez amostras diferentes com espessuras distintas. Foi possível constatar valores de dureza bastante elevados nas amostras G, G', F e F' em comparação com as restantes amostras, sendo possível analisar os seus valores na tabela em baixo apresentada.

Tabela 5 - Durezas obtidas no grupo de amostras 1.

Amostras	Estado de Fornecimento	Espessura (mm)	Média Durezas (HV)	Variância (σ)	Desvio Padrão ($\sqrt{\sigma}$)
A	G030	1,8	90	2,33	1,53
A'	G030	1,8	91	1,00	1,00
B	G030	1,8	100	7,00	2,65
B'	G030	1,8	101	4,00	2,00
C	G030	1,8	100	6,33	2,52
C'	G030	1,8	99	4,33	2,08
D	G030	1,0	103	13,00	3,61
D'	G030	1,0	103	25,33	5,03
E	G030	0,8	90	0,33	0,58
E'	G030	0,8	92	6,33	2,52
F	R350	2,5	127	3,00	1,73
F'	R350	2,5	126	4,33	2,08
G	R350	4,0	126	4,33	2,08
G'	R350	4,0	126	2,33	1,53
H	G030	0,6	95	9,33	3,06
H'	G030	0,6	95	13,00	3,61
I	Desconhecido	1,5	101	5,33	2,31
I'	Desconhecido	1,5	101	4,33	2,08
J	Desconhecido	1,2	93	0,33	0,58

Os resultados obtidos nas amostras F, F' e G, G' justificam-se pelo endurecimento prévio do material de modo a provocar uma resistência à tração próxima dos 350 MPa. Este endurecimento (R350) provoca também um aumento da tensão de cedência e da dureza, conforme fica comprovado nos resultados de dureza obtidos. Os seus valores de dureza situam-se entre os 126-127 HV estando concordantes com os valores consultados na bibliografia para o mesmo material e estado de fornecimento, tal como se pode ver na figura 22.

Form	Temper ^(N)	Tensile Strength ton/in ²	Proof Stress 0.1% offset ton/in ²	Elongation		Vickers Hardness
				%	gauge length	
Sheet Strip	Annealed					
	grain size 0.050 mm	22	7	60	2 in.	65
	grain size 0.035 mm	22	7	58	2 in.	70
	grain size 0.025 mm	23	8	55	2 in.	80
	grain size 0.015 mm	24	9	52	2 in.	90
	Cold Worked					
	Quarter Hard	24	16	40	2 in.	100
	Half Hard	27	21	30	2 in.	130
Hard	32	26	15	2 in.	155	
Extra Hard	38	31	7	2 in.	180	

Figura 22 - Resultados de ensaios de tração de uma chapa de latão (CuZn37). Adaptado de [41].

A figura 22 revela os valores típicos de dureza para uma chapa de latão (CuZn37) no estado R350 (meio duro).

As restantes amostras sofreram um tratamento térmico de recozimento de alívio de tensões, denominado por G030, sendo desconhecida a existência de tratamentos nas amostras I, I' e J. Os valores mais baixos de dureza foram observados nas amostras A e E tendo estas um valor médio de dureza de 90 HV. Os resultados de dureza obtidos em amostras com um estado de fornecimento G030 encontram-se igualmente concordantes com os valores obtidos na bibliografia (figura 22).

Os resultados obtidos na amostra D' apresentaram uma dispersão de resultados elevada, com um valor de variância de 25,33 e desvio padrão de 5,03.

Foram realizados ensaios de microdureza a três amostras específicas do grupo de amostras 2. Estas amostras destinavam-se essencialmente aos ensaios de tração, no entanto, devido à discrepância de valores obtidos em ensaios de tração nestas três amostras (apresentadas na tabela 6), foi necessário realizar ensaios de dureza de forma a corroborar os valores obtidos nos ensaios de tração.

Tabela 6 - Durezas obtidas no grupo de amostras 2

Amostra	Média Durezas (HV)	Variância (σ)	Desvio Padrão ($\sqrt{\sigma}$)
E	93	14,33	3,79
F	135	25,33	5,03
H	124	12,33	3,51

Na ficha técnica das chapas de CuZn37 verifica-se que é desconhecido o seu estado de fornecimento. Os resultados obtidos mostram que a amostra F apresenta valores de dureza ligeiramente superiores aos da amostra H, sendo presumível que o estado de fornecimento desta mesma seja o mesmo que a amostra H (R350). Os valores registados da amostra E vão, novamente, de encontro aos valores obtidos nas chapas do grupo de amostra 1 com o mesmo estado de fornecimento (G030).

6.3. Quantificação do tamanho de grão

Foi utilizado um *software* LAS com o objetivo de caracterizar o tamanho de grão das amostras A2, G2 e H2 (pertencentes ao grupo de amostras 2). Devido à impossibilidade do uso da ferramenta do *grain expert*, que permite uma identificação automática dos grãos, foi utilizada uma ferramenta de edição manual.

Esta ferramenta de edição manual, para além de mais demorada e incerta, é mais limitada na apresentação de resultados. Através desta ferramenta foi possível obter o valor das áreas dos grãos, contudo, foi necessário recorrer a uma fórmula matemática para a obtenção do valor do diâmetro das amostras, calculando posteriormente o respetivo valor médio dos diâmetros dos grãos. Foram realizadas 200 medições de grãos. A partir da equação 1 em baixo apresentada, foi possível calcular o diâmetro do grão.

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{Equação 1}$$

A tabela 7 apresenta os diâmetros médios de grão obtidos, o respetivo número de medições (N) realizadas por amostra e também o respetivo valor de dureza.

Tabela 7 - Diâmetros médios de grão dos três provetes do grupo de amostras 2 analisado

Amostras	N	Diâmetro de grão médio (μm)	Durezas (HV)	Estado de Fornecimento	$\frac{1}{\sqrt{\text{HV}}}$
A2	200	72,02	90	G030	0,105
G2	200	60,10	126	R350	0,089
H2	200	59,41	127	R350	0,089

A amostra A2, que foi submetida a um tratamento térmico G030 (recozimento) apresentou o maior valor de diâmetro médio de grão, sendo que G2 e H2 foram fornecidas no estado R350 (meio duro), apresentando os menores valores.

A figura 23 representa graficamente a relação de Hall-Petch em que se relaciona o diâmetro médio de grão (μm) e a dureza.

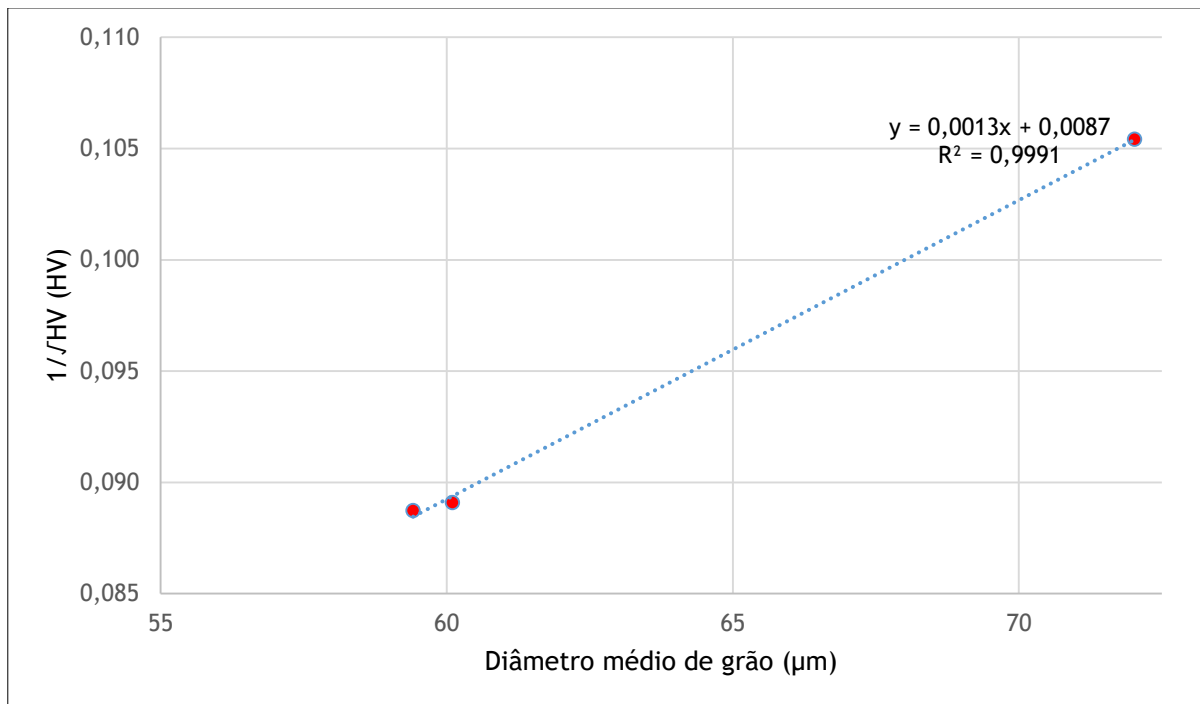


Figura 23 - Gráfico de regressão linear entre o diâmetro médio de grão (μm) e a dureza (HV) de três amostras.

A relação de Hall-Petch mostra que a diminuição do tamanho de grão provoca um aumento da resistência mecânica e conseqüentemente um aumento da dureza. A tabela 7 e a figura 23 provam exatamente essa teoria. Podemos constatar que amostras com maior diâmetro médio de grão apresentam valores inferiores de dureza considerando-se assim a relação inversamente proporcional. É, no entanto,

necessário referir que estamos a comparar amostras com tamanhos de grão e durezas próximos, e estados de fornecimento diversos, que podem afetar esta relação.

6.4. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ISO 6892-1:2012 B. As amostras apresentadas na tabela 7 pertencem ao grupo de amostras 2.

Tabela 8 - Resultados das principais características de ensaios de tração em provetes de latão (CuZn37)

Amostras	Espessura (mm)	Estado de Fornecimento	Rp 0,2% (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Alongamento (%)
A1	1,8	G030	130	334	70,3
A2	1,8	G030	125	337	69,3
B1	0,8	G030	124	339	62,7
B2	0,8	G030	112	345	65,8
C1	1	G030	135	361	59,7
C2	1	G030	154	362	56,3
D1	1,2	Indisponível	19	363	61,5
D2	1,2	Indisponível	143	348	57,5
E1	1,5	Indisponível	120	336	68,8
E2	1,5	Indisponível	121	336	69,5
F1	2	Indisponível	256	381	48,2
F2	2	Indisponível	263	378	46,4
G1	2,5	R350	139	341	68
G2	2,5	R350	138	341	68,9
H1	3	R350	297	401	47,9
H2	3	R350	299	399	49,7
I1	0,6	G030	125	339	63,2
I2	0,6	G030	133	348	58,1

Constatou-se que as amostras (H2; H1; F2 e F1) apresentaram os maiores valores de tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% ($R_{p0,2}$) estando os seus resultados situados entre 256 e 299 N/mm². De igual forma, é possível verificar que as mesmas amostras apresentam os maiores valores de resistência à tração (R_m) com a amostra H1 a apresentar um valor de R_m de 401 N/mm².

As figuras 24 e 25 apresentam gráficos da resistência mecânica da liga CuZn37, obtida através de um ensaio de tração nas amostras F1 e H1, respetivamente.

Date : 2016-03-03 Norma de Ensaio : ISO 6892-1:2012 B
 Equipamento : Maquina Shimadzu UH 1000kNI Requisitante : João
 Ref do Provete : F 1 Vossa Ref :
 Data Entrada : Amostra :
 Nossa Ref : Endereco :

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length	N CONTRIBUINTE	NORMA DE PROVETE
Units	mm	mm	mm		
1 - 1	1.9800	12.4000	30.0000	0	ISO 6892-1:2012 B

Name	Modulo Elastico	Rp0,2%	Fm	Break(grafico)	% A
Parameter	1000, 5000 N	0.2 %			
Units	N/mm2	N	N	mm	%
1 - 1	82255.0	6273.1	9349.4	14.1	48.2

Name	Re	Rm	Z	Lu_Final
Parameter	0.2 %			
Units	N/mm2	N/mm2	%	mm
1 - 1	255.5	380.8	-0.5	44.4600

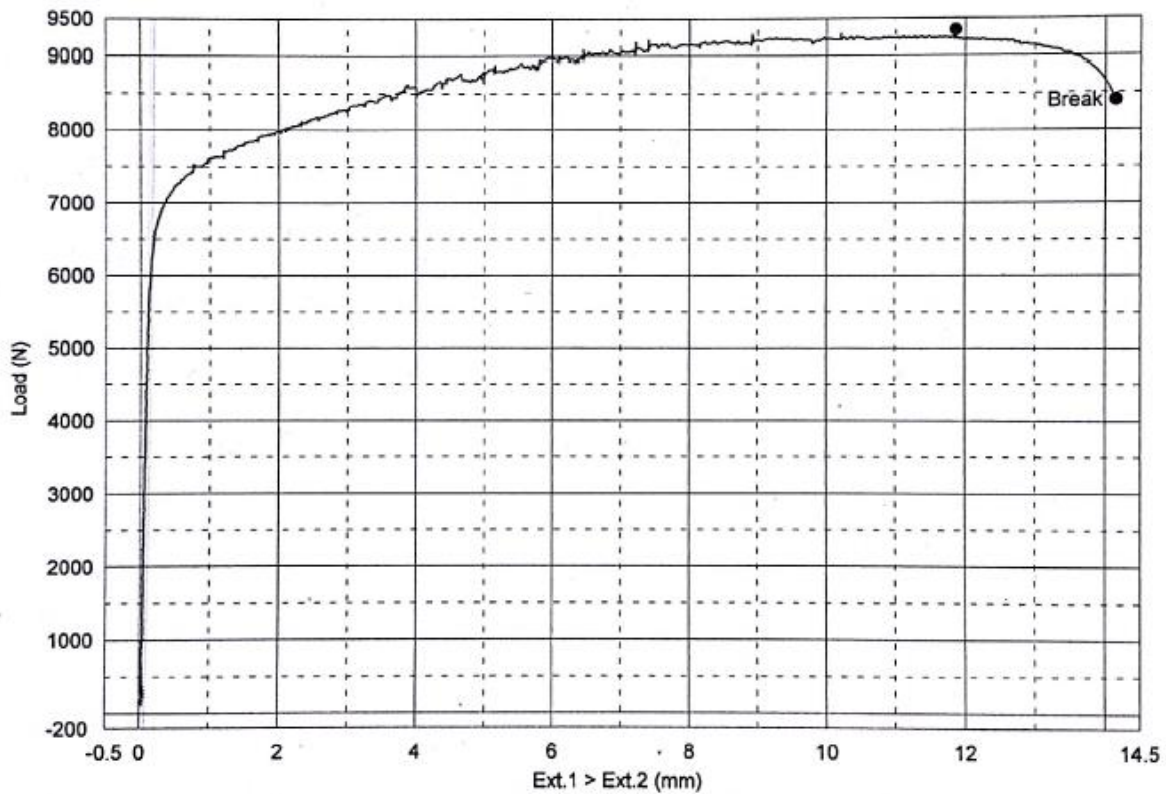


Figura 24 - Gráfico da resistência mecânica de um ensaio de tração realizado na amostra F1

Date : 2016-03-08
 Equipamento : Máquina Shimadzu UH 1000kN
 Ref do Provete : H 1
 Data Entrada :
 Nossa Ref :

Norma de Ensaio : ISO 6892-1:2012 B
 Requisitante : João
 Vossa Ref :
 Amostra :
 Endereco :

Shape: Plate

	Thickness	Width	Gauge Length	N CONTRIBUINTE	NORMA DE PROVETE
Units	mm	mm	mm		
1 - 1	2.9900	12.4600	30.0000	0	ISO 6892-1:2012 B

Name	Modulo Elastico	Rp0,2%	Fm	Break(grafico)	% A
Parameter	1000, 10000 N	0.2 %			
Units	N/mm2	N	N	mm	%
1 - 1	105956.	11079.4	14953.1	13.8	47.9

Name	Re	Rm	Z	Lu_Final
Parameter	0.2 %			
Units	N/mm2	N/mm2	%	mm
1 - 1	297.4	401.4	0.0	44.3700

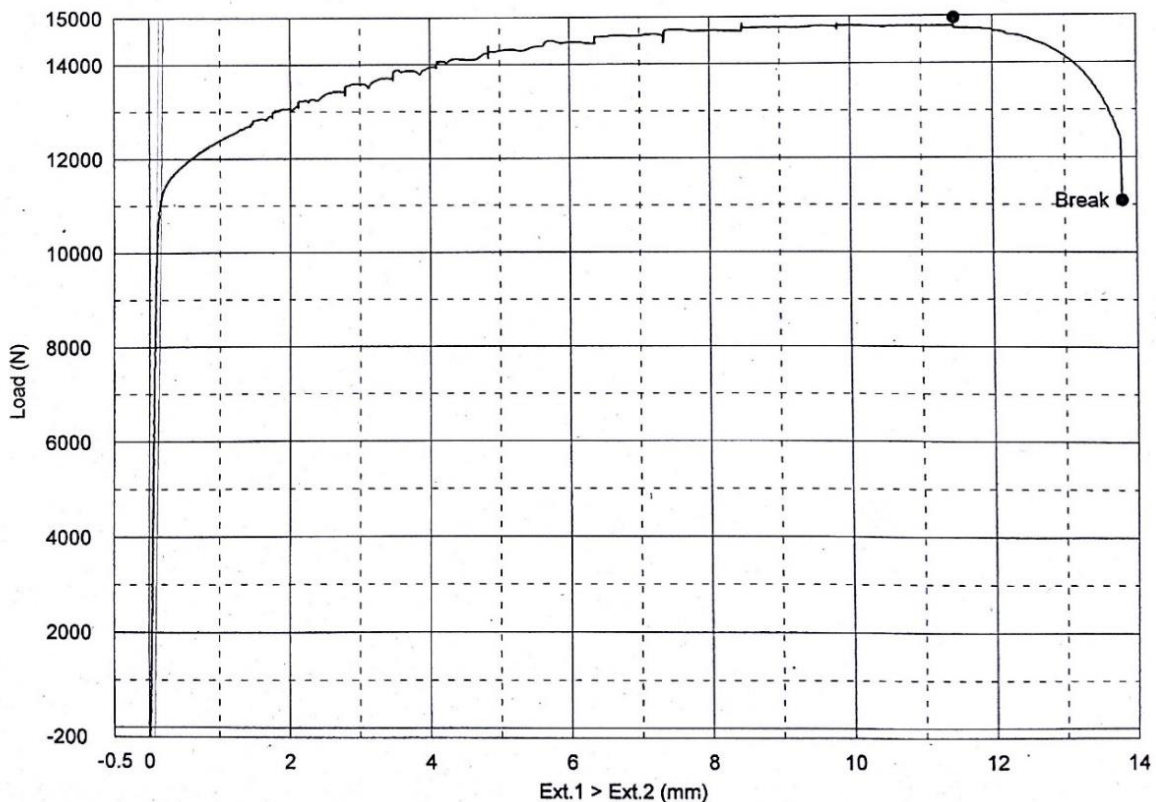


Figura 25 - Gráfico da resistência mecânica de um ensaio de tração realizado na amostra H1

Após analisar estes resultados dos ensaios de tração é possível afirmar que existe uma enorme discrepância de resultados entre estas amostras anteriormente retratadas e as restantes, tendo em conta que estamos a analisar chapas iguais. A figura 26 apresenta um gráfico da resistência à tração da amostra G1 que foi fornecida no estado R350, o mesmo que o realizado na amostra H1.

Comprova-se através da análise dos gráficos (das figuras 25 e 26) as diferenças existentes nos valores de $R_{p0,2}$ entre duas amostras do mesmo material, e estado de fornecimento também igual.

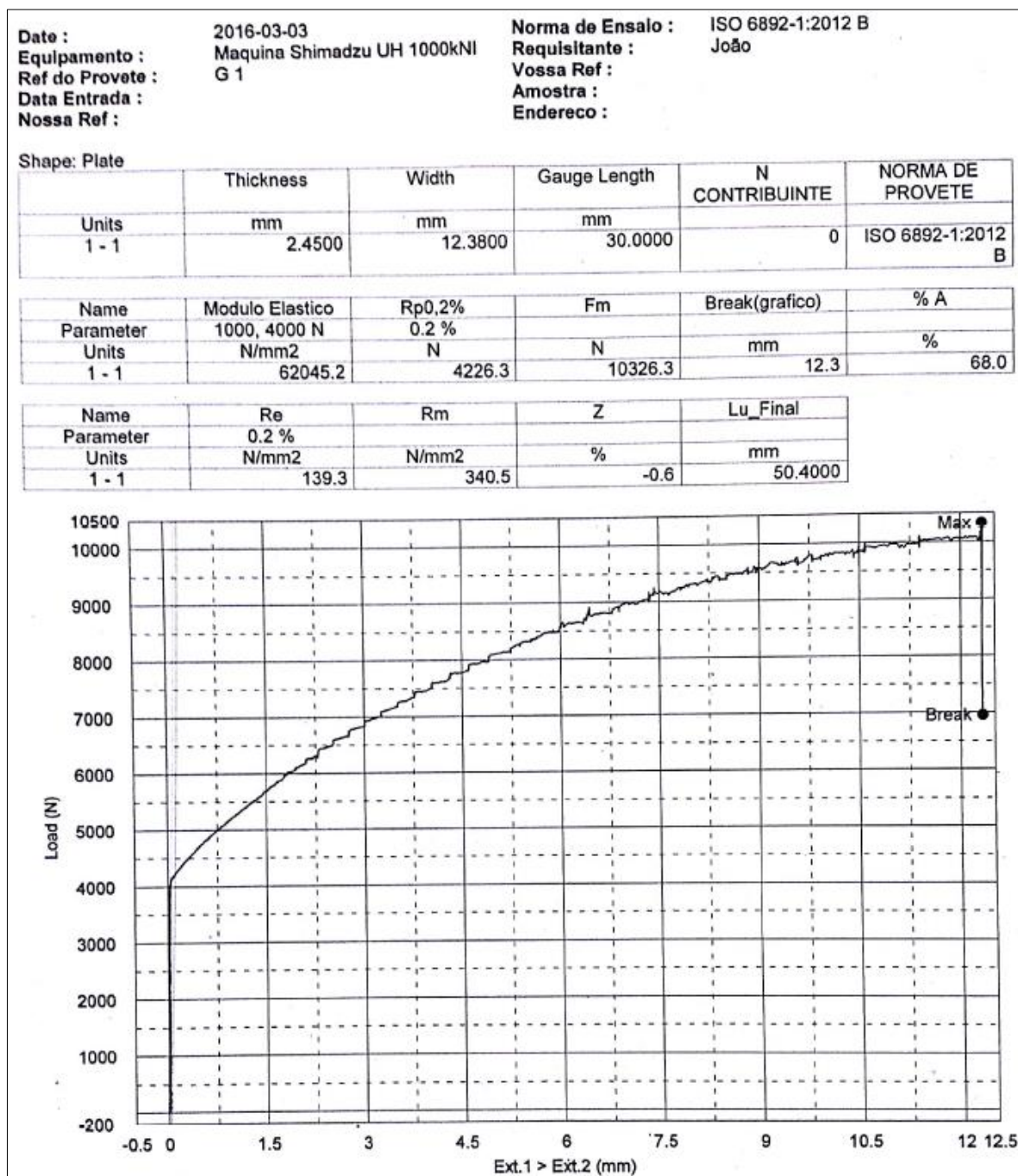


Figura 26 - Gráfico da resistência mecânica obtida por ensaios de tração da amostra G1

Segundo os fornecedores, as amostras H1 e H2 estão no estado meio duro (R350), aumentando o seu R_m e $R_{p0,2}$ e, conseqüentemente, diminuindo o seu alongamento. As amostras F1 e F2 apresentam valores similares aos anteriores, no

entanto não existe informação sobre a existência de um tratamento térmico nestas chapas, sendo assim sendo assim presumível que estejam no mesmo estado.

Uma incongruência detetada ao analisar estes ensaios prende-se com os valores obtidos das amostras G2 e G1 que apresentam valores de R_m bastante inferiores a 350 N/mm^2 (valor mínimo exigível tendo em conta o estado R350). Os valores de alongamento foram muito similares a amostras que tenham sofrido um tratamento térmico de recozimento de alívio de tensões (G030). Segundo a ficha técnica do material em causa, esta chapa deveria estar no estado R350 (igual ao das amostras H1 e H2) mas os resultados de tração indicam um estado diferente.

Em relação aos valores de alongamento, verificaram-se valores superiores em amostras com um estado de fornecimento G030, o que é expectável visto que este tem uma capacidade de deformação superior face a amostras no estado meio-duro R350 tendo consequentemente valores de R_m e $R_{p0,2}$ inferiores. Verificou-se no entanto, que os valores de alongamento obtidos em todas as amostras são consideravelmente superiores aos consultados na bibliografia para o mesmo estado.

6.5. SEM e EDS

A análise realizada por SEM permitiu registar imagens de alta resolução das superfícies das amostras. Ficaram explícitos os defeitos existentes na superfície das mesmas. A figura 27 identifica 4 zonas (Z1, Z2, Z3 e Z4) aparentemente defeituosas e 1 zona presumivelmente conforme (Z5). A peça analisada nesta corresponde a um protótipo de chaleira sendo o seu material a liga de latão (CuZn37) maioritariamente composta por Cu e Zn, juntamente com a presença de elementos de liga em percentagens bastante residuais.

A análise por EDS geralmente envolve a criação de um espectro de raios-x a partir de toda a área analisada pelo SEM e serviu para realizar uma caracterização química das amostras, nomeadamente das zonas identificadas (figura 28). O eixo dos Y mostra-nos as contagens (*counts*) que estão relacionadas com o número de raios-X recebidos e processados pelo detetor sendo que o eixo dos X representa o nível de energia (keV) das referidas contagens, que permite a identificação dos diferentes elementos.

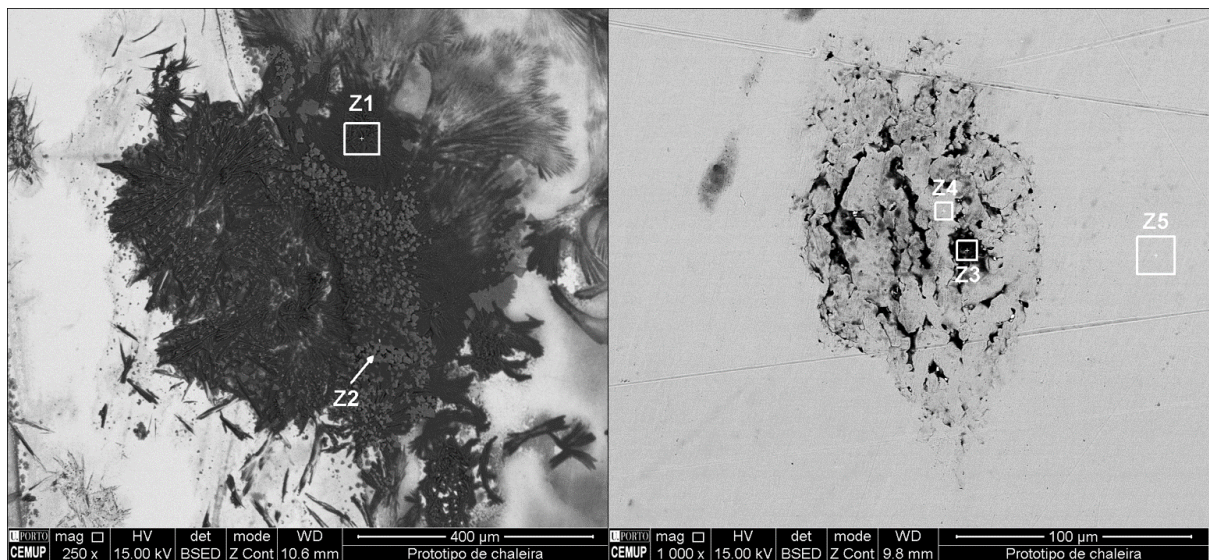


Figura 27 - Imagens obtidas por SEM, de defeitos existentes num protótipo de chaleira. À esquerda identificação das zonas Z1 e Z2. À direita identificação das zonas Z3, Z4 e Z5.

A zona Z1 regista uma zona com uma grande presença de óxidos (O) e uma presença ligeira de Na e K. Esta amostra não passou por nenhum processo de lavagem ou deposição em meio aquoso, admitindo-se que o aparecimento destes elementos se deveu à contaminação do meio onde estava inserida.

A zona Z2 representa uma zona com a presença de óxidos de e Na em grande quantidade, este espectro identifica também K e P em concentrações francamente inferiores.

A zona Z3 remete a análise para um diferente defeito na superfície da amostra, sendo possível observar na imagem SEM (figura 27) uma reentrância na sua superfície. A análise EDS apresenta essencialmente Cu e Zn, no entanto, é possível verificar a existência de O, C (em quantidade superior à dos restantes espectros), Si e Ca em pequenas quantidades.

A zona Z4 é uma zona crítica devido à inexistência de Zn (segundo elemento mais preponderante desta liga com uma percentagem de 37%). Aparentemente, nesta zona ocorreu a volatilização do Zn na liga o que pode justificar a porosidade observada.

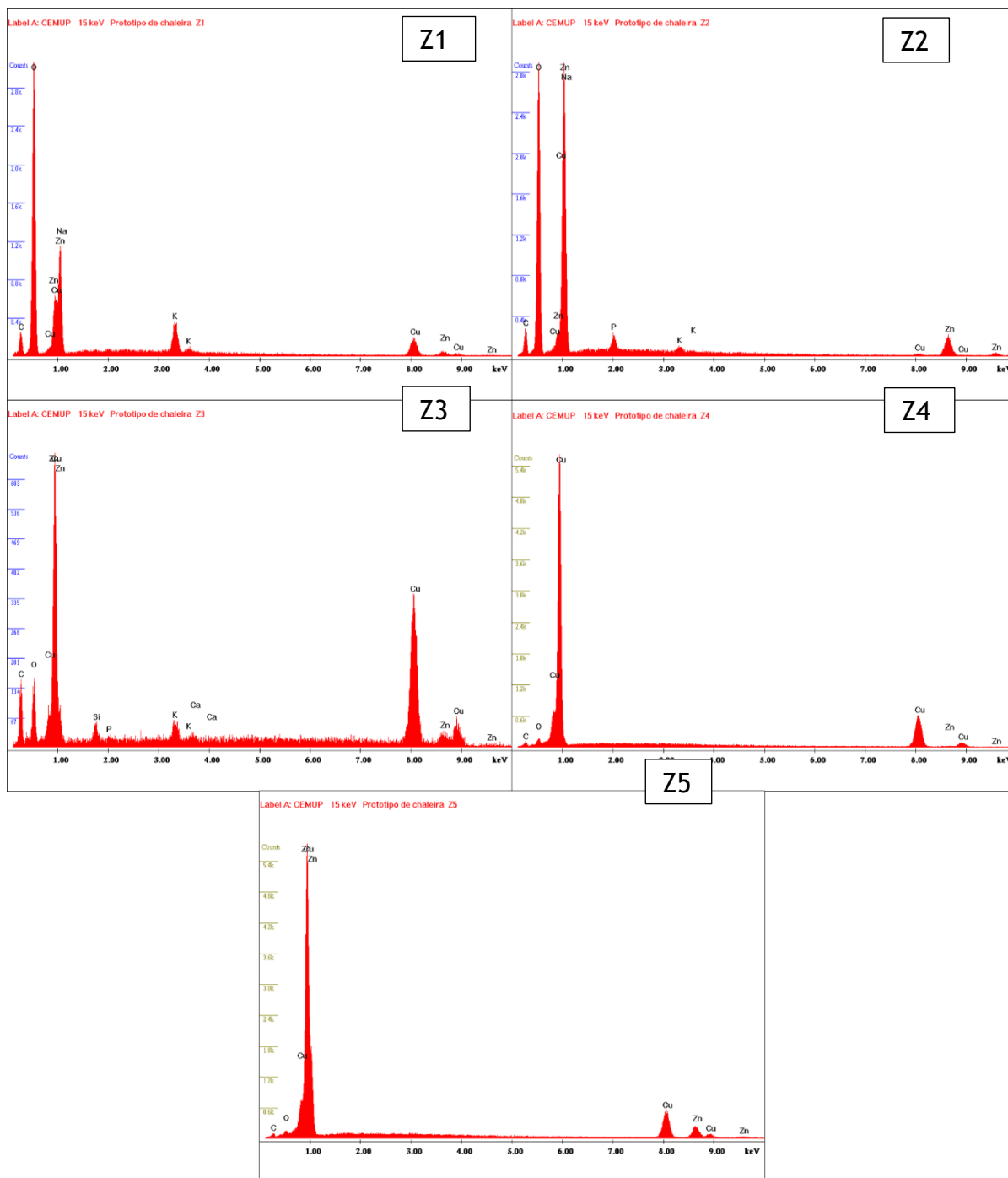


Figura 28 - Gráficos de análise EDS das respectivas zonas assinaladas nas imagens SEM apresentadas na figura 24

A zona Z5 foi uma região selecionada do material base sem defeitos que serviu de base de comparação com as restantes zonas analisadas. Esta zona apresenta Cu e Zn de forma equilibrada. De notar a presença de O de forma residual, derivado provavelmente da oxidação natural da superfície da peça.

A figura 29 mostra uma imagem SEM de outra peça, na figura está indicada uma zona (Z3) em que se fez a análise apresentada nesta figura. A peça é uma base de garrafa, em que o material analisado é a liga de latão (CuZn37) com a particularidade de já ter sido depositado um banho de prata. A prateação realizada na peça torna-se indesejável na análise por EDS, pois embora tenha uma espessura de prata de poucos micrómetros, esta afeta os resultados.

A zona Z3 salienta uma reentrância na superfície, nessa região são detetados por EDS maioritariamente Ag (prata) e pequenas quantidades de Al, O, Mg, Cu, Si e F. Foi detetada a presença de Zn o que poderá indicar dezincificação. Deve ser referido que o revestimento de prata poderá ter dificultado a deteção deste elemento.

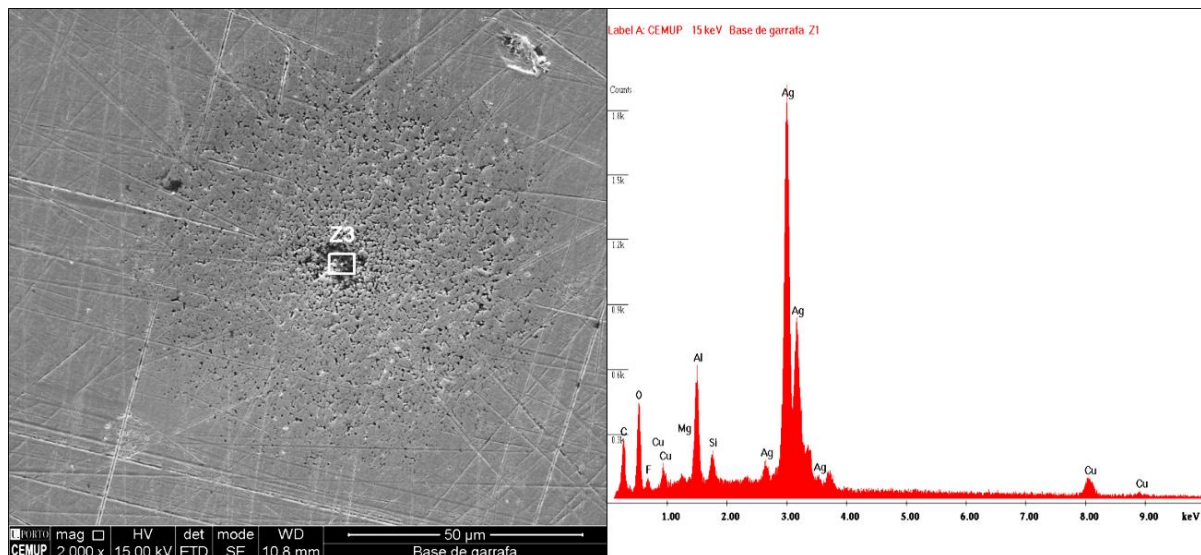


Figura 29 - À esquerda: Imagem obtida por SEM e identificação da zona Z3. À direita gráfico EDS da respetiva zona Z3.

A figura 30 corresponde a uma imagem obtida por SEM e o respetivo gráfico EDS caracterizando a composição da amostra na região Z1. A análise foi realizada numa base de garrafa prateada denominada como “base de garrafa 2”.

A zona Z1, ao contrário da imagem anterior, apresenta uma saliência na superfície da amostra tendo sido caracterizados apenas dois elementos: a prata (em maior quantidade) e o cloro. A presença do Cl poder-se-á dever a uma contaminação pelo meio ambiente ao qual a peça esteve exposta ou, em alternativa, a uma contaminação da peça durante o banho de prata.

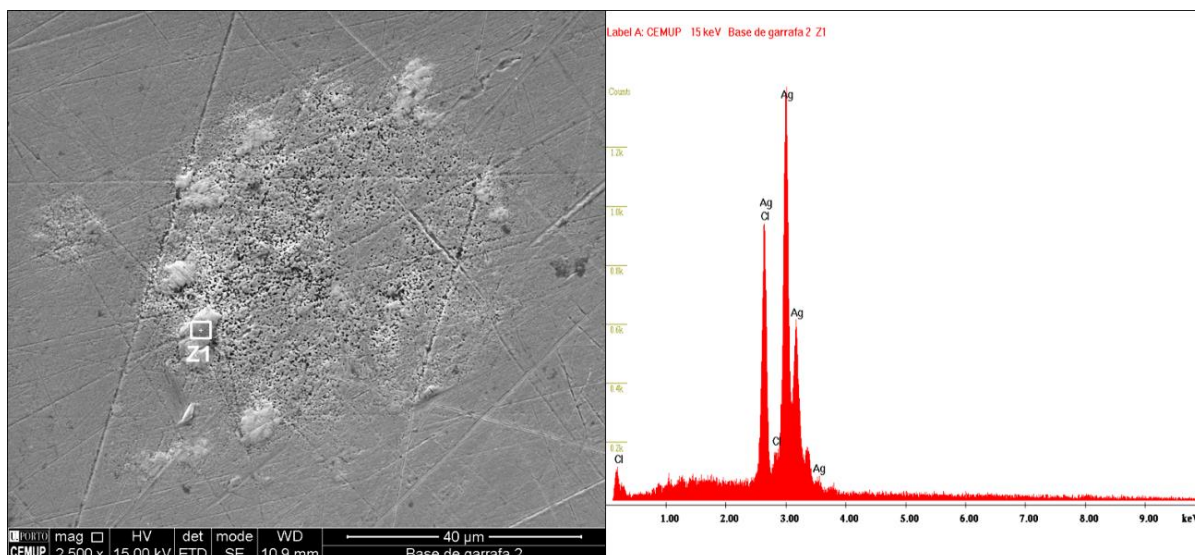


Figura 30 - À esquerda: Imagem obtida por SEM e identificação da zona Z1. À direita: gráfico EDS da respetiva zona Z1.

6.6. Análise de Termografia

A técnica de termografia permite-nos mapear um corpo ou região com o objetivo de distinguir áreas de diferentes temperaturas. Permite a visualização artificial da luz dentro do espectro infravermelho. Aplicou-se esta técnica de termografia em seis simulações de processos recorrentes na empresa que se encontram descritos na tabela 9.

Tabela 9 - Especificações detalhadas das análises de termografia realizadas.

Imagem	Material	Aplicação	Tipo de maçarico	Temperatura máxima (°C)
1	Rolha metálica (Latão)	Brasagem	Normal	664,9
2	União duas chapas (latão)	Brasagem	Normal	770
3	União duas chapas (latão)	Brasagem	Grande	851,5
4	Bule (Latão)	Brasagem	Normal	711,4
5	Vaso (Latão)	Recozimento	Grande	658,4
6	Tiras entrelaçadas (Latão)	Recozimento	Normal	624,6

As temperaturas registadas nas diversas análises, conforme pode ser visto na figura 31, estão de uma forma geral, concordantes com a gama de temperaturas atingidas quer em processos de brasagem por tocha manual, quer em processos de recozimento.

De salientar a diferença de temperaturas atingida entre a imagem 2 e 3, com uma diferença de cerca de 80 °C. Esta diferença poder-se-á dever ao uso de um maçarico grande na imagem 3, que provocou um considerável aumento da temperatura já próxima da temperatura de fusão da liga CuZn37 (≈ 920 °C). Estas temperaturas não são aconselháveis, sendo então mais apropriado a utilização de um maçarico normal.

A temperatura atingida pelo vaso foi ligeiramente superior ao necessário para a realização de um recozimento. Este aumento pode dever-se ao facto de ser uma peça maciça e de mais difícil aquecimento, ficando exposta a temperaturas elevadas durante mais tempo.

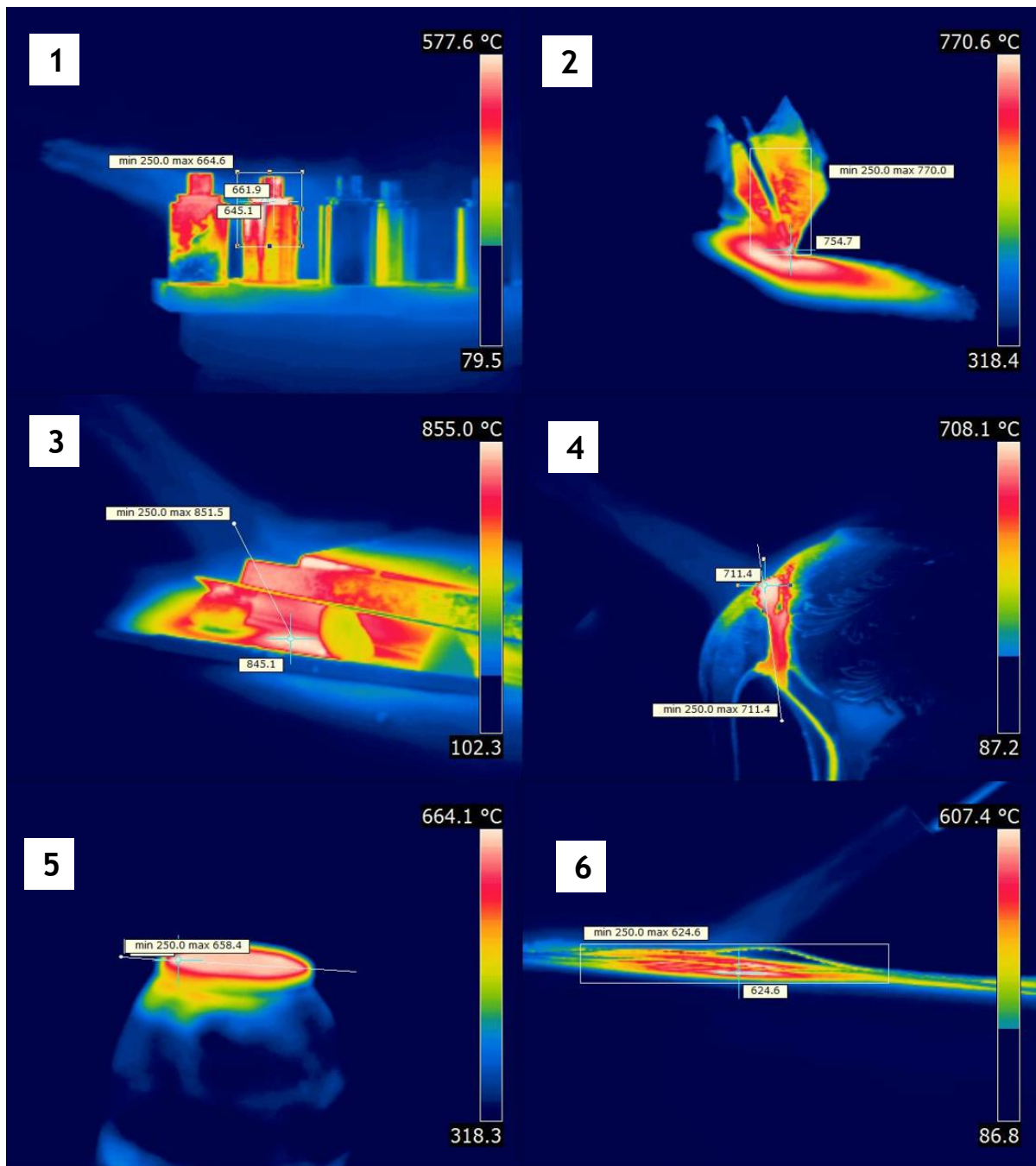


Figura 31 - Imagens obtidas por termografia. 1) Brasagem da rolha metálica. 2) Brasagem de chapas com maçarico normal. 3) Brasagem de chapas com maçarico grande. 4) Brasagem de bule. 5) Recozimento de vaso. 6) Recozimento de tiras entrelaçadas

7. Conclusões

Esta dissertação teve como principal objetivo a realização de uma caracterização microestrutural e mecânica de amostras de uma liga de CuZn37, bem como a identificação e posterior análise de defeitos em produtos não conformes.

As microestruturas revelaram a existência de maclas de deformação e tamanhos de grão próximos. Considerando-se a relação de Hall-Petch, procedeu-se à caracterização do grão e constatou-se que amostras com maior diâmetro médio de grão apresentaram valores inferiores de dureza, provando-se a esperada relação entre a dureza e o tamanho de grão.

Os resultados obtidos no ensaio de tração nas amostras H1 e H2 e nas F1 e F2 apresentaram valores de $R_{p0.2}$ bastante elevados, revelando-se incongruentes com os esperados para este tipo de liga e tratamento térmico.

Mais, pode ainda concluir-se que o trabalho mecânico e processos térmicos realizados em chapas de latão CuZn37 que tenham sido fornecidas no estado meio-duro (R350), exigem a aplicação de maiores tensões para obter a mesma deformação que em chapas com estado de fornecimento G030. Isto resulta num relativo aumento do tempo de aquecimento das peças sujeitas ao estado de fornecimento R350 e ocasionar mais defeitos na superfície da chapa.

A análise por SEM e EDS permitiu aferir que os defeitos estão associados a porosidades, em locais em que ocorreu a volatilização do zinco, e a contaminações à base de óxidos na superfície das amostras.

Foi possível constatar que produtos que apresentavam defeitos superficiais e se encontravam armazenados num local com exposição a uma atmosfera agressiva, como a zona dos banhos químicos, sofreram contaminações no local de incidência do defeito.

A análise de termografia realizada permitiu comprovar que as temperaturas de trabalho atingidas através de processos de brasagem e recozimento encontram-se dentro da gama prevista de temperatura para qualquer um dos processos térmicos enunciados. É de salientar que a utilização de maçaricos grandes em peças de baixa

espessura ou pouco maciças provoca um aumento da temperatura indesejado, podendo esse aumento provocar defeitos na peça.

Concluiu-se que a realização de inspeções finais de produtos é benéfica na avaliação da conformidade do produto, no entanto não apura as causas de possíveis não conformidades.

8. Sugestões de trabalho futuro

Por fim, após conclusão e análise deste trabalho desenvolvido, existem algumas melhorias e ideias que serão interessantes aplicar, tendo em vista a melhoria contínua do processo de fabrico.

A constante utilização de medidas e ferramentas do âmbito da qualidade que precavessem a ocorrência de problemas através de atividades de controlo e rastreabilidade dos processos e produtos (fichas técnicas de fornecedores, cartas de controlo Shewhart, procedimentos e normas), seria algo a ter em conta na melhoria dos parâmetros de controlo do processo. Assim como, o controlo pontual das propriedades mecânicas e microestruturais do material, através de ensaios de dureza, tração e observação por microscopia ótica permitiria averiguar o estado de fornecimento da matéria-prima sendo desejável que as chapas sejam fornecidas no estado recozido.

9. Bibliografia

- [1] “Topázio - Ferreira Marques & Irmão, S. A.” [Online]. Available: <http://topazio.pt/#/pt/history>. [Accessed: 15-Nov-2015].
- [2] P. C. da R. Moreira, “Desenvolvimento de ligas de latão de baixo teor de chumbo,” Tese de Mestrado, MIEEM, FEUP. p. 22, 2014.
- [3] C. D. A. Inc., “Innovations: Introduction to Brasses (Part I).” [Online]. Available: <http://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2000/01/brasses.html>. [Accessed: 16-Nov-2015].
- [4] E. P. De Garmo, J. T. Black, and R. A. Kohser, *DeGarmo’s materials and processes in manufacturing*. John Wiley & Sons, 2011.
- [5] F. Viana, “Apontamentos Materiais Metálicos - Ligas de Cobre”, FEUP, p. 32;40, 2010.
- [6] V. Loconsolo and L. Nobili, *Manuale degli ottoni*. Consedit, 1995.
- [7] P. Webster and C. D. Association, *The brasses: properties & applications*. Copper Development Association, 2005.
- [8] University of Cambridge, “Copper based alloys.” [Online]. Available: http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/microstructural_exam/cualloys.php. [Accessed: 15-Jun-2016].
- [9] G. de S. Castro, “Estudo e optimização da liga de latão utilizada na GROHE Portugal, SA,” Tese de Mestrado, MIEEM, FEUP. 2012.
- [10] V. Raghavan, *Physical metallurgy: principles and practice*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2015.
- [11] F. Habashi, *Alloys: preparation, properties, applications*. John Wiley & Sons, 2008.
- [12] P. Roberts, *Industrial brazing practice*. CRC Press, 2013.
- [13] “Technical Datasheet CuZn37.” [Online]. Available: [http://www.aurubis-stolberg.com/wdb/band/ger/Technical Datasheet PNA243.pdf](http://www.aurubis-stolberg.com/wdb/band/ger/Technical%20Datasheet%20PNA243.pdf). [Accessed: 03-Jun-2016].
- [14] KME-Engineering Copper solutions, “CuZn37 KME 337.” pp. 1-10.
- [15] P. SA, “Precimet S.A. - Tubes, Fils Et Profilés En Tous Métaux.” .
- [16] A. S. M. H. Volume, “14: Forming and Forging,” *Am. Soc. Met. Met. Park*, p. 6, 1986.
- [17] P. D. Rufe, *Fundamentals of manufacturing*. Society of Manufacturing

- Engineers, 2013.
- [18] C. C. Wong, T. A. Dean, and J. Lin, "A review of spinning, shear forming and flow forming processes," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 14, pp. 1419-1435, 2003.
- [19] M. Runge, "Spinning and flow forming," *Werkzeugmaschinenbau/Verlag Mod. Ind. AG*, 1994.
- [20] B. Aritzur, "Handbook of metal-forming processes," 1983.
- [21] W. H. Cubberly, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook Desk Edition*. Society of manufacturing engineers, 1989.
- [22] H. S. Valberg, *Applied metal forming: including FEM analysis*. Cambridge University Press, 2010.
- [23] S. Kumar, *Technology of metal forming processes*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.
- [24] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [25] M. M. Schwartz, *Brazing*, 2nd ed. ASM international, 2003.
- [26] R. K. Rajput, *A textbook of manufacturing technology: Manufacturing Processes*. Firewall Media, 2007.
- [27] M. Handbook, "vol. 6, Welding, brazing and soldering," *ASM Int.* 1993.
- [28] "Copper Tube Handbook: VIII. Brazed Joints - Fluxes." [Online]. Available: http://www.copper.org/applications/plumbing/cth/brazed-joints/cth_7brzjts_flux.html. [Accessed: 02-Jun-2016].
- [29] T. Watanabe, A. Yanagisawa, and T. Sasaki, "Development of Ag based brazing filler metal with low melting point," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 16, no. 6, pp. 502-508, 2011.
- [30] Johnson Matthey - Metal Joining, "MATTI-SIL 'Silver Brazing Filler Metals,'" p. 3.
- [31] L. Wierzbicki, W. Malec, J. Stobrawa, B. Cwolek, and B. Juszczuk, "Studies into new, environmentally friendly Ag-Cu-Zn-Sn brazing alloys of low silver content," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 56, no. 1, pp. 147-158, 2011.
- [32] J. R. Davis, *Copper and copper alloys*. ASM international, 2001.
- [33] D. M. Jacobson and G. Humpston, *Principles of brazing*. Asm International, 2005.
- [34] C. Meran, M. Yuksel, A. Gulsoz, and T. Sekercioglu, "Welding problems with thin brass plates and tungsten inert gas pulse welding," *Sci. Technol. Weld.*

Join., vol. 9, no. 2, pp. 131-137, 2004.

- [35] D. A. Scott, *Copper and bronze in art: corrosion, colorants, conservation*. Getty publications, 2002.
- [36] Z. Ahmad, *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Butterworth-Heinemann, 2006.
- [37] L. Ribeiro, “Apontamentos - Gestão da Qualidade.” .
- [38] CINFU, “Ensaio Mecânicos de Tração.” [Online]. Available: http://www.cinfu.pt/images/com_fwgallery/files/62/ensaiosMec1.jpg.
- [39] CEMUP, “Image, Microstructure and Microanalysis Unit - IMICROS.” [Online]. Available: http://www.cemup.up.pt/webcemup/IMICROS/IMICROS_lab/IMICROS_lmev_e.htm. [Accessed: 15-Jun-2016].
- [40] T. Soares, H. Mozaffari, and H. Reinecke, “Kinetic Investigation of a Mechanism for Generating Microstructures on Polycrystalline Substrates Using an Electroplating Process.”
- [41] Copper Development Association, “CuZn37 Data Sheet.”