



**José Pedro
Martins Duarte Rios**

Soldadura de ligas de cobre

Welding of copper alloys



**José Pedro
Martins Duarte Rios**

Soldadura de ligas de cobre

Welding of copper alloys

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de António Manuel de Bastos Pereira, Professor Associado com Agregação, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O presente trabalho foi realizado ao abrigo do Projeto “Agenda ILLIANCE” [C644919832-00000035 | Projeto n.º46], financiado pelo PRR - Programa de Recuperação e Resiliência, no âmbito do Next Generation EU da União Europeia, e contou com apoio laboratorial do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA), projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Gabriela Tamara Vincze

Professor Auxiliar em Regime Laboral da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto do *Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro (orientador)

**Agradecimentos /
Acknowledgements**

Gostaria de agradecer ao Prof. Doutor António Bastos pela orientação. Deixo também os meus sinceros agradecimentos aos engenheiros António Festas e Ricardo Beja e à doutora Ana Horovistiz pelo apoio dado neste projeto.

Ao meu grupo de amigos pelos bons momentos e amizade que facilitou e melhorou toda esta etapa.

Agradeço também aos meus pais pelo esforço e dedicação e aos irmãos pelo apoio.

Um obrigado muito especial à Diana por todo o apoio, carinho e motivação.

Keywords

Copper alloy, Copper weld, Welding parameters, Weldability

Abstract

Copper is an extremely important material these days and its use has been increasing in innumerable ways. Its applications range from small components in microcircuits, as in mobile phones, to elements that integrate components in a wind turbine park, to copper plates that work as heat sinks for large turbines. However, copper is a material that has a very high thermal conductivity, which makes the soldering process of this type of material challenging, sometimes difficult to integrate it into an industrial process.

This work's scope is to study the characteristics of copper solder through the brazing process ensuring the best parameters for soldering copper and eliminating defects as much as possible associated with welding this type of material.

For the tests carried out in this investigation, the best results were obtained by brazing the specimens at a temperature of 820 °C and using a ring of outer filler material 1 mm thick.

Palavras-chave

Liga de cobre, Soldadura de cobre, Parâmetros de soldadura, Soldabilidade

Resumo

O cobre é um material extremamente importante nos dias de hoje e cada vez mais amplamente utilizado. As suas aplicações vão desde pequenos componentes em microcircuitos como acontece nos telemóveis, a elementos que integram componentes num parque eólico, até placas de cobre que funcionam como dissipadores de calor de grandes turbinas. No entanto, o cobre é um material que possui uma condutividade térmica muito elevada, o que torna desafiante o processo de soldadura deste tipo de material, sendo por vezes difícil automatizá-lo e integrá-lo num processo industrial.

Este trabalho passa então por estudar quais as características da soldadura de cobre através do processo de brasagem garantindo os melhores parâmetros para a soldadura do cobre e eliminando o máximo de defeitos associados à soldadura deste tipo de material.

Para os testes efetuados nesta investigação, os melhores resultados foram obtidos com a brasagem dos provetes a uma temperatura de 820 °C e utilizando um anel de material de adição exterior com 1 mm de espessura.

Índice

I	Enquadramento do Tema e Revisão Bibliográfica	1
1	Introdução	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Principais objetivos	4
2	Soldadura	5
2.1	Propriedades dos processos de soldadura	5
2.2	Classificação dos processos de soldadura	6
2.3	Tipos de Soldadura	6
2.3.1	Soldadura por Laser	6
2.3.2	Soldadura por feixe de eletrões	7
2.3.3	Soldadura por resistência	8
2.3.4	Soldadura por fricção	8
2.3.5	Soldadura por ultra-sons	10
2.3.6	Soldadura por brasagem	11
II	Métodos Utilizados e Resultados Obtidos	19
3	Procedimento experimental	21
3.1	Materiais	21
3.1.1	Material de base	21
3.1.2	Material de adição	21
3.1.3	Gás de proteção	23
3.2	Ferramentas	23
3.2.1	Matriz e Punções	23
3.2.2	Gabarito	23
3.2.3	Ferramenta de Estanquidade	24
3.2.4	Dobradiça	24
3.3	Preparação do Material	24
3.4	Processo de Brasagem	26
3.5	Testes Realizados	28
3.5.1	Teste de estanquidade	28
3.5.2	Microtomografia computadorizada (Micro-CT)	29
3.5.3	Microscopia eletrónica (SEM e EDS)	30
3.5.4	Microscopia ótica	31

4	Resultados	33
4.1	Teste de estanquidade	33
4.2	Microtomografia Computadorizada (Micro-CT)	33
4.3	Microscopia Ótica	34
4.3.1	Variação de tempo e temperatura	39
4.3.2	Variação do tipo de anel de adição	41
4.3.3	Variação da folga	42
4.3.4	Cortes transversais à junta	42
4.4	Microscopia Eletrônica de Varrimento (SEM) e Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS)	44
III	Conclusões e Trabalhos Futuros	49
5	Conclusões e trabalhos futuros	51
A	Anexo 1 - Ficha técnica Cu - DHP	53
B	Anexo 2 - Ficha técnica CuP 281a	55
C	Anexo 3 - Desenho técnico das ferramentas para alargamento dos tubos	57
D	Anexo 4 - Desenho técnico do gabarito para o processo brasagem	61
E	Anexo 5 - Desenho técnico da ferramenta para o teste de estanquidade	63
F	Anexo 6 - Desenho técnico da dobradiça	67
G	Anexo 7 - Relatório de EDS	71
	Referências	83

Lista de Tabelas

2.1	Benefícios da soldadura por fricção	10
2.2	Comparação entre os tipos de brasagem	18
3.1	Diâmetro externo dos tubos	21
3.2	Características do material de adição	23
3.3	Diâmetro interno dos tubos	25
3.4	Tempo de fusão do material de adição	28
3.5	Parâmetros de brasagem dos provetes	29
4.1	Resultados dos testes de estanquidade	34
4.2	Dimensão real da folga dos provetes	36
4.3	Defeitos por provete	38
4.4	Componentes químicos da amostra geral de EDS	44
4.5	Componentes químicos da amostra de material de base	45
4.6	Componentes químicos da amostra de material de adição	45
4.7	Componentes químicos da amostra do defeito	45
4.8	Componentes químicos da amostra do defeito	45

Intentionally blank page.

Lista de Figuras

2.1	Tipos de soldadura	7
2.2	Soldadura por pontos	9
2.3	Descrição do processo de soldadura por fricção	9
2.4	Variantes do processo de soldadura por ultra-sons	10
2.5	Efeito da capilaridade em função da folga	14
3.1	Tubos utilizados	22
3.2	Anel de material de adição	22
3.3	Matriz e punções	24
3.4	Dobradiça montada na porta do forno	25
3.5	Processo de alargamento dos tubos	26
3.6	Comparação entre anéis exteriores e interiores	26
3.7	Colocação do tubo com anel externo no gabarito	27
3.8	Colocação do tubo com anel interno no gabarito	27
3.9	Esquema de colocação do material de adição	27
3.10	Gabarito utilizado na brasagem dos provetes	28
3.11	Ferramenta para teste de estanquidade	29
3.12	Realização da microtomografia computadorizada	30
3.13	Corte transversal à junta	31
3.14	Diferença de aspeto entre tubos cortados e tubos polidos	32
4.1	Fusão parcial do anel de adição	33
4.2	Resultado Micro CT - Vista em corte	35
4.3	Resultado Micro CT	35
4.4	Ampliação de 8x no provete 10	37
4.5	Ampliação de 35x no provete 10	37
4.6	Nº de defeitos de falta de material por dimensão da folga	39
4.7	Área média do defeito (mm^2) de falta de material por tipo de anel de material de adição	39
4.8	Ampliação 8x- Provete 14	40
4.9	Número de defeitos em função da temperatura de brasagem	40
4.10	Número de defeitos por tipo de anel de material de adição (Temperatura de brasagem=820°C)	41
4.11	Número de defeitos por folga criada	42
4.12	Corte transversal do provete com ampliação de 8x- Amostra 8	43
4.13	Corte transversal do provete com ampliação de 8x- Amostra 5	43
4.14	Falta de material de adição - Amostra 8	46

4.15 Pequena bolsa de falta de material de adição - Amostra 8 - Ampliação 1000x	46
4.16 Fissura na junta de ligação - Amostra 8 - Ampliação 1000x	47
4.17 Localização onde foi realizado o processo de EDS de uma forma geral - Amostra 13 - Ampliação 1000x	47
4.18 Localização onde foi realizado o processo de EDS ao material de base - Amostra 13 - Ampliação 1000x	47
4.19 Localização onde foi realizado o processo de EDS ao material de adição - Amostra 13 - Ampliação 1000x	47
4.20 Localização onde foi realizado o processo de EDS ao defeito - Amostra 13 - Ampliação 1000x	47

Lista de Acrónimos

DEM Departamento de Engenharia Mecânica.

EDS Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia.

Micro-CT Microtomografia Computadorizada.

SEM Microscopia Eletrônica de Varrimento.

Intentionally blank page.

Lista de Símbolos

γ	Tensão de superfície do material de adição
Δp	Variação da pressão
r	Raio de curvatura do menisco
\varnothing	Diâmetro
D	Diâmetro do Tubo Alargado
d	Diâmetro do Tubo
I	Intensidade de Corrente
Q	Energia Térmica
R	Resistência Elétrica
t	Tempo (segundos)

Intentionally blank page.

Parte I

Enquadramento do Tema e Revisão Bibliográfica

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O cobre é um metal com características dúcteis, o que o torna facilmente trabalhável, no entanto, a soldadura deste material de uma forma geral é desafiante devido à elevada condutividade térmica do cobre e das suas ligas [1]. Devido a esta condição característica deste tipo de material, é quase sempre necessário o pré-aquecimento do material na preparação da soldadura, mesmo para baixas espessuras. No entanto, a grande versatilidade do cobre aliada à sua excelente condutividade elétrica e à sua ductilidade faz com que este metal seja utilizado em inúmeras aplicações, desde finas folhas de cobre utilizadas em pequenos circuitos de componentes eletrónicos a placas de grande espessura [2] utilizadas para a dissipação de calor de alguns componentes. Nos dias de hoje a implementação de componentes e dispositivos elétricos têm crescido de forma exponencial em diversos setores, como é o caso, por exemplo, do setor automóvel. Este aumento na procura e utilização de ligas de cobre faz com que haja a necessidade de melhorar a qualidade da soldadura, a eficiência e a automação das soldaduras destas ligas, para uma melhor e mais fácil integração num processo industrial [3].

A Bosch Termotecnologia é uma sucursal do Grupo Bosch localizada em Aveiro, local onde foram iniciadas as atividades em 1988. A área de negócios da empresa consiste em fornecer soluções de água quente, através de caldeiras, bombas de calor e esquentadores.

Na fabricação dos aquecedores de água, as serpentinas desempenham um papel crucial. Essa estrutura é responsável por permitir a circulação e aquecimento da água. Por esse motivo, é fundamental que esse componente seja longo e apresente uma alta condutividade térmica. Sendo assim, a serpentina é composta por uma série de tubos de cobre soldados e dobrados.

A soldadura destes tubos de cobre é feita através do processo de brasagem em forno. Neste processo os componentes são submetidos a um período de 50 minutos dentro do forno, onde as temperaturas variam de 710 °C a 830 °C. Para garantir a integridade do ambiente interno, as entradas e saídas do forno são protegidas por cortinas de azoto, evitando assim a contaminação do gás do interior. Dentro do forno, é utilizada uma mistura com 5 % de hidrogénio como gás de proteção, a fim de reduzir a formação de escória. Após a saída do forno as serpentinas arrefecem de forma natural à temperatura ambiente.

Este trabalho serve como base para o início de um processo de melhoria e otimização do sistema e dos parâmetros de brasagem atualmente utilizados pela Bosch Termotecnologia.

logia.

1.2 Principais objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a otimização da soldadura de ligas de cobre tentando atingir os parâmetros de soldadura ótimos.

Para atingir estes objetivos o plano de trabalhos passa por:

1. Analisar quais os métodos de soldadura mais adequados para soldar cobre para diversas aplicações;
2. Analisar qual o melhor formato das juntas;
3. Diminuir o tempo do processo;
4. Soldar provetes de uma liga de cobre;
5. Testes à estanquidade dos provetes;
6. Análise da micrografia da soldadura;
7. Análise da soldadura com recurso a microtomografia computadorizada;
8. Processamento e análise dos dados obtidos;
9. Conclusões acerca dos resultados obtidos.

Capítulo 2

Soldadura

A soldadura é um processo de junção no qual dois ou mais componentes são unidos produzindo uma continuidade na natureza dos materiais da peça por meio de calor, pressão ou ambos. Este processo pode ocorrer com ou sem o uso de material de adição, havendo continuidade na natureza do material das peças [4].

Métodos de junção de metais, como por exemplo o processo de forjar metal, são conhecidos há milhares de anos. No entanto, no final do século XIX, como se tornou mais fácil e seguro armazenar oxigênio e acetileno, gases capazes de produzir uma chama que atinge elevadas temperaturas, começaram a surgir novos métodos de soldadura, o oxigás por exemplo. O aparecimento da eletricidade fomentou também o desenvolvimento de novos métodos, como é por exemplo o caso da soldadura por resistência e a soldadura a arco [5].

Ou seja, a soldadura é um processo de ligação permanente entre duas peças através de uma união atômica, obtendo-se uma junta com características mecânicas iguais ou superiores às do material de base, mantendo-se a continuidade da sua natureza. Este processo ocorre quando [6]:

- É aplicado calor suficiente que permita amolecer ou derreter as peças que desta forma se fundem;
- É aplicada pressão suficiente de tal forma que as superfícies se unem;
- É aplicado calor conjuntamente com pressão, que juntos criam as condições necessárias para que se dê a junção dos materiais.

2.1 Propriedades dos processos de soldadura

Para uma soldadura ser considerada ideal, não poderia haver distinção entre o material de base e a junta existindo desta forma uma continuidade total entre os componentes. Apesar de obter uma soldadura deste tipo ser praticamente impossível, os equipamentos que já existem nos dias de hoje são mais que capazes de produzir soldaduras de grande qualidade, no entanto, os parâmetros de soldadura devem cumprir determinados requisitos e devem estar de acordo com as normas existentes para cada processo, de forma a garantir que o resultado não possui defeitos e apresenta boas características [6].

Para iniciar o processo de soldadura as superfícies que serão unidas devem passar por uma limpeza, de forma a estas não apresentarem qualquer contaminante. Para iniciar

este processo, é necessário fornecer energia aos componentes, geralmente sob a forma de calor, que pode ser gerado por diversas formas:

- Chama;
- Arco elétrico;
- Resistência elétrica;
- Meios mecânicos.

De forma a garantir a melhor qualidade, é também importante garantir que durante o processo de soldadura não ocorre a formação de óxidos ou nitratos, pelo que este procedimento deverá estar protegido, dependendo do tipo de soldadura que se aplica, por um fluxo, ou gases inertes, que não formem contaminantes, sendo também possível realizar soldadura em vácuo.

2.2 Classificação dos processos de soldadura

Como representado na figura 2.1 existem três tipos de uniões metálicas, a ligação adesiva, a fixação mecânica e a soldadura.

A soldadura pode ser dividida em três grandes áreas, as soldaduras em que é aplicada pressão, e em que as duas superfícies a ligar se deformam até se dar a união, a que se dá o nome de soldadura em estado sólido. Neste tipo de soldadura a deformação poderá ter também a função de quebrar óxidos presentes na superfície que possam contaminar a ligação soldada.

Outro grande tipo de soldadura tem o nome de soldadura por fusão. Neste caso será adicionado um metal em estado de fusão à ligação soldada, ou o material de base é aquecido até atingir o estado líquido e as duas superfícies ficaram unidas quando esse der a solidificação [7].

O último tipo de soldadura é a soldadura por brasagem e neste método a junção dos materiais dá-se pelo aquecimento e fusão de um material de adição na zona da junta entre os componentes a soldar. Neste tipo de soldadura apenas se dá a fusão do material de adição. Estes grupos estão representados na figura 2.1.

2.3 Tipos de Soldadura

Nos dias de hoje a soldadura a cobre ainda causa algumas dificuldades e portanto têm existido alguns estudos que visam ultrapassá-las. Neste capítulo serão descritos vários tipos de soldadura utilizados em ligas de cobre, bem como alguns estudos realizados acerca destes processos.

2.3.1 Soldadura por Laser

A soldadura de cobre, tem por norma associados problemas como, empenos, susceptibilidade à fratura e microestruturas grosseiras. Neste aspeto a soldadura a laser é vantajosa devido à sua grande precisão, alta concentração de energia e baixas deformações. Este processo é também facilmente automatizável [3].

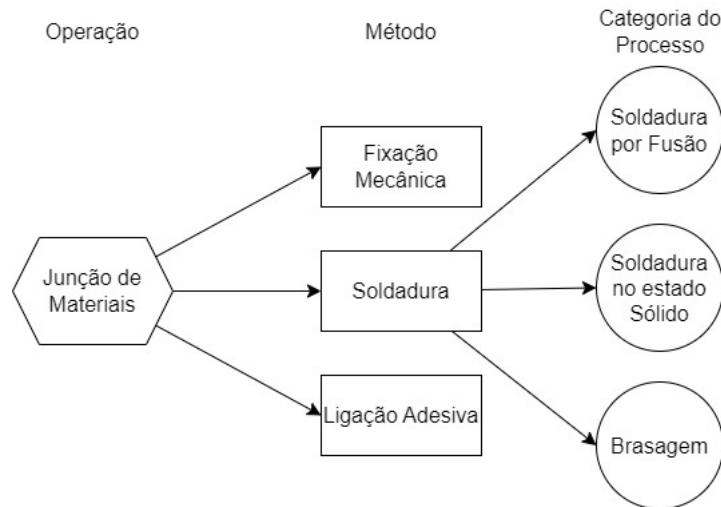


Figura 2.1: Tipos de soldadura. Adaptado de [7]

No entanto, a soldadura a laser tem alguns problemas como é o caso da baixa estabilidade da piscina de soldadura e também a grande quantidade de energia necessária devido à baixa absorvidade de raios laser infravermelhos [3, 8]

Em [3] foi estudada a soldadura de cobre através de laser e apesar da aplicação das melhores técnicas para soldadura a laser, do elevado custo e tecnologia dos aparelhos e da preparação trabalhosa, existiu sempre a inclusão de impurezas na soldadura. Isto dificulta a integração deste método em processos industriais.

Nos estudos realizados em [8] concluiu-se que eficiência da soldadura por laser do cobre foi melhorada utilizando um nanocompósito com base em cobre como absorvente. Com esta técnica a reflectividade do cobre diminuiu de 88% para 15%, não apresentando mudanças significativas no que toca à dureza, resistividade elétrica e composição química das soldaduras.

O processo de soldadura a laser em vácuo, estudado em [2] pode ajudar a resolver alguns problemas da soldadura a laser que podem causar defeitos críticos, como por exemplo a baixa penetração das piscinas de soldadura e a necessidade de elevada potência, bem como a soldadura ter de ser realizada a baixa velocidade. Neste estudo conclui-se que com o recurso ao vácuo é possível melhorar a qualidade da soldadura aumentando a penetração, tal como é capaz de aumentar a velocidade de soldadura e permite que a potência do laser seja mais reduzida.

2.3.2 Soldadura por feixe de eletrões

A soldadura por feixe de eletrões é um processo de soldadura por fusão, em que um feixe de eletrões é aplicado na juntas dos metais. Este é um método frequentemente realizado sob vácuo, de forma a prevenir a dispersão dos eletrões e de grande densidade energética, o que permite a soldadura de secções muito espessas de material sem que seja necessário o uso de material de adição [1].

Neste método ao contrário da soldadura a laser 2.3.1 não existem problemas causados pela reflexão devido à interação direta dos eletrões com o material de base. Este processo permite o ajuste de alguns parâmetros como é o caso da tensão, da corrente, da posição

de focagem e da velocidade de soldadura de forma a obter soldaduras de grande qualidade na vasta gama de materiais e dimensões de juntas que este método abrange [1].

Em [1] foi estudada a soldadura por feixe de elétrons em cobre, analisando a qualidade das juntas e o efeito que a adição de um metal de adição tem. Neste estudo os resultados obtidos para juntas de elevada espessura (30 mm) foram instáveis e com defeitos bastante significativos. No entanto, para a junção de chapas de cobre obtiveram-se resultados bastante interessantes sem o metal de adição, sendo que com a adição de metal os defeitos mantiveram-se.

2.3.3 Soldadura por resistência

Na soldadura por resistência é feito que uma dada corrente elétrica - I passe pelos componentes a soldar, durante um determinado tempo - t . Ao passar nos componentes com uma dada resistência - R , a energia transforma-se em calor - Q (J), como podemos ver na equação 2.1, que é utilizado para unir as peças [6].

$$Q = (I^2) \times R \times t \quad (2.1)$$

Neste método de soldadura existem algumas variantes, que se adequam a diferentes tipos de trabalho [6]:

- Soldadura topo a topo;
- Soldadura incandescente;
- Soldadura contínua por roletes;
- Soldadura por bossas;
- Soldadura por pontos.

Na figura 2.2 está representado o princípio de funcionamento da soldadura por resistência, na variante da soldadura por pontos.

Em [10] foi estudada a influência que diferentes parâmetros de pressão e superfície de contacto, temperatura de contacto e rugosidade das superfícies tem na qualidade final da soldadura a cobre e na resistência de contacto elétrico específica. Verificou-se que:

- Quanto maior é a pressão de contacto, menor é a influência que a temperatura de contacto e a pressão têm na resistência de contacto elétrico específica.
- As características das superfícies de contacto estão diretamente ligadas com a resistência elétrica de contacto específica, sendo que superfícies de contacto muito lisas aumentam esta resistência enquanto que superfícies de contacto rugosas a fazem diminuir.

2.3.4 Soldadura por fricção

A soldadura por fricção, cujo funcionamento se encontra representado na figura 2.3 é um processo de soldadura relativamente recente. Este processo de soldadura de estado sólido, que forja os componentes apenas na zona da soldadura, formando assim a junta, é amigo do ambiente, sem libertação de elementos tóxicos, bastante eficiente a nível

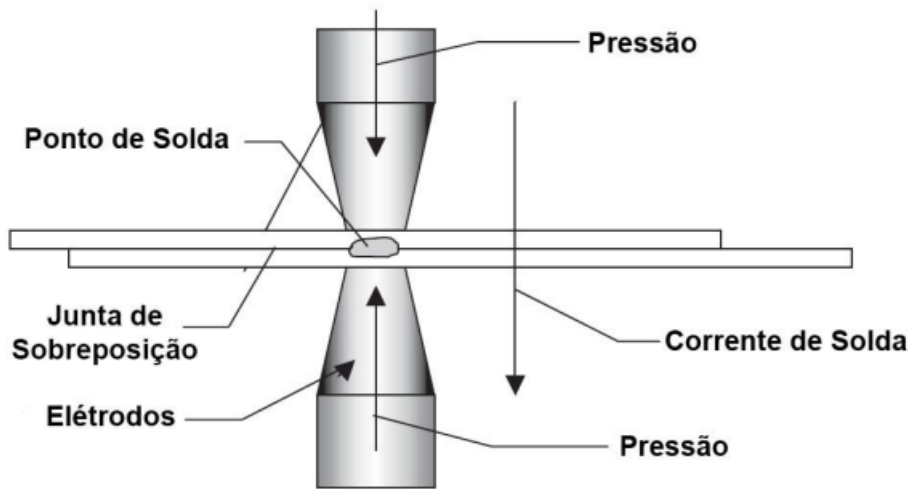


Figura 2.2: Soldadura por pontos. Fonte: [9]

energético e versátil. Este tipo de soldadura já foi testado com inúmeras ligas, como é por exemplo o caso do cobre, do titânio e do magnésio, garantindo soldaduras de grande qualidade, sendo que as aplicações industriais deste processo são apenas utilizadas em ligas de alumínio. Este método tem vindo a ser cada vez mais utilizado e tem inúmeros benefícios como é possível ver alguns exemplos na tabela 2.1 [11].

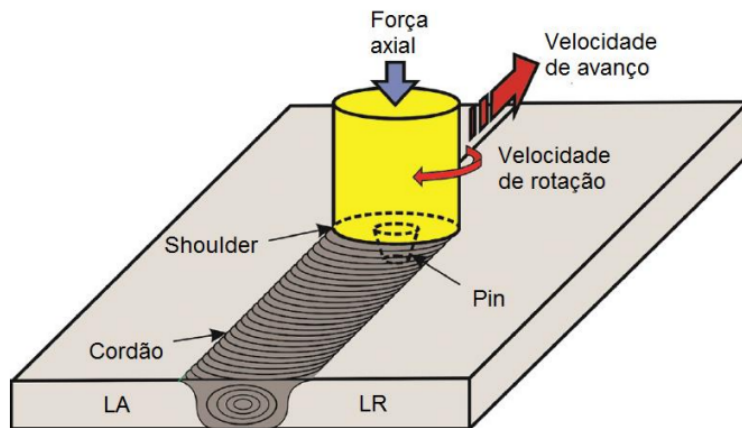


Figura 2.3: Descrição do processo de soldadura por fricção. Fonte: [12]

Em [13] foi estudada a soldadura de cobre através do processo de estado sólido de fricção, analisando diversos parâmetros de soldadura bem como os resultados por ele obtidos, através de testes de resistência à tração e análise à microestrutura e dureza na zona de união dos provetes. Nestes ensaios concluiu-se que é possível soldar cobre de forma bem sucedida com esta técnica. Com os resultados obtidos é possível constatar que a resistência à tração na zona da junta é cerca de 85% quando comparado com o metal de origem.

Em [14] foram realizados testes semelhantes, chegando à conclusão que com este

Tabela 2.1: Benefícios da soldadura por fricção. Adaptado de [11]

Benefícios metalúrgicos	Benefícios ambientais / energéticos
Boa estabilidade dimensional e repetibilidade	Poupança de materiais consumíveis
Excelentes propriedades na zona da junta	Pré-preparação necessária é muito reduzida
Não ocorrem fraturas	Apenas consome 2.5% da energia necessária para a soldadura a laser

método, a zona da junta possui cerca de 87% da resistência à tração do cobre original e também que esta região afetada pelo processo sofreu uma redução na dureza do material base.

2.3.5 Soldadura por ultra-sons

A soldadura por ultra-sons é um método de soldadura de estado sólido que permite soldar inúmeras geometrias adaptando os componentes da máquina ao trabalho em questão. Esta soldadura é caracterizada pela sua rapidez e baixo custo energético, sendo que à semelhança da soldadura por resistência 2.3.3 e da soldadura por fricção 2.3.4 é também um processo amigo do ambiente, não emitindo faíscas, chamas ou fumo [15].

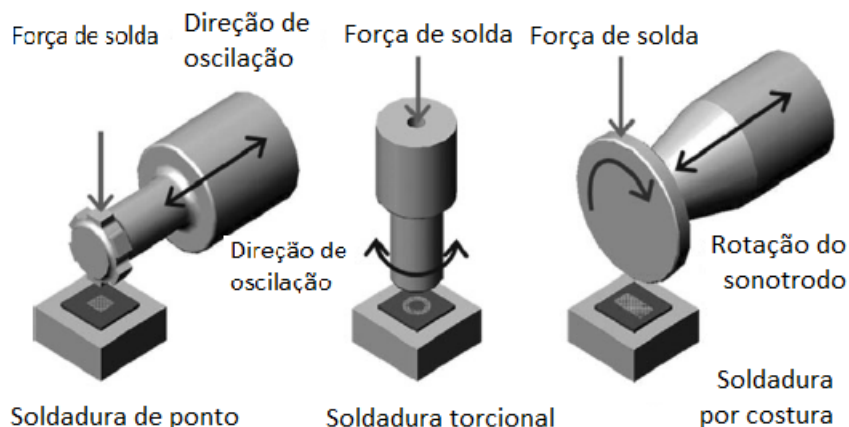


Figura 2.4: Variantes do processo de soldadura por ultra-sons. Adaptado de: [15]

Outra das vantagens deste processo é a sua capacidade de automatização, o que facilita o seu controlo e monitorização, e permite uma fácil integração em linhas de produção.

Em [16] foi estudada a soldadura a cobre através deste processo, testando a soldadura com diversos parâmetros para chapas de cobre de 0.2 mm e comparando resultados. Com este estudo concluiu-se que os valores da pressão e do tempo da soldadura bem como a amplitude das ondas tem um impacto significativo no resultado final. Concluiu-se também que para as chapas de cobre de 0.2 mm, os parâmetros que garantem a maior resistência da junta são a pressão a 2 bar, o tempo de soldadura de 2.25 s e uma amplitude de 50 μm . Já para minimizar a variação da resistência da junta, terá de se recorrer a uma soldadura de 2 s, com uma pressão de 2.5 bar e uma amplitude de 45 μm .

2.3.6 Soldadura por brasagem

De forma muito simplificada, a brasagem, é um processo de junção de materiais que ocorre através da fusão e da solidificação de um metal de adição que é colocado em contacto com o material de base, ou seja, com os componentes que se deseja soldar, resultando numa junta estanque e numa ligação estrutural entre as peças. Este processo é amplamente utilizado na indústria devido à sua grande versatilidade [17]. A brasagem:

- Permite unir a maioria dos metais e materiais cerâmicos;
- Permite a junção de materiais heterogéneos;
- É um processo que pode ser realizado tanto de forma manual como automatizada, sendo facilmente adaptado tanto à produção de grandes quantidades de peças como à produção de peças individuais;
- Produção de empenos e distorções quase nulas, devido às baixas tensões residuais.

No entanto, este processo apresenta também algumas desvantagens, como por exemplo:

- O facto deste tipo de soldadura poder provocar corrosão;
- O facto das juntas terem de ser de pequena dimensão;
- A necessidade de preparação da junta de forma a obter resultados satisfatórios.

Para garantir uma boa junção brasada há que ter em conta diversos fatores. Ambos os componentes devem estar devidamente limpos e protegidos de oxidação, seja através da utilização de fluxo ou através de uma atmosfera controlada.

O fluxo de brasagem é uma mistura de produtos químicos usada para facilitar a criação de uma junta sólida durante o processo de brasagem, protegendo o material de base e metal de adição contra oxidação e a formação de outras substâncias indesejáveis. Ao remover os óxidos presentes o fluxo reduz as tensões de superfície e promove o fluxo livre do metal de adição [17].

Em [18] foi estudada a influência que a pressão e a quantidade de metal de adição têm na microestrutura e resistência das juntas de cobre. Com esta atividade experimental concluiu-se que tanto a pressão exercida como a quantidade de material de adição utilizado vão influenciar as características da junta. Tanto com baixa pressão como com pouco material de adição são criadas cavidades na junta, diminuindo assim a sua resistência. Nestas cavidades quando se encontram sob stress começam a ocorrer pequenas fissuras, que se vão alastrando acabando por causar fraturas.

Brasagem no forno

A brasagem no forno é um processo amplamente utilizado para soldar componentes, em que estes são inseridos no forno com o metal de adição previamente colocado. Por norma o forno está sob vácuo ou é protegido com uma atmosfera controlada.

Este método oferece duas grandes vantagens em relação às outras formas de brasagem. Sendo a primeira a facilidade com que se controla a atmosfera, e também a facilidade de

obtenção de dados e controlo de cada fase de aquecimento, bem como dos ciclos de arrefecimento. Estas características permitem boa repetibilidade do processo, bem como a facilidade de produção em escala industrial, garantindo qualidade e uniformidade nos resultados. O forno a vácuo é o método mais versátil de proteger os componentes e ligações soldadas durante o processo de brasagem, sendo possível soldar praticamente qualquer tipo de metal base. No entanto é algo dispendioso e é um processo que requer bastante limpeza e manutenção dos equipamentos utilizados e necessita também de um controlo muito rigoroso a nível térmico bem como é necessário estabelecer ciclos de aquecimento, brasagem e arrefecimento.

Outra forma de proteção dos componentes é o uso de uma atmosfera controlada. Nesse caso, é necessário escolher um gás que seja compatível com o material de base e o metal de adição, e o forno deve ter a capacidade de manter a qualidade da atmosfera durante todo o processo de brasagem.

Brasagem por indução

A brasagem por indução é um processo em que a junta é aquecida por meio de uma corrente elétrica induzida numa bobina de indução. Esse método é preciso e muito eficiente a nível energético, pois aquece apenas a área da junta. Além disso, a brasagem por indução pode ser utilizada tanto para produção de forma manual como automatizada, sendo adequada para produção em massa de componentes que requerem aquecimento seletivo e garantindo resultados uniformes.

Este processo, no entanto, tem limitações. É dificilmente ajustado a ligações com geometrias complexas e necessita de um investimento inicial avultado, bem como, de conhecimento especializado [17].

Liga de cobre

O cobre é um material não ferroso e possui propriedades físicas e metalúrgicas únicas, pelo que estas devem ser consideradas ao selecionar o procedimento de soldagem. Este metal encontra-se em diversas ocasiões ligado a outros metais, como é o caso do estanho, do zinco ou do alumínio, por exemplo, formando as ligas de cobre [19].

As ligas de cobre são muitas vezes escolhidas para a brasagem devido à sua abrangente gama de propriedades. É um metal extremamente resistente à corrosão e facilidade de deformação. Para além disto, é também um excelente condutor, tanto elétrico como térmico [17].

Estas ligas podem ser brasadas com uma grande variedade de técnicas e processos, no entanto é necessário ter alguma atenção a alguns aspetos. É importante considerar que a brasagem pode não ser apropriada quando o ponto de fusão do metal de adição e do material de base forem muito próximos, pois isso pode resultar em desgaste excessivo do material de base. Além disso, com este processo, um aquecimento muito rápido ou não uniforme na peça pode induzir tensões internas na peça.

Material de adição

Os metais de adição são metais utilizados para produzir as juntas brasadas. Estes metais têm uma mudança de fase do estado sólido para o líquido acima dos 450° C, mas abaixo da temperatura de mudança de fase do metal base.

Para garantir a eficácia do metal de adição, é necessário que ele possua algumas características, como a capacidade de se espalhar e aderir ao material de base, ponto de fusão ajustado ao material de base e fluidez suficiente para distribuição por capilaridade, composição homogênea e estável para minimizar a separação dos componentes com a fusão, e capacidade de formar juntas com propriedades físicas e mecânicas ajustadas às necessidades. Para obter uma junta brasada de qualidade, é fundamental escolher o metal de adição adequado. Nesse sentido, é preciso garantir a compatibilidade metalúrgica entre o material de base e o metal de adição, verificar se o metal de adição é adequado ao método e parâmetros utilizados na brasagem, atestar que ele garante os requisitos necessários para a junta e verificar se é compatível com o design da junta em termos de comprimento e folga.

Outro aspecto a ter em atenção aquando da escolha do metal de adição é o seu formato. Este material pode ser adquirido de diversas formas, seja em pó, varetas, pasta ou pre-formados. Os metais de adição pre-formados são formas sólidas do material de adição que se adaptam ao formato da junta, como anéis, anilhas ou discos, e que podem ser colocados no local da junta previamente à iniciação do ciclo de brasagem.

Embora a colocação prévia garanta a quantidade certa de material e seu posicionamento uniforme na junta, o uso desse tipo de material pode ser mais caro e a facilidade de aplicação pode levar a um posicionamento negligente, comprometendo a qualidade da junta [17].

Os metais de adição de cobre são maioritariamente utilizados em brasagem por forno, sem recuso a fluxos e com atmosfera protegida. No entanto materiais de adição que tenham constituintes como por exemplo titânio, crómio ou alumínio podem requerer adição de fluxo [17].

A Bosch utiliza o material de adição BCuP281a na forma de um anel durante o processo de brasagem. Esse metal apresenta alta fluidez quando aquecido à temperatura de brasagem, o que permite sua penetração em juntas com folgas muito pequenas. Segundo [17] de forma a obter os melhores resultados, recomenda-se folgas na ordem de 0,08 mm. Essa característica do material de adição facilita a formação de uniões sólidas e de alta qualidade entre os componentes.

Juntas

Existem diversos fatores associados às juntas que podem influenciar e afetar a qualidade das ligações soldadas. A resistência e qualidade dessas juntas são impactadas desde a etapa de preparação, incluindo a limpeza do material, até o dimensionamento da folga entre os componentes.

No que diz respeito à limpeza, é comum que o material apresente contaminantes, como óleos, gorduras, sujidade ou oxidação. Esses contaminantes atuam como agentes que impedem o molhamento adequado da junta e o fluxo do material de adição por capilaridade, podendo prejudicar o processo de brasagem, pelo que é crucial fazer uma limpeza cuidadosa do material base de forma a garantir que existem condições para que se realize um bom processo de brasagem [20].

Outro fator que influencia a brasagem é a rugosidade da junta. Vários estudos têm sido realizados para investigar a influência da rugosidade na qualidade das ligações soldadas, no entanto, este é um tema não consensual. De acordo com a referência [21], e sendo esta a hipótese mais defendida, para o cobre, a rugosidade reduzida leva a uma redução

do volume de espaços vazios e um aumento da tensão de cedência. Portanto, quanto mais liso for o material de base, maior será o molhamento da junta o que resulta numa ligação de qualidade superior. Mas existem alguns artigos que defendem o contrário, segundo [22], uma superfície mais rugosa irá gerar um fluxo mais turbulento do material de adição e isso fará com que o molhamento da superfície rugosa seja superior ao da superfície mais lisa. Para além disto, o regime turbulento do metal de adição associado às paredes rugosas do material de base irão criar mais pontos de ligação metalúrgica o que leva a uma união com uma mais elevada resistência mecânica.

Por fim, a folga das juntas para os tubos, que pode ser calculada utilizando a equação 2.2. A folga é um fator que exerce uma grande influência no resultado final da ligação soldada. Essa folga tem um papel crucial na geração da pressão capilar, que é essencial para permitir que o material de adição se infiltre na junta de forma adequada. A pressão de capilaridade pode ser calculada através da equação 2.3 de Young-Laplace, sendo Δp a pressão, γ a tensão de superfície do material de adição e r o raio de curvatura do menisco [20].

$$folga = \frac{d_{tubo\ exterior} - D_{tubo\ interior}}{2} \quad (2.2)$$

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.3)$$

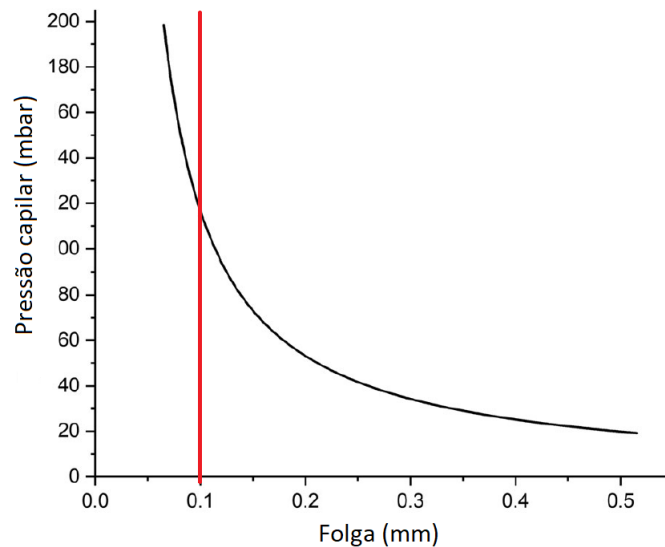


Figura 2.5: Efeito da capilaridade em função da folga. Adaptado de: [20]

Na figura 2.5 é possível observar o efeito que o tamanho da folga da junta exerce na pressão capilar criada. Verifica-se uma relação inversamente proporcional entre o tamanho da folga e a pressão capilar [20]. A linha vertical representada no gráfico é referente à folga utilizada nos provetes.

Em relação ao comprimento da junta de brasagem, é recomendável que este seja no mínimo três vezes maior do que a espessura do componente mais fino que será soldado [23]. Essa proporção garante uma área de contato adequada entre os materiais e proporciona

uma distribuição mais uniforme do material de adição ao longo da junta. Portanto, é importante considerar esse critério de dimensionamento ao projetar e executar o processo de brasagem, a fim de obter uniões de qualidade e resistência adequada.

Atmosfera de proteção

As atmosferas controladas, incluindo o vácuo, são amplamente utilizadas no processo de brasagem para evitar a formação de óxidos e outros componentes indesejáveis que possam comprometer a qualidade da união. Além disso, essas atmosferas permitem a realização de operações de acabamento antes da brasagem. Embora sejam mais comumente encontradas na brasagem por forno, também podem ser utilizadas em outros métodos de brasagem, como por exemplo os casos da brasagem por indução e por resistência. O uso dessas atmosferas muitas vezes elimina a necessidade de fluxos, reduzindo seu uso e aumentando sua vida útil em alguns casos.

A escolha dos gases utilizados nas atmosferas de proteção deve ser feita levando em consideração a compatibilidade tanto com o material de base quanto com o material de adição. É importante selecionar gases que não reajam com os materiais e que proporcionem a proteção necessária durante todo o processo de brasagem [17].

Testes

A fase final do processo de brasagem engloba a inspeção das ligações brasadas e desempenha um papel essencial na garantia da qualidade dessas uniões. Além disso, as inspeções permitem avaliar a qualidade da execução de todas as etapas do processo. Os métodos de inspeção adotados variam de acordo com os requisitos específicos das uniões soldadas. Em alguns casos, os métodos de inspeção podem ser determinados pelo cliente, enquanto em outras situações, certos métodos podem ser exigidos por leis e normas existentes. Em determinadas ocasiões, podem ser necessários testes destrutivos para assegurar a qualidade da brasagem.

Existem diferentes métodos de análise que podem ser realizados para avaliar a qualidade das juntas brasadas. Esses métodos podem ser classificados em destrutivos e não destrutivos.

Entre os métodos não destrutivos, destacam-se [17]:

- Exame visual: É o método mais utilizado e eficiente de inspeção. Permite detectar imperfeições superficiais, como espaços de base. Pode ser realizado com ou sem ampliação
- Teste de estanquidade: É comumente utilizado quando a junta precisa ser estanque. A baixas pressões, estes testes podem ser realizados com ar comprimido, enquanto que a altas pressões requer o uso de líquido. Os testes devem ser realizados a uma pressão 1,5 vezes superior à pressão máxima que a junta será submetida
- Radiografia (raio-X): É um método não destrutivo amplamente utilizado para análise de juntas brasadas. Consiste em enviar raios-X através da junta e captar os raios que não são absorvidos pelo material. Isso permite reconstruir o desenho da junta

- **Ultrassons:** Os exames de ultrassons são um método de análise baseado na reflexão das ondas sonoras pelas superfícies das amostras. Utiliza-se um transdutor para emitir um pulso ultrassônico, que posteriormente recebe o eco desse pulso. O eco é gerado pelas superfícies frontal e traseira da amostra. Em áreas com defeitos, ocorrem sinais de eco que chegam com um desfasamento, permitindo identificá-las. Este método é utilizado para detetar imperfeições internas nas juntas brasadas, proporcionando uma análise detalhada da sua integridade estrutural.

Existem muitos outros métodos, mas os enunciados são os mais utilizados. Já entre os métodos destrutivos, temos como métodos mais utilizados [17]:

- **Ensaio de tração:** Estes testes são utilizados para avaliar a resistência de uma junta à tração ou ao corte. Geralmente, são utilizados como ferramentas de desenvolvimento, sendo raramente aplicados como métodos de controlo de qualidade na produção, devido à complexidade e aos custos envolvidos neste método. Esses ensaios oferecem informações valiosas sobre o desempenho das juntas, permitindo aprimorar o processo de soldadura e garantir a qualidade dos produtos finais. No entanto, devido à sua natureza exigente, eles são mais frequentemente utilizados durante a fase de pesquisa e desenvolvimento, auxiliando na otimização dos parâmetros de brasagem
- **Ensaio de fadiga:** Analisam a resistência do material à fadiga, ou seja, à ruptura sob carregamento cíclico.
- **Ensaio à torção:** Medem a capacidade do material de suportar torção sob carga.
- **Microscopia:** Permite a análise detalhada da estrutura e características da junta, podendo revelar defeitos ou imperfeições. Esses métodos de análise são aplicados de acordo com os requisitos específicos das juntas brasadas, podendo ser selecionados de acordo com a finalidade da inspeção e as normas existentes.

Defeitos

Alguns dos defeitos mais comuns que podem ocorrer em juntas brasadas são os seguintes [17]:

- **Presença de espaços vazios:** A existência de espaços vazios na união compromete a resistência da junta à tração e pode resultar em possíveis fugas. Esses espaços vazios ocorrem quando o material de adição não flui completamente dentro da junta.
- **Ocorrência de fissuras:** As fissuras nas juntas podem ser causadas por uma preparação inadequada da junta, mas também podem ocorrer quando os materiais base e de adição possuem coeficientes de expansão diferentes. Isso pode resultar em pontos de tensão entre os materiais, comprometendo a resistência mecânica da junta
- **Erosão do material de base:** A erosão do material de base ocorre quando há desgaste ou remoção excessiva do material durante o processo de brasagem. Isso pode ocorrer devido a altas temperaturas, tempo prolongado de brasagem ou uso de fluxos ou materiais de adição inadequados

- Junta descontínua: Uma junta descontínua ocorre quando a união não é completa ao longo de toda a extensão da junta. Isso pode ser resultado de uma preparação inadequada da superfície, aplicação insuficiente do material de adição ou problemas durante o processo de aquecimento e arrefecimento

Os espaços vazios são defeitos podem comprometer a qualidade e a integridade das juntas brasadas, tornando a inspeção e o controle de qualidade essenciais para garantir a confiabilidade das uniões. Este tipo de defeitos pode ser causado por [23]:

- Material de adição inadequado
- Gás preso
- Folga inapropriada
- Má limpeza da junta
- Movimento dos componentes montados com o material de adição ainda no seu estado fluido

Tabela 2.2: Comparação entre os tipos de brasagem. Adaptado de [20]

Técnica	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Brasagem por indução	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiente para componentes com formas simples • Aquecimento rápido e localizado minimizando o aparecimento de grãos 	<ul style="list-style-type: none"> • Muitos componentes não são compatíveis com o processo • Design complexo do indutor 	<ul style="list-style-type: none"> • Mais eficaz com condutores com resistência elétrica elevada
Brasagem por forno	<ul style="list-style-type: none"> • Processo automatizado em larga escala • Pode combinar a brasagem com tratamento térmico • Forma juntas reproduzíveis com reduzida formação de espaços vazios 	<ul style="list-style-type: none"> • Dispendiosa 	<ul style="list-style-type: none"> • Produção em massa sob condições idênticas

Parte II

Métodos Utilizados e Resultados Obtidos

Capítulo 3

Procedimento experimental

Neste capítulo, tem-se como objetivo apresentar uma descrição detalhada da metodologia aplicada e do procedimento experimental utilizado na presente investigação, com o intuito de alcançar os objetivos propostos inicialmente.

3.1 Materiais

O material utilizado neste procedimento experimental foi o mesmo que é utilizado pela Bosch, de forma a otimizar os parâmetros de soldadura para esses materiais específicos.

3.1.1 Material de base

O material de base utilizado pela Bosch consiste em tubos de cobre do tipo CW024A, figura 3.1, com as características descritas no anexo A. Esses tubos possuem um diâmetro exterior nominal de 9,55 mm e uma espessura de 1 mm. No entanto, por vezes, apresentam alguns defeitos, sendo um deles uma forma ovalizada. Para avaliar esses defeitos, foram retiradas as dimensões dos tubos em cinco amostras distintas, cujos resultados estão apresentados na tabela 3.1, para medições dos diâmetros em duas posições perpendiculares entre si. Isso possibilitou uma análise mais precisa das características geométricas dos tubos, fornecendo informações relevantes para o desenvolvimento das ferramentas, indicadas na secção 3.2.

Tabela 3.1: Diâmetro externo dos tubos

Posição	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4		Amostra 5	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
∅ tubos (mm)	9.5	9.7	9.48	9.6	9.52	9.64	9.5	9.72	9.48	9.6

3.1.2 Material de adição

O material de adição utilizado pela Bosch neste processo é o BCuP281a, cujas características estão detalhadas no anexo B. Esse material é preformado em anéis de soldadura com um diâmetro exterior de 11 mm, figura 3.2, especialmente projetados para se encaixarem de maneira precisa na parte externa do tubo, permitindo uma união adequada durante o processo de brasagem. Os anéis foram fornecidos com espessuras de 1 mm e 1.5 mm, o



Figura 3.1: Tubos utilizados

que permitiu uma análise comparativa entre a qualidade das juntas soldadas destes dois tipos de anel. Com este material, como podemos observar na sua ficha técnica B, devido à sua composição incluir fósforo, para a brasagem de ligas de cobre, não é necessária a utilização de qualquer tipo de fluxo, visto que este elemento químico já age como fluxo.



Figura 3.2: Anel de material de adição

Na tabela 3.2 estão descritas as temperaturas características deste tipo de material. O termo *liquidus* refere-se ao valor de temperatura mais baixa sob condições de equilíbrio a que o metal se encontra completamente líquido e o termo *solidus* refere-se ao valor de temperatura mais alta sob condições de equilíbrio a que o metal se encontra totalmente no seu estado sólido [17].

Tabela 3.2: Características do material de adição

Classificação AWS	Solidus(°C)	Liquidus(°C)	Δ Temperatura de Brasagem (°C)
BCuP 281a	710	793	732-843

3.1.3 Gás de proteção

Como gás de proteção, foi utilizado o azoto, um gás inerte de baixo custo amplamente utilizado no processo de brasagem de cobre.

O azoto é um gás inerte para a maioria dos metais, no entanto a utilização deste gás deve ser feita de forma cuidadosa quando os metais a proteger têm na sua constituição elementos químicos como é o caso do titânio ou do crómio. O facto deste gás não ser combustível nem explosivo é um fator de segurança que também leva a que o azoto seja um gás muito requisitado. O azoto puro é uma excelente atmosfera protetora para a brasagem de cobre [17]. O azoto desempenha um papel crucial na prevenção da oxidação e contaminação dos materiais durante o processo de soldadura.

3.2 Ferramentas

Para viabilizar a preparação dos tubos e obter conexões soldadas de qualidade e com repetibilidade, foi imprescindível o desenvolvimento de ferramentas específicas, o mais aproximadas possível às utilizadas pela Bosch, mas adequadas à dimensão dos provetes. Esse processo foi iniciado com a modelação CAD dos produtos, seguido do desenvolvimento dos desenhos técnicos das peças, que posteriormente foram maquinadas e montadas manualmente.

3.2.1 Matriz e Punções

As primeiras ferramentas desenvolvidas foram a matriz e os punções, com o intuito de criar as folgas nos tubos. Foram produzidos dois punções, um com um diâmetro de $\varnothing 9,8$ mm e outro com um diâmetro de $\varnothing 9,9$ mm, conforme representado na figura 3.3, para permitir a criação de folgas de diferentes tamanhos. Essa abordagem possibilitou uma análise posterior para determinar qual opção proporcionava resultados mais favoráveis. O desenvolvimento dessas ferramentas foi um marco fundamental no processo de preparação dos tubos, visando alcançar os objetivos de qualidade e consistência nas conexões soldadas. Os desenhos técnicos destas ferramentas estão o anexo C.

3.2.2 Gabarito

Outra ferramenta necessária para a assegurar a consistência na soldadura é o gabarito. O gabarito é um dispositivo que permite segurar os tubos durante o processo de brasagem e que garante a concentricidade entre os materiais. Para este dispositivo foram desenvolvidos 3 ferramentas diferentes. Devido à ovalidade dos tubos, a conceção do gabarito foi um desafio complexo para assegurar o seu funcionamento eficiente. A eficácia dessa ferramenta é crucial para garantir a qualidade das soldaduras realizadas. Os desenhos técnicos destas ferramentas encontram-se no anexo D.



Figura 3.3: Matriz e punções

3.2.3 Ferramenta de Estanquidade

Para realizar testes à estanquidade das ligações soldadas foi também desenvolvida uma ferramenta. Esta ferramenta consiste em duas placas que com o auxílio de três barras roscadas e anilhas plásticas apertam o tubo pelas extremidades. Essa configuração permite a aplicação de ar comprimido, proveniente da rede disponível no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), para testar a vedação das soldas.

Com esta ferramenta os tubos serão isolados nas extremidades com recurso a anilhas de borracha e será injetado ar comprimido dentro dos tubos. Depois serão submersos em água e caso haja a formação de bolhas de ar é sinal que existe uma fuga na junta do tubo.

Os desenhos técnicos dos componentes desta ferramenta podem ser encontrados no anexo E.

3.2.4 Dobradiça

Durante a realização das atividades experimentais, surgiu a necessidade de observar o interior do forno. Para atender a essa necessidade, decidiu-se instalar uma porta com vidro. Essa porta já existia e fazia parte do material disponível no DEM, porém, não possuía uma dobradiça. Portanto, foi necessário desenvolver uma dobradiça específica para que encaixasse no forno, figura 3.4. Os desenhos técnicos dos componentes dessa dobradiça estão disponíveis no anexo F.

3.3 Preparação do Material

A etapa inicial na preparação dos tubos de cobre consistiu no corte dos tubos para as dimensões definidas para os provetes. Os tubos vinham em varas de 1 m e foram cortados



Figura 3.4: Dobradiça montada na porta do forno

Tabela 3.3: Diâmetro interno dos tubos

Posição	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4		Amostra 5	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
∅ interno (mm) (Punção 9.8mm)	9.9	9.86	9.88	9.9	9.9	9.82	9.88	9.82	9.84	9.88
∅ interno (mm) (Punção 9.9mm)	10.02	9.9	9.94	9.96	9.94	9.88	9.94	10	9.98	9.94

em pequenas amostras de 40 mm e 55 mm com recurso a um cortador de tubos de cobre.

Posteriormente, prosseguiu-se com o processo de alargamento dos tubos. Para tal, utilizaram-se uma matriz e punções para enformar as amostras com um comprimento de 40mm. A dimensão dos provetes foi escolhida visando reduzir o tempo de produção e garantir um encaixe mais preciso na matriz, minimizando possíveis erros. Através da máquina de testes universal Shimadzu AG-X plus 100kN, realizou-se a compressão necessária para criar a folga desejada, conforme ilustrado na figura 3.5. Essa operação possibilitou obter as dimensões desejadas nos tubos, preparando-os para as etapas subsequentes do processo de brasagem.

Os tubos foram enformados utilizando dois punções distintos, a fim de criar folgas de tamanhos diferentes nos tubos. Essa abordagem permitiu uma posterior análise comparativa para determinar qual medida seria a folga mais adequada para a brasagem destes tubos. As dimensões dos alargamentos obtidos estão detalhadas na tabela 3.3, fornecendo informações precisas sobre os resultados obtidos durante o processo de enformação dos tubos.

Para concluir a preparação dos tubos, os mesmos foram lixados na seção onde a brasagem será executada. Esta etapa tem como objetivo garantir uma superfície adequada para a soldadura, removendo quaisquer impurezas e promovendo a aderência ideal entre os materiais. Após a lixagem, os tubos foram lavados em água corrente utilizando sabão e um pano abrasivo. Esse procedimento tem o objetivo de remover qualquer tipo de gordura presente na superfície dos tubos, evitando assim a contaminação da soldadura.

Alguns anéis foram também cortadas e enformados de forma a ficarem com um diâmetro externo ligeiramente inferior a 9 mm, como podemos ver na figura 3.6, para que estes pudessem ser colocadas no interior dos tubos fazendo desta forma a brasagem com anel interno. No entanto apenas foi possível enformar os anéis de 1 mm devido ao facto de os anéis de 1.5 mm serem demasiado rígidos e partirem aquando da enformação.

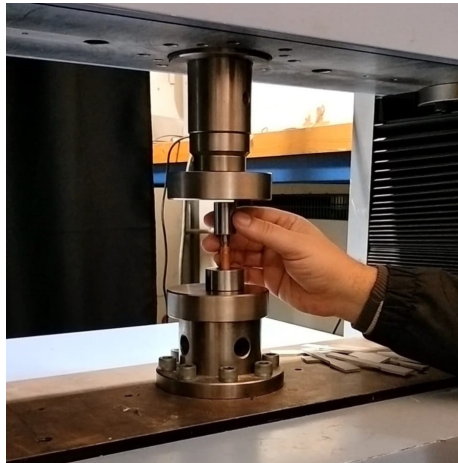


Figura 3.5: Processo de alargamento dos tubos



Figura 3.6: Comparação entre anéis exteriores e interiores

3.4 Processo de Brasagem

O processo de brasagem dos provetes inicia-se logo após a preparação destes. Este processo tem início com o pré aquecimento do forno à temperatura de funcionamento estabelecida. Após o forno estar à temperatura definida os tubos de cobre são colocados no gabarito juntamente com o anel de solda, que é sempre colocado no tubo de forma a que quando este funda penetre para a junta, pelo efeito de capilaridade facilitado pela gravidade, e por fim estes componentes são colocados no forno, figuras 3.7 e 3.8.

Numa primeira fase replicaram-se os parâmetros utilizados pela Bosch, onde os provetes foram inseridos no forno durante 50 minutos e com as temperaturas a variar entre os 710 °C e os 830 °C. Como gás de proteção, ao contrário da Bosch, onde é utilizada uma percentagem de hidrogénio, nesta atividade experimental foi utilizado o azoto, que para além do ser um gás compatível tanto com o material de base como com o material de adição era um gás que estava disponível para uso no DEM. A replicação destes parâmetros tem como objetivo a obtenção de provetes similares à produção das linhas da Bosch para mais tarde serem comparados com os provetes que serão obtidos nesta investigação.

Em seguida, de forma a tentar replicar o processo de brasagem por indução, e diminuir o tempo de brasagem ao mínimo, procurou-se saber qual era o tempo mínimo para que



Figura 3.7: Colocação do tubo com anel externo no gabarito



Figura 3.8: Colocação do tubo com anel interno no gabarito

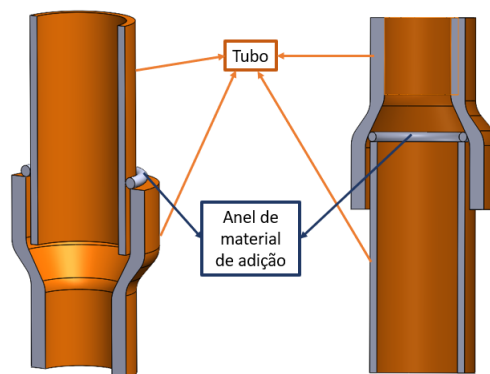


Figura 3.9: Esquema de colocação do material de adição

o material de adição fundisse para cada temperatura de brasagem. Para isto, colocou-se uma porta com um vidro no forno, de forma a que o interior ficasse visível, e através de um processo iterativo, onde se foi aumentando gradualmente a temperatura chegou-se aos valores apresentados na tabela 3.4.

Com este procedimento surgiu um contratempo que estava a afetar os valores retirados. Devido à grande dimensão do gabarito desenvolvido, figura 3.7, este possuía uma grande inércia térmica que aquando da sua inserção no forno, a temperatura baixava gradualmente durante cerca de 5 minutos. Esta diminuição na temperatura dava-se até ao gabarito atingir a temperatura do forno. A solução encontrada foi utilizar um gabarito que serve de suporte para os tubos, mas que não garante a concentricidade, figura 3.10.

Após a obtenção dos valores de tempo foi realizada a brasagem a diversos provetes com parâmetros variáveis conforme indicado na tabela 3.5:

- Temperatura e de forma inerente o tempo

Tabela 3.4: Tempo de fusão do material de adição

Temperatura (°C)	Tempo para fusão completa
710	2min 40s
730	2min 43s
770	1min 45s
800	1min 30s
810	1min 20s
820	1min
830	1min
860	1min



Figura 3.10: Gabarito utilizado na brasagem dos provetes

- Colocação da anilha (interna / externa)
- Espessura da anilha

Foram produzidos três provetes para cada amostra realizada, resultando num total de quarenta e dois provetes. Na tabela 3.5 o nome das amostras foi dado de forma a indicar os parâmetros utilizados, temperatura - gás de proteção - tempo de brasagem - dimensão e colocação do anel - tamanho da folga.

3.5 Testes Realizados

Para testar a qualidade das ligações soldadas foram utilizados 4 métodos para além da inspeção visual.

3.5.1 Teste de estanquidade

O primeiro ensaio realizado em todas as amostras foi o teste de estanquidade. Nesse teste, cada amostra foi inserida em uma ferramenta, conforme mostrado na Figura 3.11,

Tabela 3.5: Parâmetros de brasagem dos provetes

Amostra	Ø punção	Gás	Temperatura °C	Tempo	Anel	Espessura (mm)
V-cg-50-1.5e-p	9.8	C/ gás	710-830	50 min	Externo	1.5
710-sg-2.4-1.5e-p		S/ gás	710	2 min 40 seg	Externo	1.5
730-sg-2.3-1.5e-p		S/ gás	730	2 min 30 seg	Externo	1.5
770-sg-1.45-1.5e-p		S/ gás	770	1 min 45 seg	Externo	1.5
800-sg-1.3-1.5e-p		S/ gás	800	1 min 30 seg	Externo	1.5
800-sg-1.3-1i-p		S/ gás	800	1 min 30 seg	Interno	1
810-sg-1.2-1.5e-p		S/ gás	810	1 min 20 seg	Externo	1.5
820-sg-1-1.5e-p		S/ gás	820	1 min	Externo	1.5
820-sg-1-1e-p		S/ gás	820	1 min	Externo	1
820-sg-1-1i-p		S/ gás	820	1 min	Interno	1
860-sg-1-1.5e-p		S/ gás	860	1 min	Externo	1.5
860-sg-1-1i-p		S/ gás	860	1 min	Interno	1
820-sg-1-1.5e-g		9.9	S/ gás	820	1 min	Externo
820-sg-1-1i-g	S/ gás		820	1 min	Interno	1

e foi injetado ar comprimido proveniente da rede de ar comprimido do Departamento de Engenharia Mecânica, com uma pressão de 8 bar, no interior da amostra. Em seguida, o conjunto foi submerso em água, e foi verificado se havia ou não a formação de bolhas de ar. Se não fossem detectadas bolhas de ar, a amostra era considerada estanque.



Figura 3.11: Ferramenta para teste de estanquidade

3.5.2 Microtomografia computadorizada (Micro-CT)

Em seguida recorreu-se também ao processo de Micro-CT, uma tecnologia de raios-X que permite fazer um scan integral do objeto. A microtomografia computadorizada é uma técnica de aquisição de imagem não destrutiva que utiliza raios-X para gerar imagens tridimensionais de alta resolução da estrutura interna de um objeto. Essa tecnologia é amplamente aplicada em diversas áreas, abrangendo desde a medicina, onde pode ser empregada na detecção de tumores, até a biologia e a ciência dos materiais [24], esta última sendo a área de aplicação em questão neste estudo.

Neste caso tentou-se fazer um scan da ligação soldada, figura 3.12, de forma a perceber a penetração e qualidade do material de adição na junta. Devido à densidade desta e ao facto de a máquina de testes ser de pequena dimensão, submeteu-se a máquina aos seus parâmetros máximos, uma tensão de 100 kV e uma corrente de 100 mA.

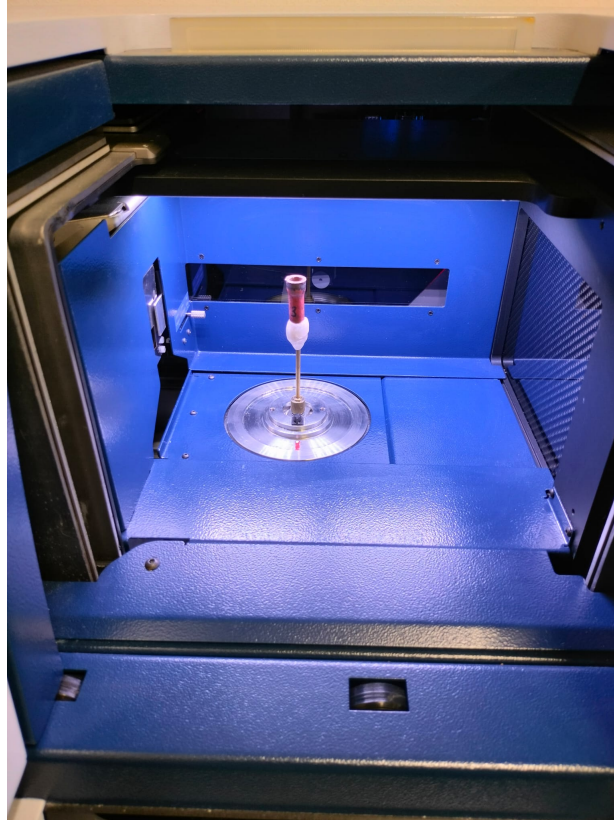


Figura 3.12: Realização da microtomografia computadorizada

3.5.3 Microscopia eletrónica (SEM e EDS)

A Microscopia eletrónica de varrimento (SEM) e a Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) são duas técnicas amplamente utilizadas na área de estudo dos materiais bem como em muitas outras áreas para analisar a composição química e estrutura dos materiais.

SEM

A Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM), utiliza um feixe de eletrões focalizado para varrer a superfície de uma amostra, o que permite a obtenção de imagens de alta resolução da sua superfície. As interações dos eletrões com os átomos da amostra produzem sinais que são utilizados para a reconstrução da imagem. Esta tecnologia é frequentemente utilizada juntamente com outros métodos, como é o caso da Espectrometria de raios-X por Dispersão de Energia (EDS), para determinar a composição química da amostra [25].

EDS

A Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia é um método utilizado para determinar a composição química de uma amostra. Nesse método, elétrons de alta energia são direcionados para a amostra, resultando na emissão de raios X pelos átomos presentes. A detecção e análise desses raios X permitem a identificação dos elementos presentes na amostra. A técnica de espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) é frequentemente combinada com a microscopia eletrônica de varredura (SEM) [26].

A combinação destas duas técnicas proporciona uma análise mais completa e detalhada das propriedades dos materiais.

3.5.4 Microscopia ótica

O ultimo teste realizado aos tubos foi a microscopia ótica. De forma a obter informações satisfatórias acerca da ligação soldada, este processo torna-se um processo destrutivo. É necessário cortar os tubos tanto transversalmente à ligação brasada, de forma a perceber que tipo de defeitos existem na junta de ligação como longitudinalmente, como se pode ver na figura 3.13, de forma a ver qual a penetração do material de adição.

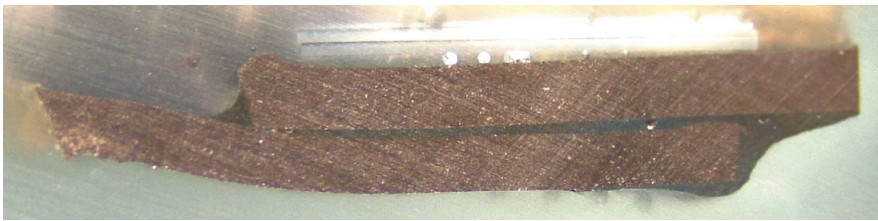


Figura 3.13: Corte transversal à junta

Para a obtenção de bons resultados através deste método é também necessário polir as amostras antes da sua visualização ao microscópio. Nos provetes cortados transversalmente à junta, foi iniciado logo o polimento que foi realizado numa lixadora de bancada, e foi iniciado com uma lixa de grão 360, passando para uma de grão 800, da qual se seguiu uma de grão 1200 e por fim uma de grão 2400, é de referir, que de modo a evitar contaminação com grão que se possam ter soltado da lixa, os provetes foram cuidadosamente limpos entre cada mudança de lixa. Na figura 3.14 pode-se ver o estado inicial das amostras após o corte e o resultado após a lixação.

Nos provetes cortados longitudinalmente à junta, devido à sua pequena dimensão foi necessário envolvê-los em resina epóxi de forma a facilitar o seu manuseamento durante o ato de lixar. A preparação destas pequenas amostras começou com o corte das mesmas à medida pretendida. Depois fixaram-se as amostras na posição pretendida com um clipe de plástico. Em seguida passou-se óleo de silicone numa forma, onde após este passo foram colocadas as amostras. Passou-se então para a preparação da resina epóxi de seis horas de cura, onde se misturou uma parte de endurecedor para quatro de resina. Mexeu-se até existir uma mistura homogênea e verteu-se para a forma. Levou-se a forma a uma câmara de vácuo onde se ia criando vácuo e deixando ar entrar de forma a remover as bolhas de ar existentes na resina. Por fim deixou-se a curar durante a noite. O restante tratamento foi igual ao descrito anteriormente.



Figura 3.14: Diferença de aspeto entre tubos cortados e tubos polidos

Capítulo 4

Resultados

4.1 Teste de estanquidade

O teste de estanquidade foi realizado a uma pressão de 8 bar em todos os provetes, como demonstrado na figura 3.11 antes destes serem submetidos a qualquer outro tipo de testes. Os resultados obtidos neste teste estão na tabela 4.1. Os resultados obtidos neste teste foram muito satisfatórios, com cerca de 92% dos tubos brasados a serem estanques. Dos provetes que não tiveram resultados positivos na estanquidade, em dois deles não se deu a fusão total do material de adição, como é possível verificar na figura 4.1, sendo que numa das amostras, parte do anel de material de adição derreteu para fora da junta.



Figura 4.1: Fusão parcial do anel de adição

4.2 Microtomografia Computadorizada (Micro-CT)

A micrografia computadorizada foi realizada num provete, no entanto, ao analisar as figuras 4.2 e 4.3, verificamos que os resultados obtidos foram insatisfatórios, não permitindo obter conclusões concretas. A baixa qualidade das imagens obtidas está relacionada ao facto de que a máquina utilizada é de pequena dimensão e ajustada para provetes de menor dimensão e menos densos. Apesar da microtomografia ter sido realizada com a máxima potência da máquina, devido ao tamanho e densidade do provete testado, não foi possível obter imagens que reproduzissem adequadamente a amostra. O objetivo dessa

Tabela 4.1: Resultados dos testes de estanquidade

Amostra	Estanquidade		
	OK	OK	OK
V-cg-50-1.5e-p	OK	OK	OK
710-sg-2.4-1.5e-p	OK	NOK	OK
730-sg-2.3-1.5e-p	OK	OK	NOK
770-sg-1.45-1.5e-p	OK	OK	OK
800-sg-1.3-1.5e-p	OK	OK	OK
800-sg-1.3-1i-p	OK	OK	OK
810-sg-1.2-1.5e-p	OK	OK	OK
820-sg-1-1.5e-p	OK	OK	OK
820-sg-1-1e-p	NOK	OK	OK
820-sg-1-1i-p	OK	OK	OK
860-sg-1-1.5e-p	OK	OK	OK
860-sg-1-1i-p	OK	OK	OK
820-sg-1-1.5e-g	OK	OK	OK
820-sg-1-1i-g	OK	OK	OK

análise era visualizar a penetração do material de adição na junta, assim como possíveis defeitos, porém, torna-se impossível com a definição das imagens obtidas.

4.3 Microscopia Ótica

Para a microscopia ótica dos tubos foi utilizado um Leica EZ4W. Este microscópio consegue ampliações desde 8 até 35 vezes o tamanho real e é indicado para analisar com praticidade mas também com precisão as ligações soldadas dos tubos. Para facilitar o processo e garantir alguma orientação durante a utilização do microscópio foram marcados alguns pontos nos tubos como se pode ver na figura 4.8.

Começou-se por fazer uma análise de todos os provetes com uma ampliação de 8 vezes, como a representado na figura 4.4. Com estas imagens é possível ter uma visão geral de toda a soldadura, e permitem a análise de diversos fatores tal como se existe uniformidade do material de adição pela junta, permitem detetar falhas de maior dimensão bem como grandes faltas de material, tais como as da figura 4.14 e também possibilita uma análise à homogeneidade da dimensão da folga.

Em seguida utilizou-se a ampliação de 35 vezes do microscópio, figura 4.5 de forma a ter imagens mais detalhadas da junta dos provetes. Esta ampliação permite obter uma imagem muito mais detalhada de pequenas porções da junta de ligação. Desta forma é possível visualizar e contabilizar pequenos defeitos existentes no material de adição. Com esta ampliação foram retiradas imagens de todos os provetes ao longo de toda a junta, possibilitando uma posterior análise quantitativa de todos os defeitos existentes.

O tratamento das imagens obtidas foi feito com o *software open source* Image J. Este *software* permite carregar as imagens obtidas e após fazer a calibração do tamanho, com recurso a uma medida conhecida, que neste caso foi a espessura dos tubos, permite fazer medições com exatidão. Este programa foi utilizado para obter os valores mínimos e máximos da espessura da folga da junta e também para medir com precisão a área de todos os defeitos visíveis nas imagens.

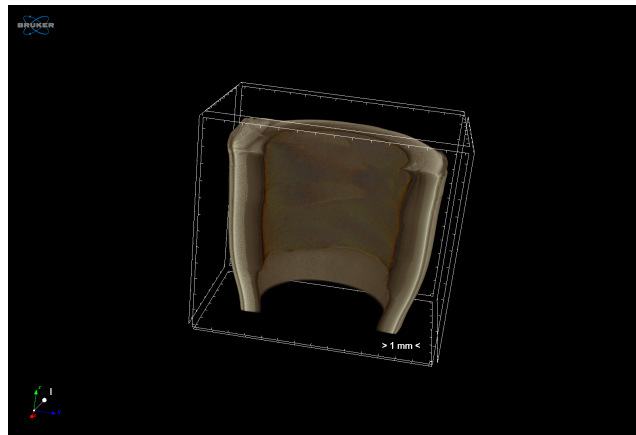


Figura 4.2: Resultado Micro CT - Vista em corte

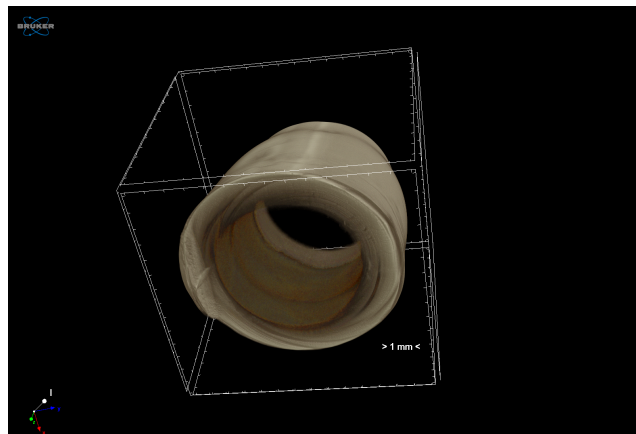


Figura 4.3: Resultado Mircro CT

As primeiras imagens a ser analisadas com o software foram as de menor ampliação e a recolha de dados incidu na variação da folga dos provetes e se a amostra em análise tinha zonas com falta de material, qual é a espessura da folga em que estes defeitos ocorrem bem como qual é a área total das falhas de material. Os dados obtidos estão apresentados na tabela 4.2. É entendido como sendo uma falta de material um defeito da junta, em que não existe qualquer material de adição entre os dois componentes soldados numa dada secção da amostra, como os defeitos realçados na figura 4.14.

Dos dados obtidos nesta análise é possível constatar que o tamanho da folga está relacionado com as faltas de material na junta. Dividindo o número de defeitos deste tipo existentes em diferentes dimensões da folga em que eles ocorrem pelo número total de defeitos deste tipo, dezanove, gráfico 4.11, temos que, cerca de 17.6% dos defeitos ocorrem quando a dimensão da folga é igual ou inferior a 0.1 mm e 73.7% dos defeitos ocorrem quando a folga entre os componentes tem uma dimensão superior a 0.25 mm. Destes 73.7%, 50% dos defeitos dá-se quando a folga é igual ou superior a 0.3 mm. Para os valores compreendidos entre 0.39 mm e 0.59 mm não existem valores registados

Com o gráfico 4.7 também é possível constatar que o tipo de anel de material de adição tem influência no aparecimento de defeitos de falta de material. Podemos perceber que para uma temperatura de brasagem de 820 °C o anel de material de adição externo de

Tabela 4.2: Dimensão real da folga dos provetes

Amostra	E. máx. (mm)	E. mín. (mm)	F. mat.	E. na falha (mm)	Área (mm^2)
V-cg-50-1.5e-p	0.42	0.08	Sim	0.1	0.119
710-sg-2.4-1.5e-p	0.3	0.12	Sim	0.3	1.175
710-sg-2.4-1.5e-p	0.33	0.12	Sim	0.3	1.213
730-sg-2.3-1.5e-p	0.25	0.1	Sim	0.1	0.5
730-sg-2.3-1.5e-p	0.27	0.13	Sim	0.27	0.76
770-sg-1.45-1.5e-p	0.22	0.07	Sim	0.22	0.41
770-sg-1.45-1.5e-p	0.2	0.06	Não	-	0
800-sg-1.3-1.5e-p	0.29	0.07	Sim	0.29	3.77
800-sg-1.3-1.5e-p	0.17	0.08	Sim	0.16	0.68
800-sg-1.3-1i-p	0.27	0.24	Sim	0.27	1.97
800-sg-1.3-1i-p	0.29	0.12	Sim	0.29	2.53
810-sg-1.2-1.5e-p	0.11	0.07	Sim	0.09	1.08
810-sg-1.2-1.5e-p	0.27	0.06	Sim	0.27	1.55
820-sg-1-1.5e-p	0.26	0.06	Sim	0.26	1.6
820-sg-1-1.5e-p	0.37	0.08	Sim	0.37	2.44
820-sg-1-1e-p	0.24	0.18	Não	-	0
820-sg-1-1e-p	0.26	0.14	Não	-	0
820-sg-1-1i-p	0.3	0.09	Sim	0.3	2.46
820-sg-1-1i-p	0.25	0.06	Não	-	0
860-sg-1-1.5e-p	0.3	0.1	Sim	0.3	1.86
860-sg-1-1.5e-p	0.34	0.08	Sim	0.34	2.8
860-sg-1-1i-p	0.27	0.14	Sim	0.27	0.2
860-sg-1-1i-p	0.25	0.06	Não	-	0
820-sg-1-1.5e-g	0.61	0.03	Sim	0.61	2.11
820-sg-1-1.5e-g	0.65	0.02	Sim	0.65	4.65
820-sg-1-1i-g	0.28	0.24	Não	-	0
820-sg-1-1i-g	0.3	0.23	Não	-	0



Figura 4.4: Ampliação de 8x no provete 10

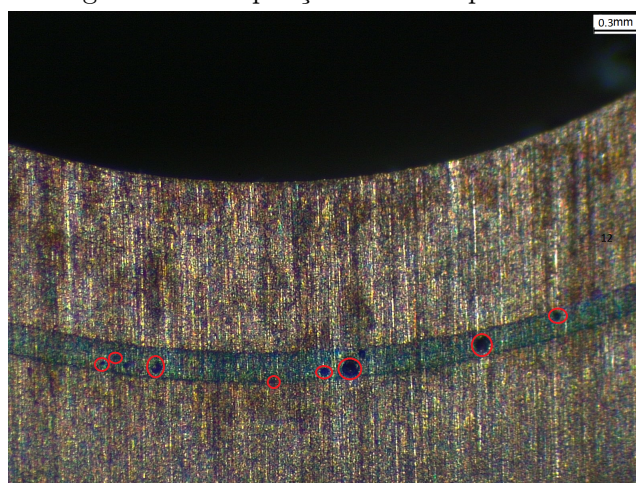


Figura 4.5: Ampliação de 35x no provete 10

menor espessura leva a que os defeitos de falta de material de adição sejam maiores. No entanto a aplicação do anel de material de adição internamente faz com que este tipo de defeitos tenha uma redução muito substancial na sua dimensão, sendo que em alguns provetes nem existe.

Posteriormente analisaram-se então as imagens dos provetes com maior ampliação. Nestas imagens é possível encontrar defeitos mais pequenos como aqueles apresentados na figura 4.8. Com recurso ao programa Image J, estes defeitos, para além de terem sido todos contabilizados foram também medidos. Foi portanto possível dividir o número de defeitos de cada amostra pelo seu tamanho.

Nesta análise os defeitos foram divididos em duas categorias. Os defeitos de maior dimensão, *defeitos grandes*, que são os defeitos visíveis com uma ampliação de 8x, como o defeito assinalado na figura 4.8. É considerado um defeito grande, uma malformação que tenha um valor igual ou superior a 0.003 mm^2 . Os *defeitos pequenos* são as malformações visíveis com uma ampliação máxima de 35x e com dimensão inferior a 0.003 mm^2 .

A contabilização de todos os defeitos é apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Defeitos por provete

Proвете	Defeitos grandes	Defeitos pequenos
V-cg-50-1.5e-p	27	14
V-cg-50-1.5e-p	-	-
710-sg-2.4-1.5e-p	54	16
710-sg-2.4-1.5e-p	47	21
730-sg-2.3-1.5e-p	68	7
730-sg-2.3-1.5e-p	-	-
770-sg-1.45-1.5e-p	40	14
770-sg-1.45-1.5e-p	32	22
800-sg-1.3-1.5e-p	38	16
800-sg-1.3-1.5e-p	28	10
800-sg-1.3-1i-p	44	10
800-sg-1.3-1i-p	49	8
810-sg-1.2-1.5e-p	42	12
810-sg-1.2-1.5e-p	35	9
820-sg-1-1.5e-p	27	10
820-sg-1-1.5e-p	25	19
820-sg-1-1e-p	23	10
820-sg-1-1e-p	-	-
820-sg-1-1i-p	44	16
820-sg-1-1i-p	65	18
860-sg-1-1.5e-p	33	14
860-sg-1-1.5e-p	-	-
860-sg-1-1i-p	37	21
860-sg-1-1i-p	33	16
820-sg-1-1.5e-g	31	6
820-sg-1-1.5e-g	37	9
820-sg-1-1i-g	28	7
820-sg-1-1i-g	37	15

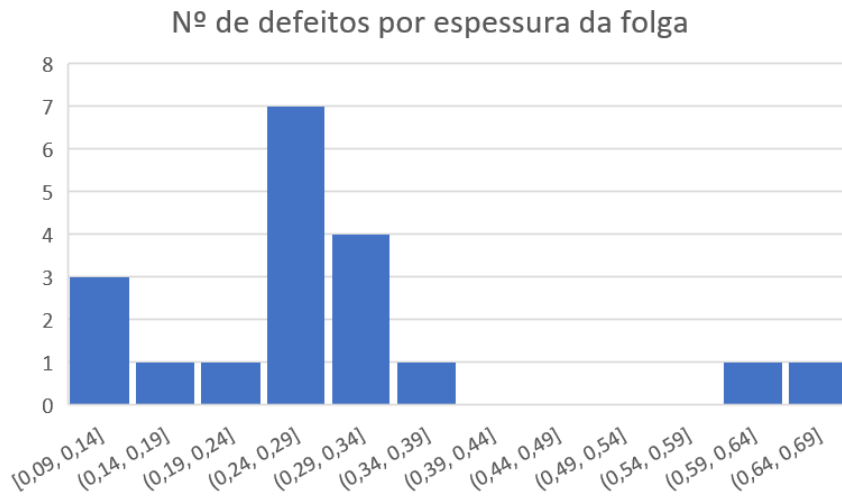


Figura 4.6: Nº de defeitos de falta de material por dimensão da folga

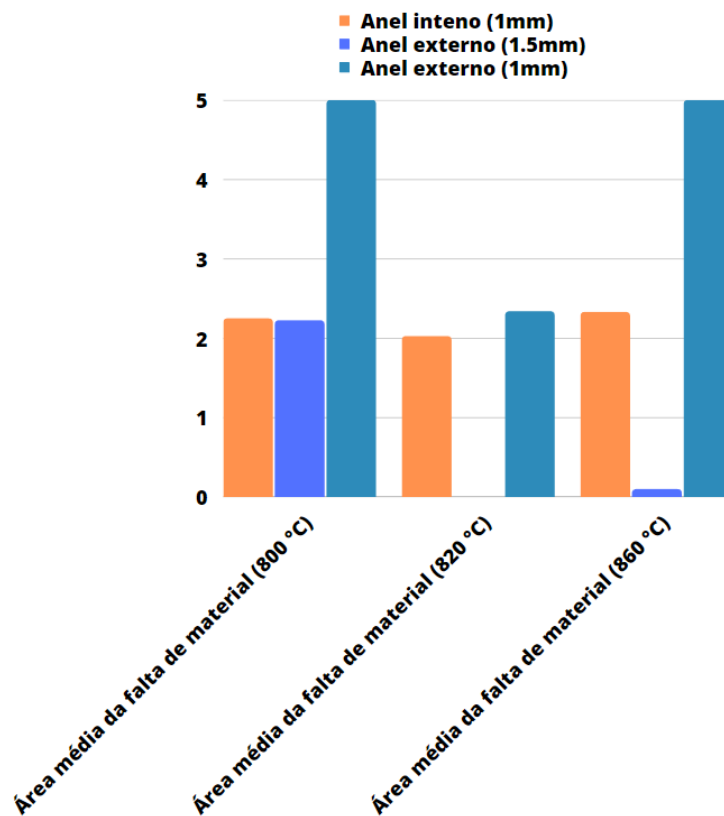


Figura 4.7: Área média do defeito (mm^2) de falta de material por tipo de anel de material de adição

4.3.1 Variação de tempo e temperatura

Ao analisar as imagens este tipo de defeitos não apresenta uma correlação com a dimensão da folga no provete. No entanto, é possível observar que o número e dimensão dos

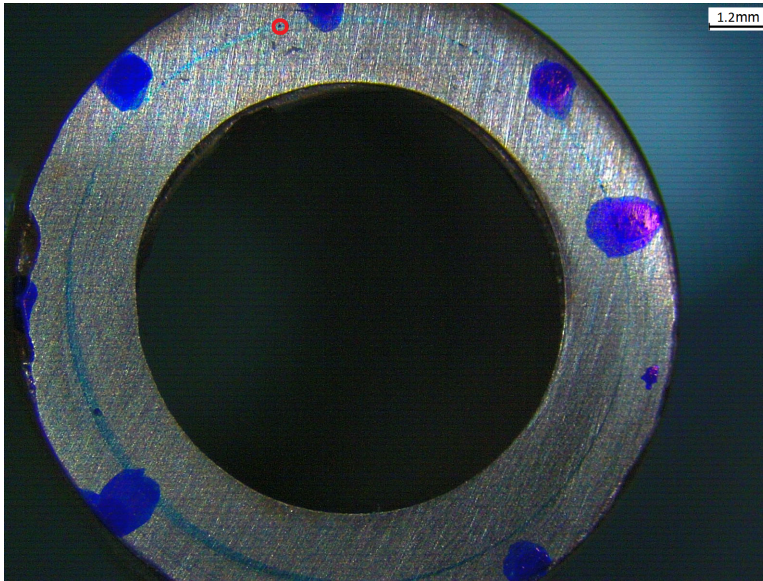


Figura 4.8: Ampliação 8x- Provete 14

defeitos variam de acordo com a temperatura de brasagem, que também está diretamente relacionada com o tempo que a amostra se encontra dentro do forno.

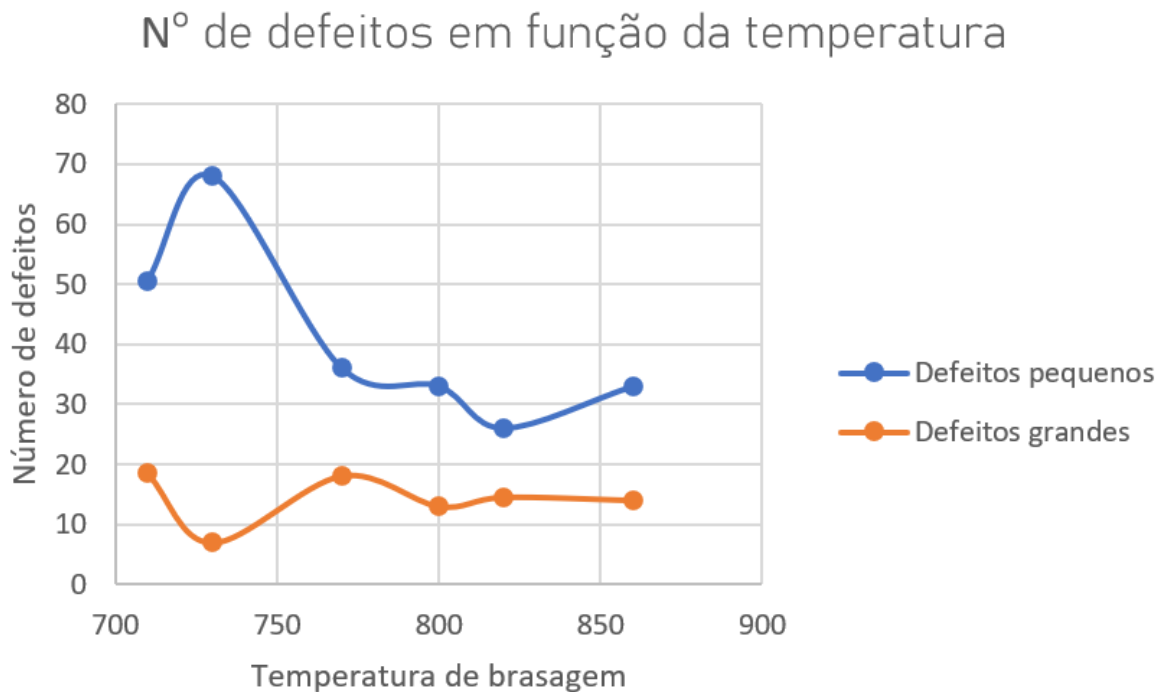


Figura 4.9: Número de defeitos em função da temperatura de brasagem

No gráfico 4.9 estão representados o número médio de defeitos de cada amostra, em

função da temperatura a que estas foram soldadas. De forma a que a comparação seja coerente, para esta análise foram apenas utilizadas as amostras alargadas com o punção de $\varnothing 9.8$ mm e que foram brasadas com um anel de material de adição externo de 1.5 mm.

Daqui é possível perceber que a quantidade de defeitos pequenos existentes na amostra diminui com a temperatura até uma temperatura máxima de 820°C , uma temperatura muito semelhante aos 830°C anunciados pelo fabricante do material de adição como temperatura máxima de brasagem.

Já os defeitos grandes têm um padrão menos regular e a quantidade deste tipo de defeitos não segue uma tendência de acordo com a variação de temperatura e tempo de brasagem.

4.3.2 Variação do tipo de anel de adição

Outro fator importante de analisar é a influência que a quantidade e forma de colocação do material de adição têm na quantidade e tamanho dos defeitos.

No gráfico 4.10 é representada a média dos defeitos presentes nos provetes das amostras oito, nove e dez respetivamente. Estas amostras foram as escolhidas para esta análise devido à sua uniformidade no que toca aos parâmetros de brasagem, como o tempo e temperatura de brasagem, um minuto a 820°C , de forma a permitir uma comparação sem outro tipo de variáveis.

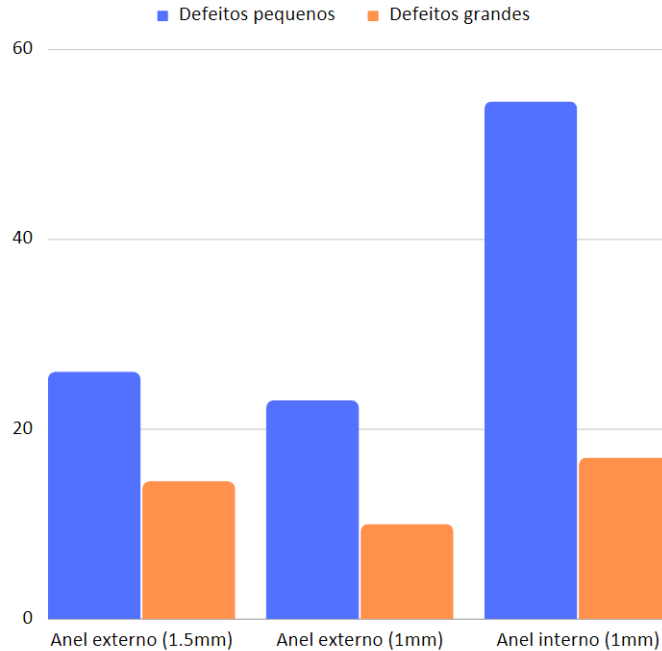


Figura 4.10: Número de defeitos por tipo de anel de material de adição (Temperatura de brasagem= 820°C)

Analisando estes dados pode-se perceber que, para folgas desta dimensão com a utilização de anéis de material de adição externos o número de defeitos é bastante inferior

ao número de defeitos existentes nos provetes que foram brasados com anéis de material de adição internos.

Outro dado interessante que pode ser retirado é que existe uma pequena diminuição no número de defeitos existentes nas amostras em que foram utilizados anéis de 1 mm de espessura em relação às amostras em que os anéis eram de 1.5mm.

4.3.3 Variação da folga

A variação da folga criada nos provetes foi outra variável inserida na análise e como se pode ver no gráfico 4.11 existe uma variação do número de defeitos existentes tendo em conta a dimensão da folga.

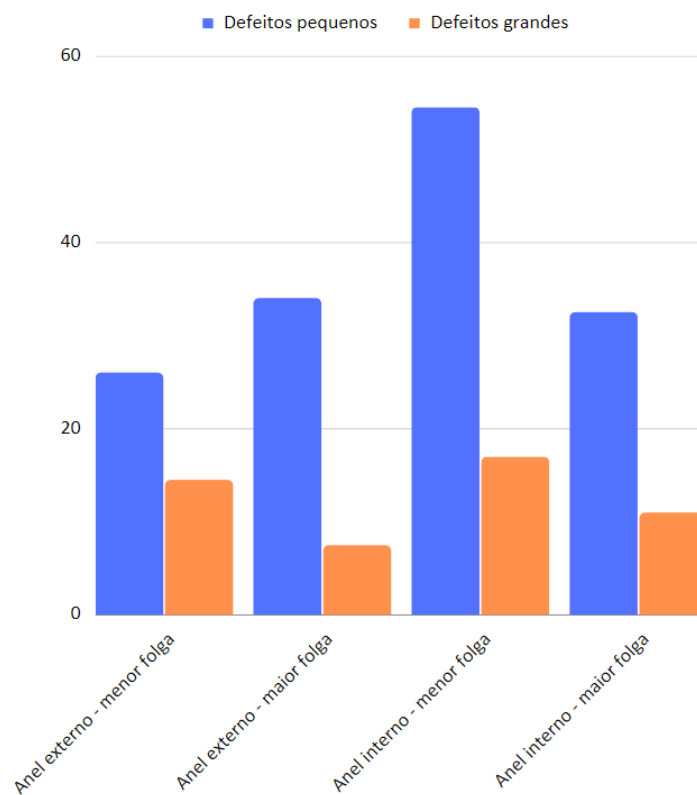


Figura 4.11: Número de defeitos por folga criada

Para os anéis de material de adição externos pode ver-se um aumento no número de pequenos defeitos quando a folga da junta é maior, no entanto, a quantidade de defeitos grandes é inferior à quantidade deste tipo de malformações para uma folga inferior.

Nos anéis de adição colocados internamente na junta, é possível verificar uma diminuição quer na quantidade dos defeitos de pequena como de grande dimensão para as juntas com uma folga de maior dimensão.

4.3.4 Cortes transversais à junta

De forma a perceber qual a penetração do material de adição na junta e também a quantidade de defeitos que existem em profundidade bem como a sua dimensão foram



Figura 4.12: Corte transversal do provete com ampliação de 8x- Amostra 8

feitos cortes transversais à junta em alguns provetes, figura 4.12. As amostras analisadas com este método foram as amostra 1, 5, 8, 9, 10 e 11. Estas amostras foram escolhidas de forma a analisar qual o impacto que a temperatura e que os diferentes tipos de anel de adição têm na penetração do material de adição.

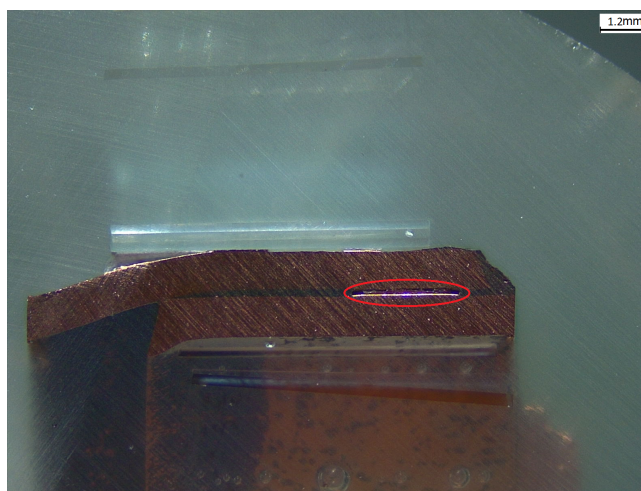


Figura 4.13: Corte transversal do provete com ampliação de 8x- Amostra 5

Ao analisar as imagens constata-se que existiu penetração total da junta pelo material de adição, no entanto, no provete da amostra 5, que corresponde ao processo de brasagem a 820 °C com o anel de material de adição exterior e com 1 mm de espessura, existe uma secção da junta caracterizada por uma grande falta de material, figura 4.13.

4.4 Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM) e Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS)

Com recurso à Microscopia Eletrónica de Varrimento, onde foram analisados dois provetes, um provete da amostra um, a amostra de referência ou controlo, e um provete da amostra 8 foi possível detetar três tipos de defeito existentes no material de adição.

Nas figuras 4.14 e 4.15 é apresentado o primeiro tipo de defeito identificado. A porção assinalada nestas figuras é um espaço vazio. Estes espaços vazios tem diversas dimensões, que vão desde bolsas com diâmetros de poucos micrómetros como na figura 4.15, até grandes falhas que são visíveis a olho nú, figura 4.14. Estes espaços vazios podem ter sido causados por diversos fatores, como por exemplo gás preso dentro da junta poderá ter causado as falhas de menor dimensão, no entanto, as grandes falhas visíveis a olho nú foram causadas pelo movimento dos componentes com o material de adição ainda no seu estado fluido, no processo de retirar os provetes do forno.

Outro tipo de defeitos que pode ser encontrado através deste método são as fissuras, representada na figura 4.16. Estas fissuras ocorrem na fronteira entre o material de base e o material de adição, e devido ao seu contorno poderão também ser criadas aquando da remoção do provete do forno, com o movimento gerado.

Ainda no mesmo aparelho foi realizado um teste de EDS num provete da amostra 8. A secção do provete utilizada neste processo está representada na figura 4.17, onde, devido às características visuais, é possível distinguir bem o material de base do material de adição, tendo estes a linha de divisória marcada a vermelho. Nesta imagem, que foi obtida com uma ampliação de trezentas vezes, para além do contraste entre os dois tipos de material, temos também alguns defeitos presentes no material de adição, pelo que é interessante perceber qual a sua composição química de forma a tentar perceber a causa destes defeitos.

A primeira análise realizada foi uma análise geral desta secção, representada na figura 4.17, de forma a obter informação acerca de todos os componentes que se encontram presentes na amostra. Os resultados obtidos podem ser consultados na tabela 4.4, e demonstram que a amostra é na sua maioria composta pelo elemento químico *Cu*, contendo também alguns vestígios de carbono, oxigénio e fósforo, que é proveniente do material de adição.

Tabela 4.4: Componentes químicos da amostra geral de EDS

Elemento	Número atómico	Massa na amostra (%)
Cobre (Cu)	29	87.12
Carbono (C)	6	8.34
Oxigénio (O)	8	1.62
Fósforo (P)	15	3.09

Em seguida foi analisado um espaço correspondente ao material de base, figura 4.18, onde os resultados obtidos, tabela 4.5, vão ao encontro do que é apresentado na ficha técnica dos tubos de cobre B com este material a ser composto com cerca de 92% de cobre, e sendo os restantes componentes químicos o oxigénio e o carbono.

Na análise feita ao material de adição, figura 4.19, podemos ver que este é também maioritariamente composto por cobre, no entanto, para além do oxigénio e do carbono,

Tabela 4.5: Componentes químicos da amostra de material de base

Elemento	Número atômico	Massa na amostra(%)
Cobre (Cu)	29	91.22
Carbono (C)	6	8.06
Oxigênio (O)	8	0.81

é também encontrada um percentagem significativa de fósforo, como apresentado na tabela 4.6, o que era expectável, pois vai de encontro à informação técnica fornecida pelo fabricante deste material, anexo B.

Tabela 4.6: Componentes químicos da amostra de material de adição

Elemento	Número atômico	Massa na amostra (%)
Cobre (Cu)	29	84.32
Carbono (C)	6	8.42
Oxigênio (O)	8	1.01
Fósforo (P)	15	6.26

Por fim foi analisada a composição química de um defeito existente na junta, figura 4.20, e como se pode observar na tabela 4.7, esta amostra para além do cobre, carbono e fósforo existentes nas outras amostras, apresenta valores muito elevados de oxigênio, na ordem dos 26%, o que indica que este defeito terá sido causado através da oxidação e que se terá formado um óxido naquela bolsa de material.

Tabela 4.7: Componentes químicos da amostra do defeito

Elemento	Número atômico	Massa na amostra (%)
Cobre (Cu)	29	44.67
Carbono (C)	6	11.17
Oxigênio (O)	8	26.16
Fósforo (P)	15	15.10

Tabela 4.8: Componentes químicos da amostra do defeito

O relatório detalhado da análise por EDS encontra-se no anexo G

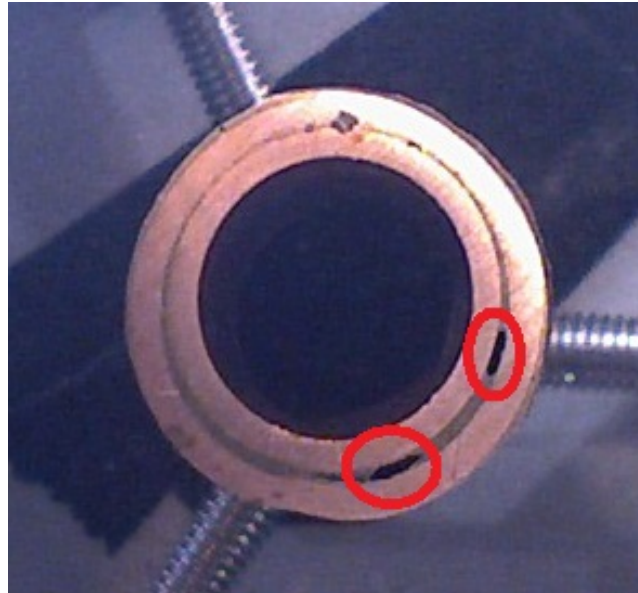


Figura 4.14: Falta de material de adição - Amostra 8

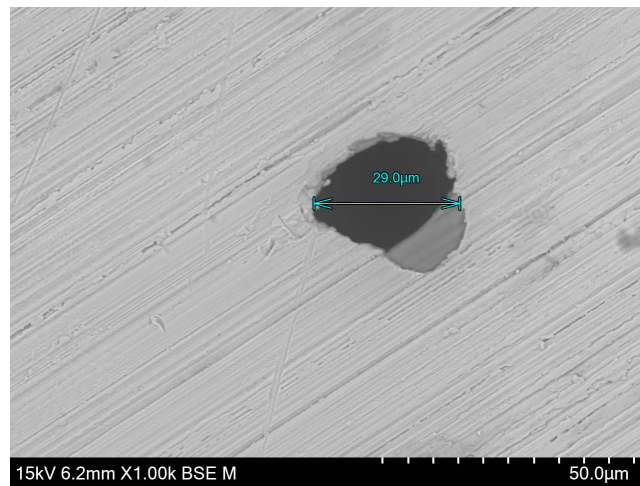


Figura 4.15: Pequena bolsa de falta de material de adição - Amostra 8 - Ampliação 1000x

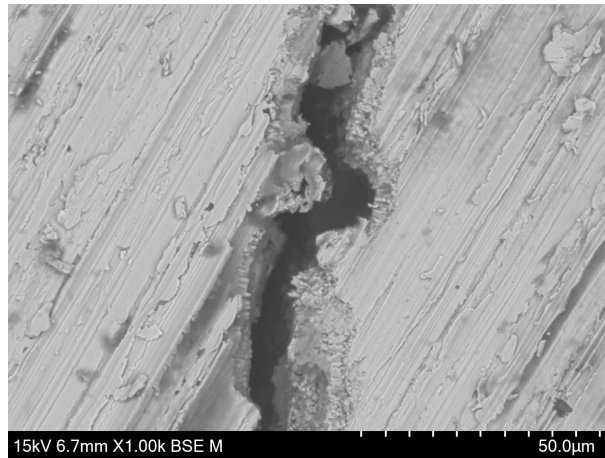


Figura 4.16: Fissura na junta de ligação - Amostra 8 - Ampliação 1000x



Figura 4.17: Localização onde foi realizado o processo de EDS de uma forma geral - Amostra 13 - Ampliação 1000x

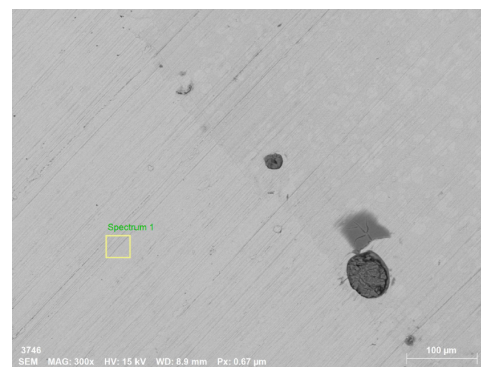


Figura 4.18: Localização onde foi realizado o processo de EDS ao material de base - Amostra 13 - Ampliação 1000x

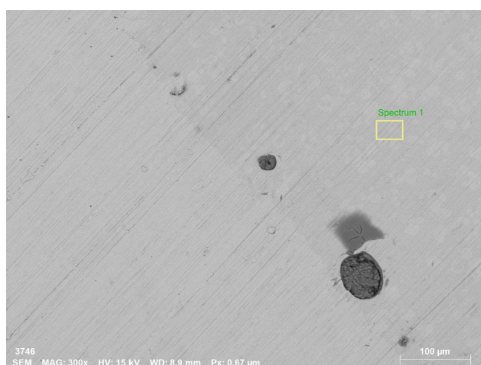


Figura 4.19: Localização onde foi realizado o processo de EDS ao material de adição - Amostra 13 - Ampliação 1000x

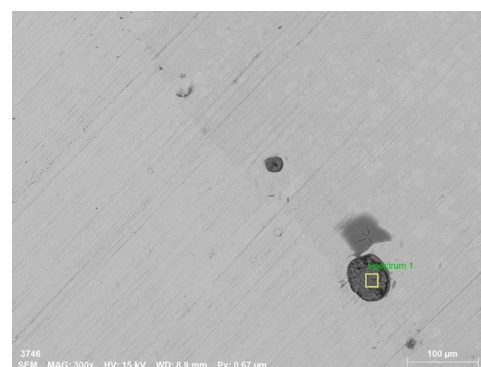


Figura 4.20: Localização onde foi realizado o processo de EDS ao defeito - Amostra 13 - Ampliação 1000x

Intentionally blank page.

Parte III

Conclusões e Trabalhos Futuros

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões finais deste trabalho, expor algumas limitações e dificuldades encontradas durante sua realização, assim como propor alguns trabalhos que seria interessante efetuar futuramente.

O estudo foi conduzido com o propósito de alcançar todos os objetivos estabelecidos. No entanto, alguns resultados ficaram aquém das expectativas em certos aspectos.

Começando pelo processo de brasagem dos provetes, foi possível realizar com sucesso, embora a alta inércia térmica do gabarito inicialmente desenvolvido tenha exigido a adoção de um novo método para a brasagem, que implicou apoiar os provetes apenas pela base durante o processo. No entanto, conseguiu-se criar provetes brasados com diferentes variáveis para posterior análise.

No que diz respeito aos testes realizados, existem algumas limitações que devem ser mencionadas. Iniciando pela análise por microtomografia computadorizada, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Isso deveu-se à alta densidade dos provetes e ao fato de a máquina disponível na universidade ser de baixa potência. Essa análise seria muito relevante para esse tipo de provetes, pois a microscopia convencional apenas permite analisar seções das conexões, sem proporcionar uma visão abrangente do estado de toda a junta, o que seria possível com essa tecnologia.

A microscopia ótica permite compreender o estado da solda, mas apenas em nível superficial, impossibilitando uma percepção completa da soldagem. Por outro lado, a utilização das técnicas de SEM e EDS, além de possibilitar maior ampliação em relação à microscopia ótica, permite uma análise da composição química da amostra, o que proporciona uma compreensão da composição do defeito, permitindo sua categorização.

A diferença nos resultados entre as técnicas de microscopia ótica e o uso da tecnologia de SEM e EDS é evidente no caso de defeitos de oxidação, conforme ilustrado na figura 4.20. Esse tipo de defeito é indistinguível dos demais quando observado apenas por microscópio ótico.

Com os resultados obtidos percebeu-se que a utilização de um gabarito que garanta a concentricidade dos tubos é importante para a obtenção de bons resultados, no entanto, quando os anéis de material de adição são colocados internamente a dimensão da folga é muito mais uniforme, o que leva a que a quantidade de defeitos grandes seja menor que nos provetes com anéis externos.

A dimensão das folgas nas juntas é um fator muito importante na obtenção de bons resultados, uma vez que defeitos de grandes dimensões ocorrem na maioria das vezes em seções onde a folga tem uma dimensão superior a 0.25 mm. Pelo que a utilização de um

gabarito que garanta a concentricidade dos tubos também é um fator importante para a obtenção de resultados satisfatórios. A variação da temperatura de brasagem não parece ter grande impacto na criação de grandes defeitos, no entanto, no que toca à quantidade de defeitos de menor dimensão, verifica-se uma redução com o aumento da temperatura, até à temperatura máxima de brasagem do material de adição.

Os defeitos causados pela oxidação poderão ser facilmente eliminados com a utilização de uma atmosfera de proteção. No entanto a criação de atmosfera de proteção acarreta um aumento muito significativo no custo de produção, o que deverá ser estudado e aprofundado no futuro.

Analisando os resultados obtidos podemos constatar que os provetes que apresentaram melhores resultados foram os provetes submetidos a uma temperatura de 820 °C com anel de adição externo de 1 mm de espessura. Ainda que os resultados apresentados por este tipo de provetes demonstre alguns defeitos de falta de material, este tipo de defeito deve-se em grande parte à dimensão da folga e são estes provetes que apresentam menor quantidade de defeitos.

Os próximos passos a tomar nesta investigação devem passar numa primeira fase por aumentar a quantidade de provetes de forma a que os resultados sejam mais confiáveis. outro passo a tomar passa também por fazer uma análise mais concreta das ligações soldadas com recurso a um aparelho de microtomografia computadorizada mais potente, de forma a obter-se uma ideia mais concreta do estado global das juntas de ligação bem como testar um maior número de provetes. Poderão também ser estudados os melhores parâmetros de soldadura para o processo de brasagem por indução e poderá ser feito um estudo económico para cada um dos processos de forma a perceber qual será o mais rentável. O desenvolvimento de um software que a partir de imagens retirada contabilize e dimensione os defeitos das juntas automaticamente também é um possível trabalho futuro.

Apêndice A

Anexo 1 - Ficha técnica Cu - DHP

Data sheet EN Cu-DHP/CW024A – Rolled products 99,90 % pure copper Alumeco A/S		Internal alloy name: CW024A International alloy name: EN Cu-DHP DIN-Werkstoff no.: 2.0090 Alloy type: Electrical conducting Revision date: 11-01-2021					
Main usage <ul style="list-style-type: none"> • Electrical • Architecture • Building • Consumer • Industrial 	Main properties <ul style="list-style-type: none"> • It has excellent welding and soldering properties • It can be deformed excellent, either hot or cold 	Important norms and literature Rolled products EN1652: Copper and copper alloys - Plate, sheet, strip and coils for general purposes. EN1172:2011 COPPER AND COPPER ALLOYS - SHEET AND STRIP FOR BUILDING PURPOSES					
Chemical composition (%) DIN EN1652 & EN1172:2011							
Cu	P	Each	Other elements together				
99.90	0,015 – 0,040	-	-				
Typical mechanical properties DIN EN1652 (General Purposes)							
Material condition	Thickness range (mm)	Rm MPa	Rp0,2 MPa	A_{50mm} for thicknesses up to 2,5mm %	A for thickness up to 2,5mm %	Hardness HBW	Hardness HV
R220 (soft)	0,2 - 5	220-260	Max. 140	33	42	-	-
R240(1/2 hard)	0,2 – 15	240-300	Min. 180	8	15	-	-
Typical mechanical properties DIN EN1172:2011 (Building Purposes)							
Material condition	Rm MPa	Rp0,2 MPa	A_{50mm} %		Hardness HBW	Hardness HV	
R220 (soft)	220-260	Max. 140	33		-	-	
R240(1/2 hard)	240-300	Min. 140	8		-	-	
Physical properties							
Density (20 °C) g cm⁻³	Solidification range °C	Electrical conductivity %ACS	Thermal conductivity (20 °C) W m⁻¹ K⁻¹	Thermal expansion (20-300 °C) μm m⁻¹ K⁻¹	Annealing temperature °C	E - modulus (20 °C) N mm⁻²	
9,0	1030	85	340	17		-	
Properties and information							
Fabrication Properties				Joining Methods			
Hot Formability		Good		Soldering		Excellent	
Cold Formability		Excellent		Brazing		Excellent	
				Oxy-acetylene welding		Good	
				Gas-shielded arc welding		Excellent	

Apêndice B

Anexo 2 - Ficha técnica CuP 281a

Technical Data Sheet BrazeTec S 5

Standard

ISO 17672
(DIN EN 1044)

CuP 281a
(CP 104)

Nominal composition [wt.-%]

Permitted impurities max. [wt.-%]
Max. impurities [wt.-%]

Cu remainder; Ag 5; P 6
Al 0,01; Bi 0,030; Cd <0,01; Pb 0,025; Zn 0,05; Zn + Cd 0,05
0,25

Technical data

Melting range acc. ISO 17672	approx. 645 - 815°C
Melting range acc. Measurement	approx. 645 - 835°C (DSC -measurement)
Brazing temperature	approx. 710°C (acc. ISO 17672:2010)
Density	approx. 8.2 g/cm ³
Tensile strength acc. DIN EN 12797	with Cu: min. 100 MPa
Elongation	approx. 8 %
Electrical Conductivity	approx. 5.0 m/Ωmm ²
Operating temp. of brazed joint	max. 150 °C (without loss in strength)

Standard delivery forms*

Wire:	1,0 - 1,5 - 2,0 mm Ø
Rods:	1,0 - 1,5 - 2,0 mm Ø, 500 mm length
Ribbon:	0,1/ 0,2/ 0,3/ 0,4 mm thickness and 70 mm width
Preforms:	rings, shaped parts, sections, stamped and shaped parts, lamina, discs, perforated plates

*Other delivery forms upon request

Applications

BrazeTec S 5 is a phosphorous-containing brazing alloy with excellent flow characteristics.

The brazing alloy is suitable for joining copper to copper or copper-based materials.

Due to its phosphorous content, you do not need use an additional flux for brazing only copper to copper.

This brazing alloy is not allowed to be used if sulfur containing medias may have contact with the joint during operating.

Further it is not allowed to use this alloy for joining steels (Fe) or materials containing iron, nickel cobalt as brittle phases will be formed in the joint.

In refrigeration and air conditioning industries BrazeTec S 5 can be used for service temperatures down to -50°C.

It can be used for brazing with flame, with induction heating and in a furnace under protective atmospheres.

Typical applications are found e.g. in the electric industry and for the refrigeration and air conditioning industry.

Details in product brochures or other advertisements about our products, equipment, plant and processes are based on our research and our experience in the field of applied engineering and are merely recommendations. It is not possible to infer any warranted qualities or warranted use from these details, unless they were expressly agreed as a warranted quality. We reserve the right to make technical modifications in the course of our product development.

The user must verify the suitability of our products and processes for the use or application intended by him on his own responsibility. This shall also apply to the protection of third party property rights as well as to applications and processes. The properties of samples and specimens are binding only if these have been expressly agreed to define the quality of the goods. Information on the quality and durability and other particulars are warranted only if these are agreed and designated as such. The specifications agreed with the user/purchaser in writing are relevant for the quality of the goods and if specifications have not been agreed in writing, the information contained in our technical data sheets, specifications or drawings.

Any additional or diverging agreements on the quality must be in writing. Any suitability of the product for the presupposed or customary use which supplements or diverges from the agreed quality is out of the question. Our General Conditions of Sale and Delivery shall apply; the current version is available at <http://www.saxonia-tm.de/en/TechnicalMaterials/agbs/>.

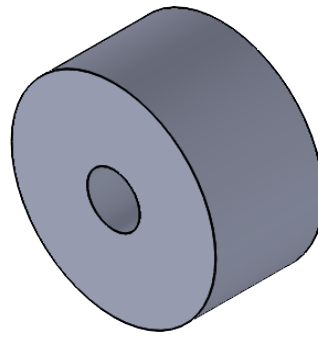
Apêndice C

Anexo 3 - Desenho técnico das ferramentas para alargamento dos tubos

4 3 2 1

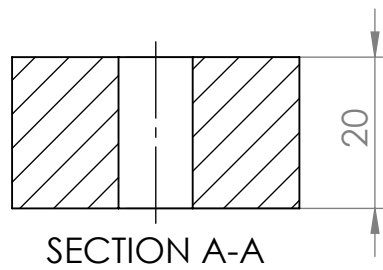
F

F



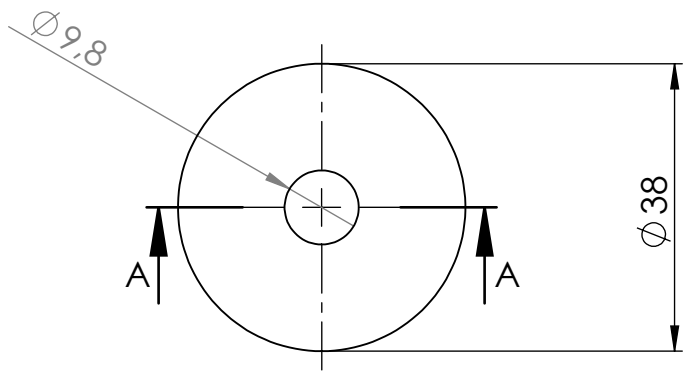
E

E



D

D



C

C

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO. **Matrix**

SCALE: 1:1

WEIGHT:

SHEET 1 OF 1

A4

A

A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

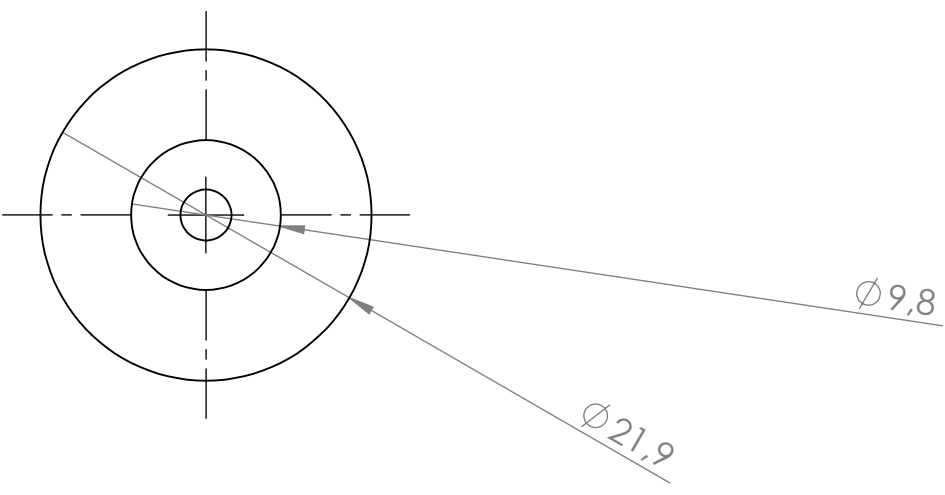
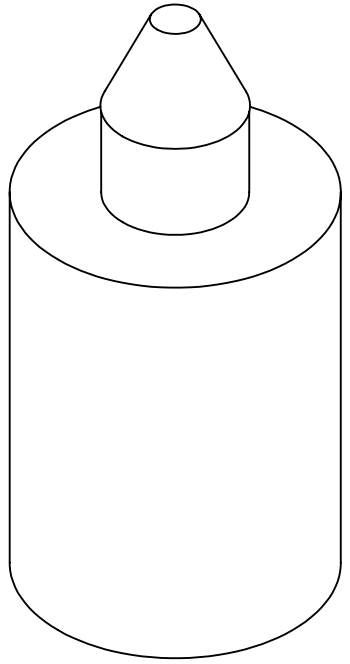
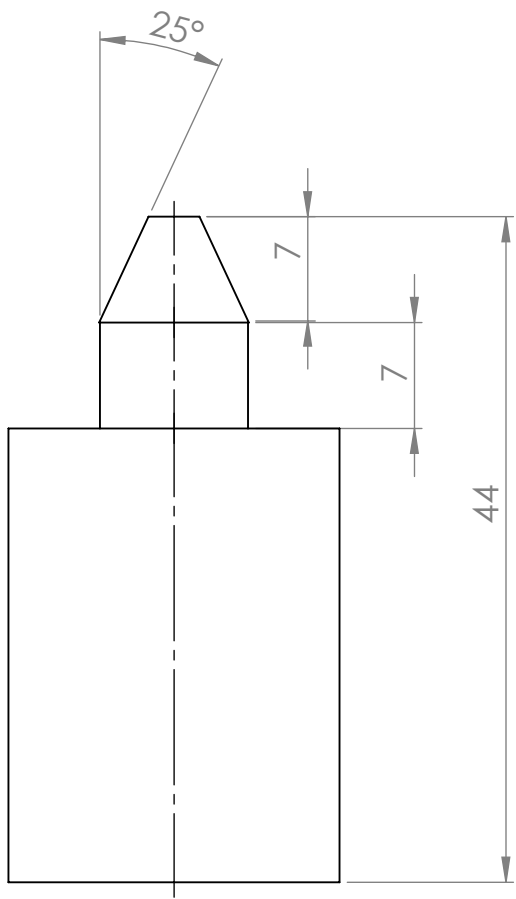
D

C

C

B

B

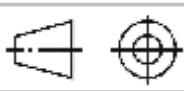


Escala:
1:1

Quantidade:
1

Toleranciamento ISO 8015
Tolerâncias gerais ISO 2768-mK

Desenho:
Punção



Data

Assinatura

Desenhou

Verificou

Aprovou

Material:
Aço EN c45



dem
universidade de aveiro
departamento de engenharia mecânica

A4

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

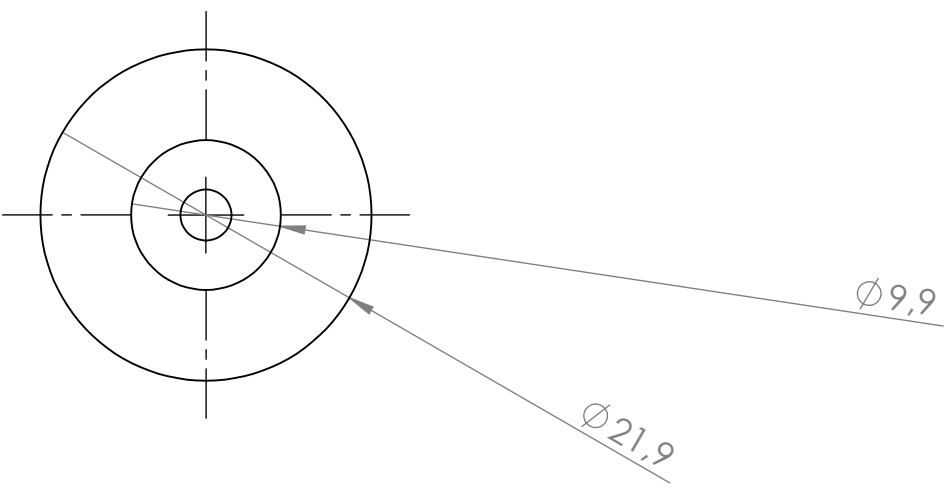
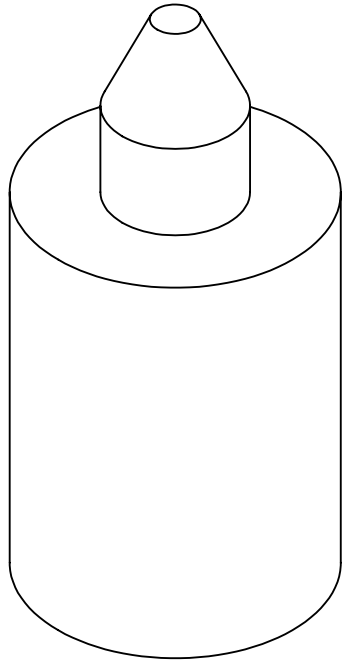
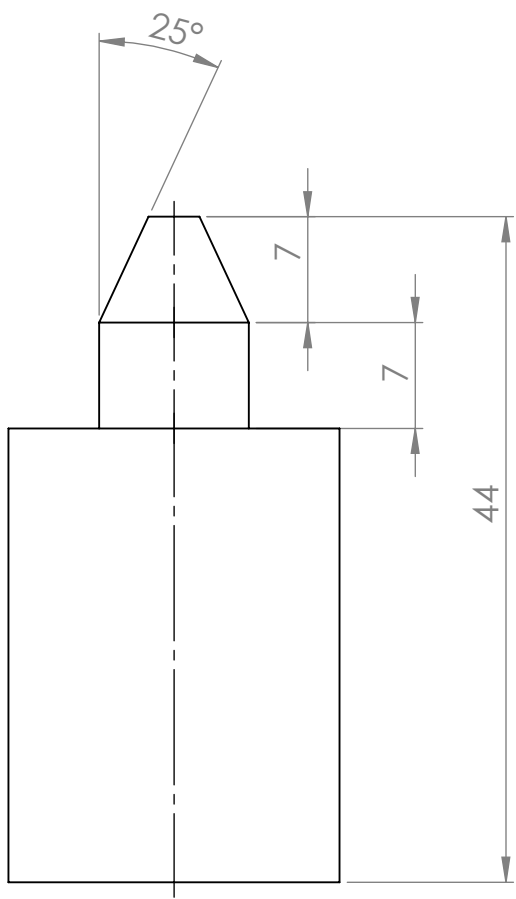
D

C

C

B

B

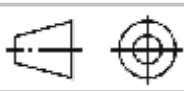


Escala:
1:1

Quantidade:
1

Toleranciamento ISO 8015
Tolerâncias gerais ISO 2768-mK

Desenho:
Punção



Data

Assinatura

Desenhou
Verificou
Aprovou

Material:
Aço EN c45



dem
universidade de aveiro
departamento de engenharia mecânica

A4

4 3 2 1

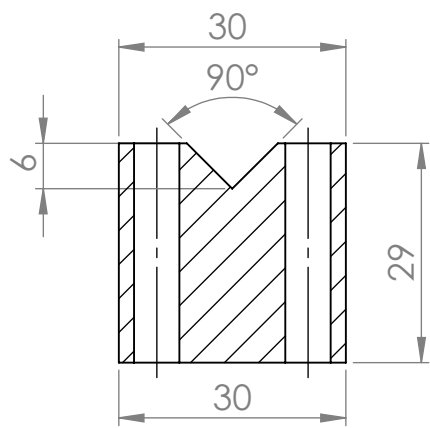
Apêndice D

Anexo 4 - Desenho técnico do gabarito para o processo brasagem

4 3 2 1

F

F



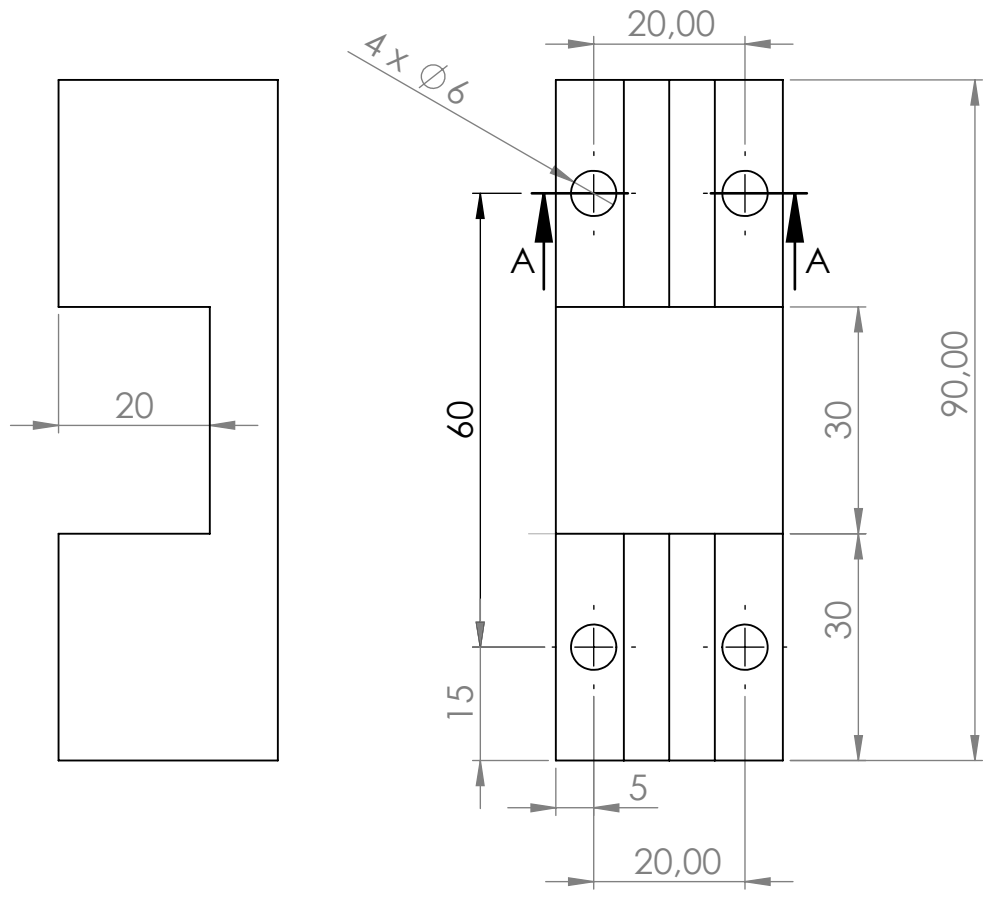
SECTION A-A

E

E

D

D



C

C

B

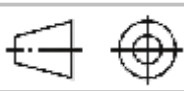
B

Escala:
1:1

Quantidade:
2

Toleranciamento ISO 8015
Tolerâncias gerais ISO 2768-mK

Desenho:
Gabarito



A

A

Desenhou		
Verificou		
Aprovou		

Data

Assinatura

Material:
Aço EN c45



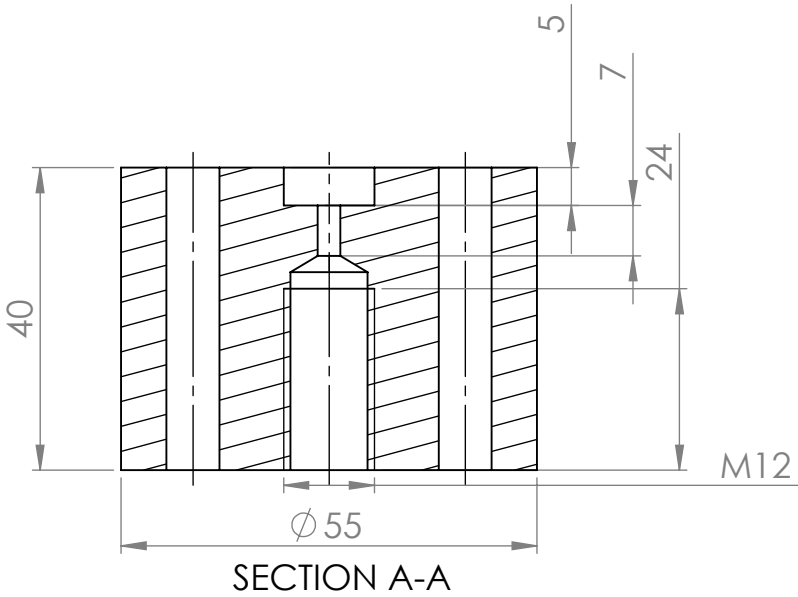
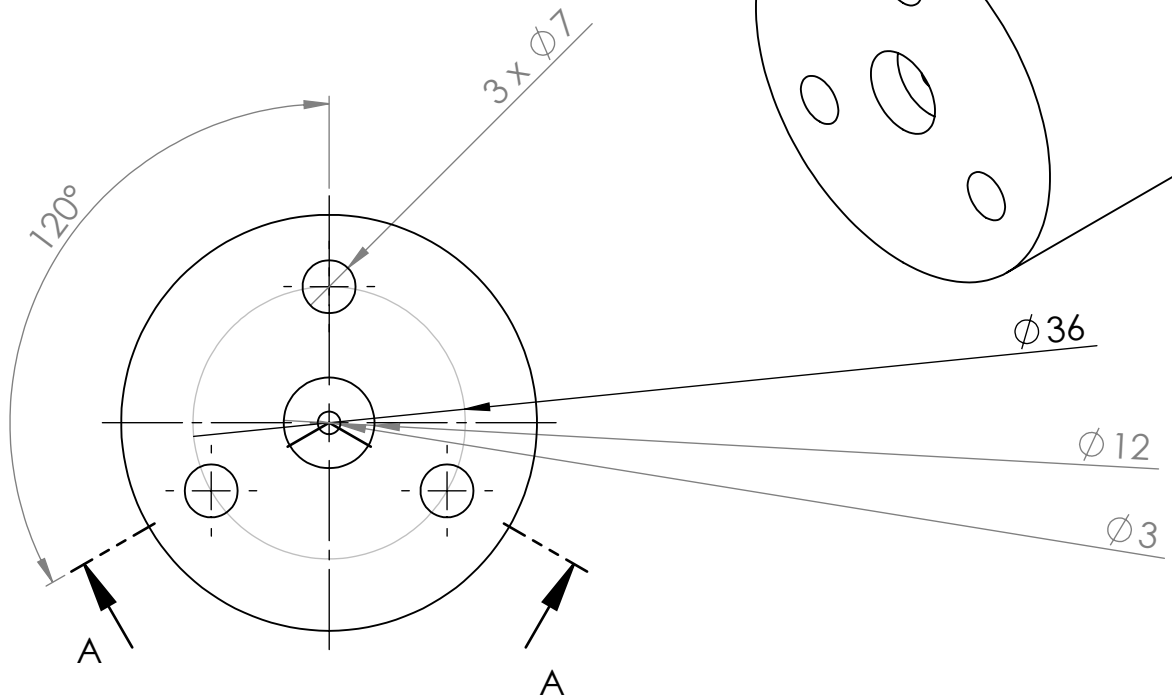
dem
universidade de aveiro
departamento de engenharia mecânica

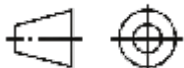
A4


4 3 2 1

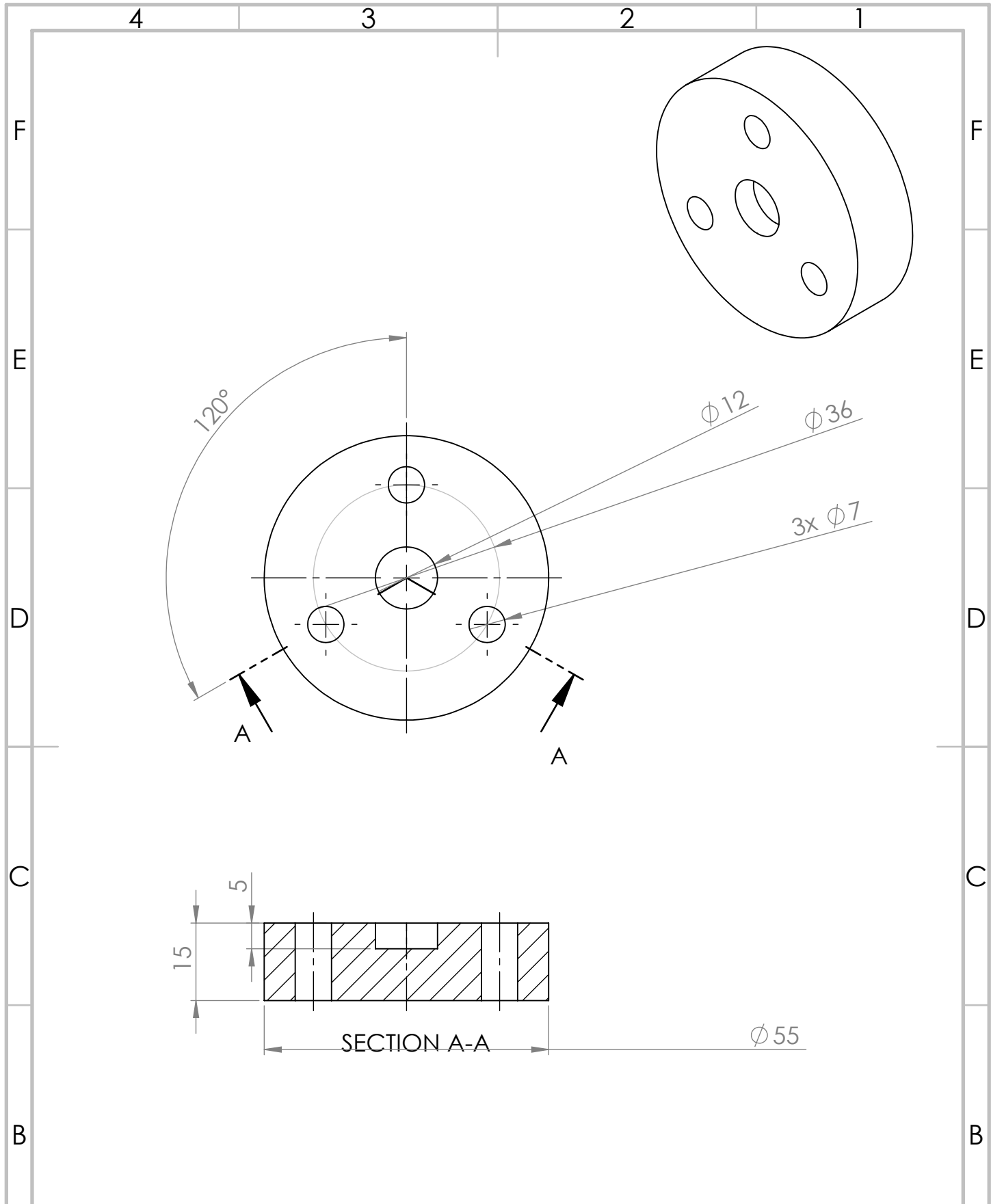
Apêndice E

Anexo 5 - Desenho técnico da ferramenta para o teste de estanquidade




Escala: 1:1 	Quantidade: 1	Toleranciamento ISO 8015 Tolerâncias gerais ISO 2768-mK	Desenho: Placa com rosca
---	------------------	--	-----------------------------

Data Assinatura	Material: Aço EN c45	 dem universidade de aveiro departamento de engenharia mecânica	A4
Desenhou			
Verificou Aprovou			



Escala: 1:1 	Quantidade: 1	Toleranciamento ISO 8015 Tolerâncias gerais ISO 2768-mK	Desenho: Placa
---	------------------	--	-------------------

Data Assinatura	Material: Aço EN c45	 dem universidade de aveiro departamento de engenharia mecânica	A4
Desenhou			
Verificou Aprovou			

Intentionally blank page.

Apêndice F

Anexo 6 - Desenho técnico da
dobradiça

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

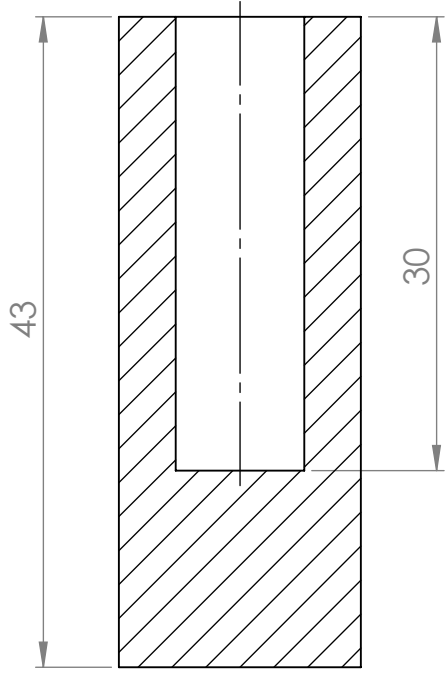
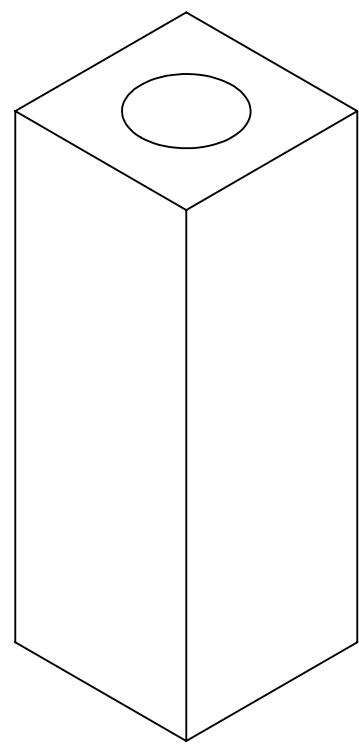
C

B

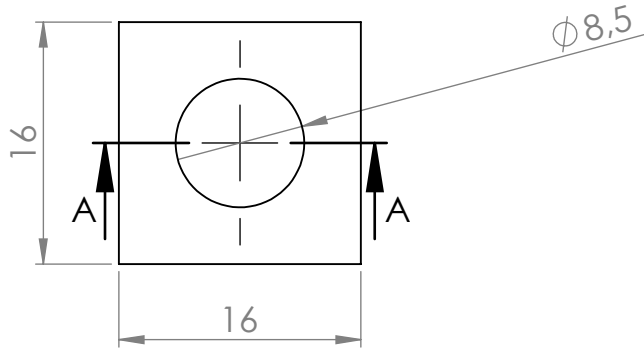
B

A

A

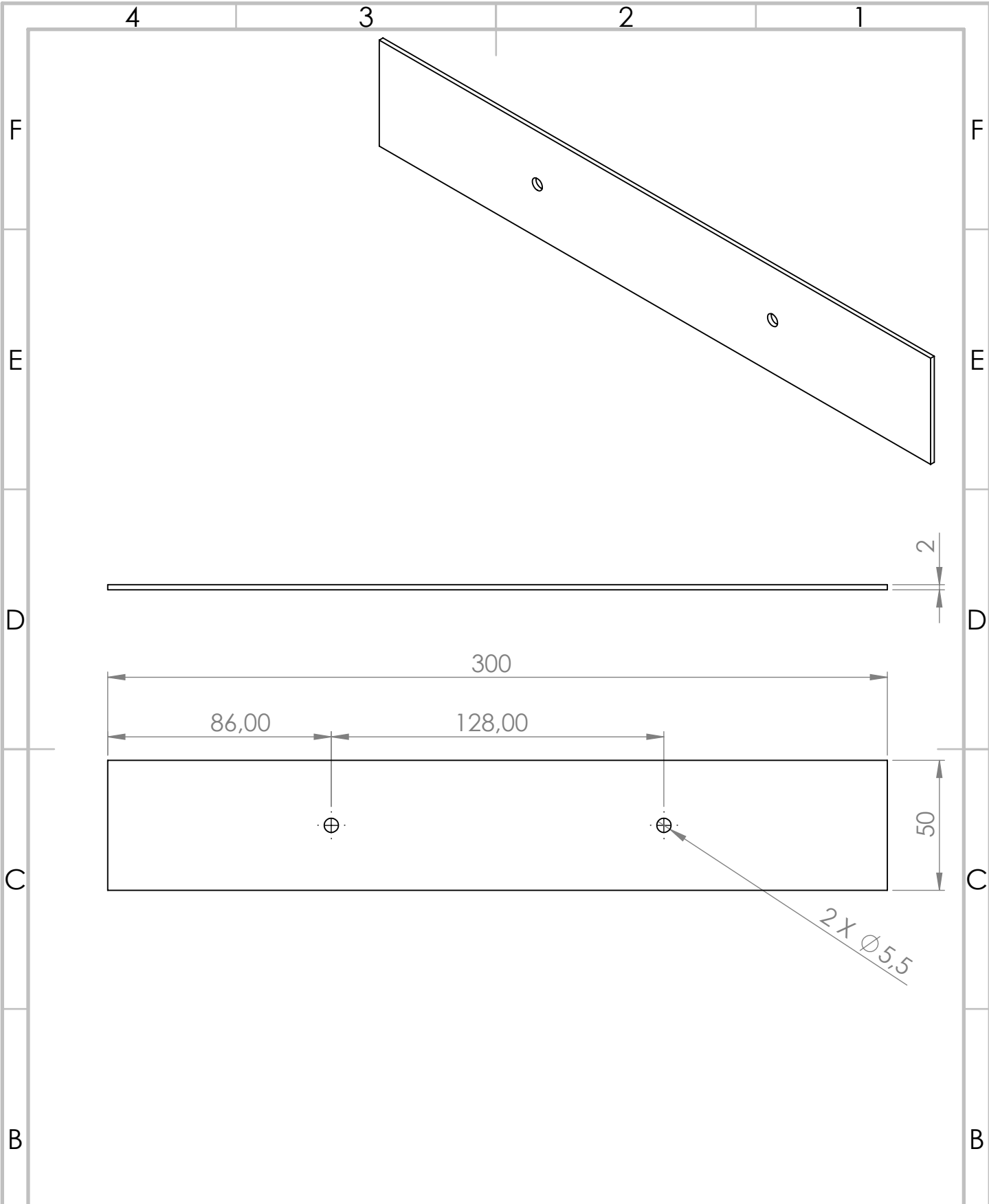


SECTION A-A




Escala: 1:1		Quantidade: 2	Toleranciamento ISO 8015 Tolerâncias gerais ISO 2768-mK	Desenho: Olhal
		Data	Assinatura	 universidade de aveiro departamento de engenharia mecânica
Desenhou				
Verificou				
Aprovou				Material: Aço EN c45
				A4

4 3 2 1



Escala: 1:2  	Quantidade: 1	Toleranciamento ISO 8015 Tolerâncias gerais ISO 2768-mK	Desenho: Chapa para dobradiça
---	------------------	--	----------------------------------

Data Assinatura	Material: Aço EN c45	 universidade de aveiro departamento de engenharia mecânica	A4
Desenhou			
Verificou Aprovou			

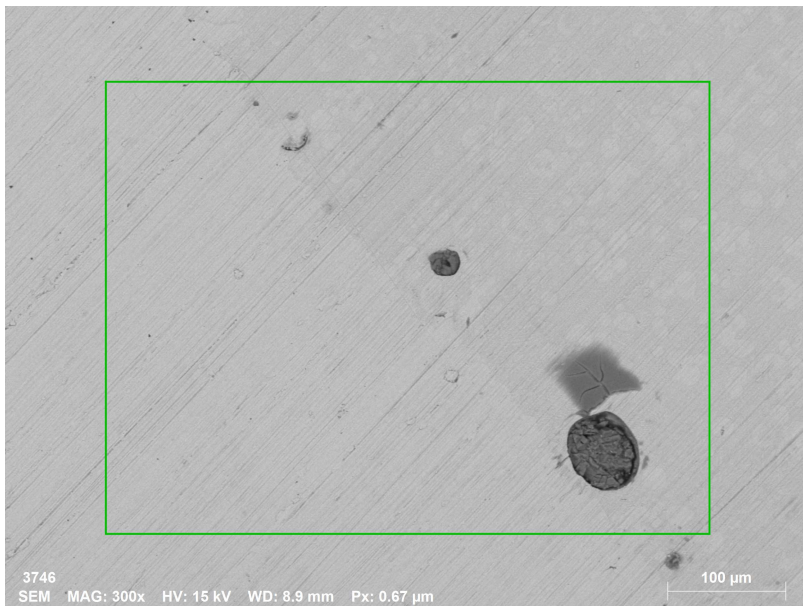
Intentionally blank page.

Apêndice G

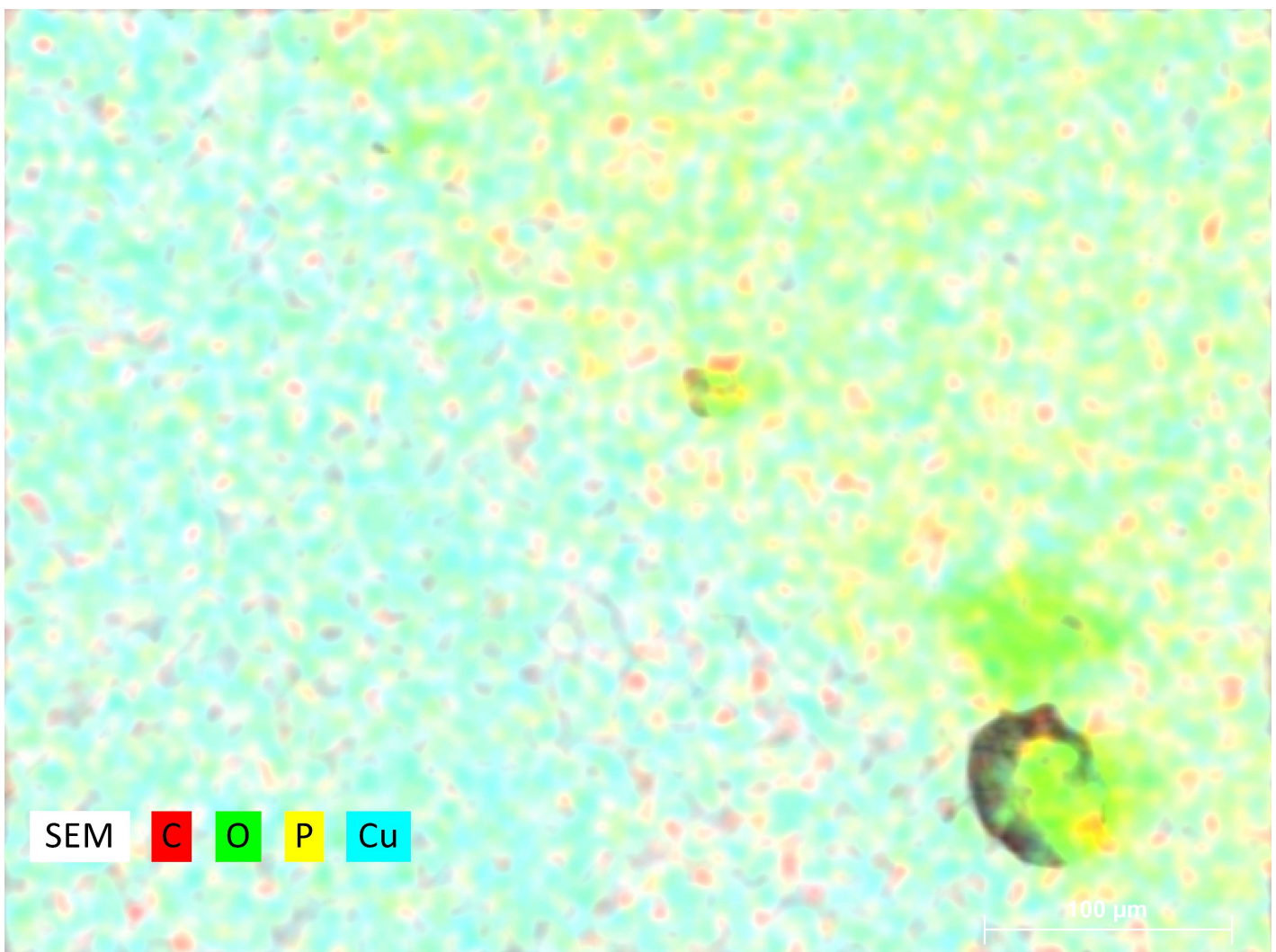
Anexo 7 - Relatório de EDS

Application Note

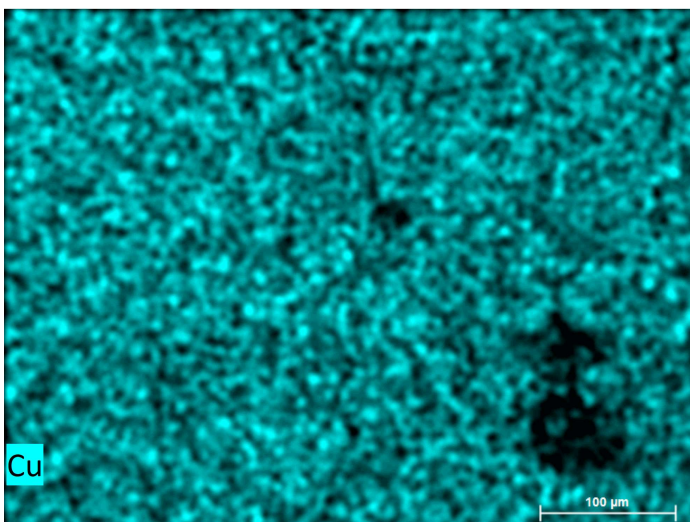
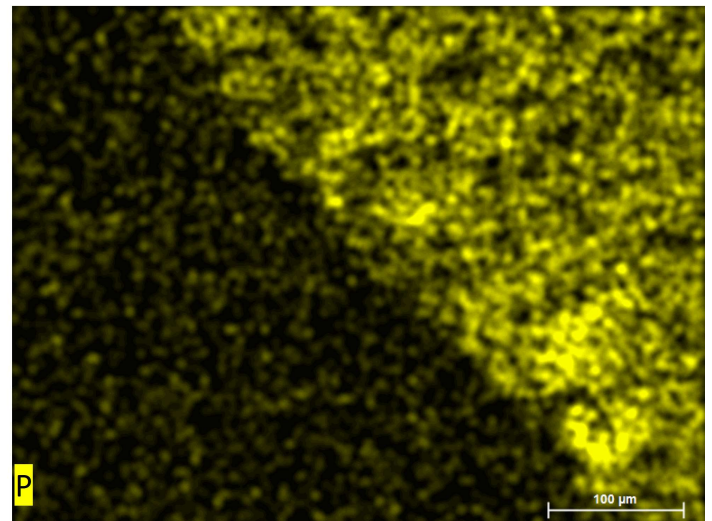
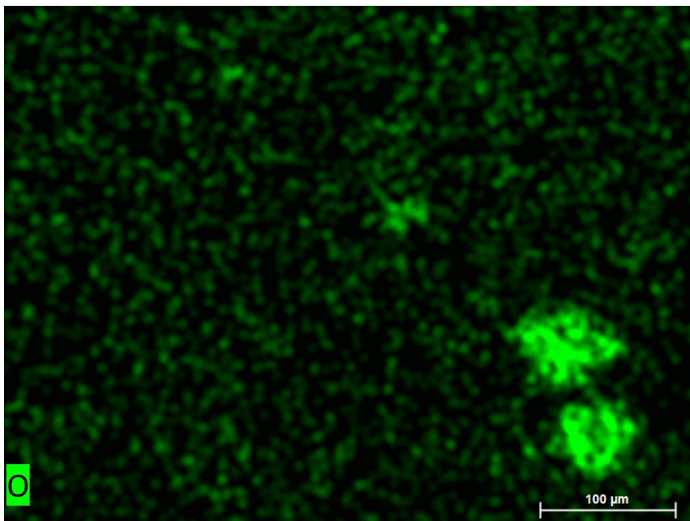
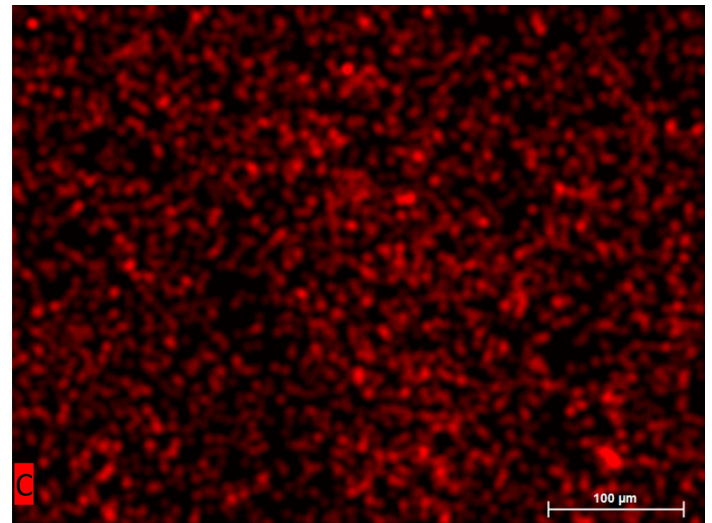
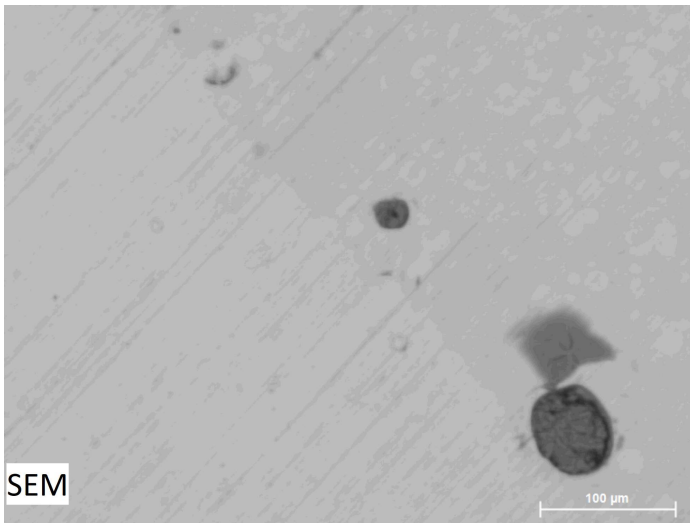
Company / Department



Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
3746	18/05/2023	14:07:07	15.0 keV	300x	8.9 mm

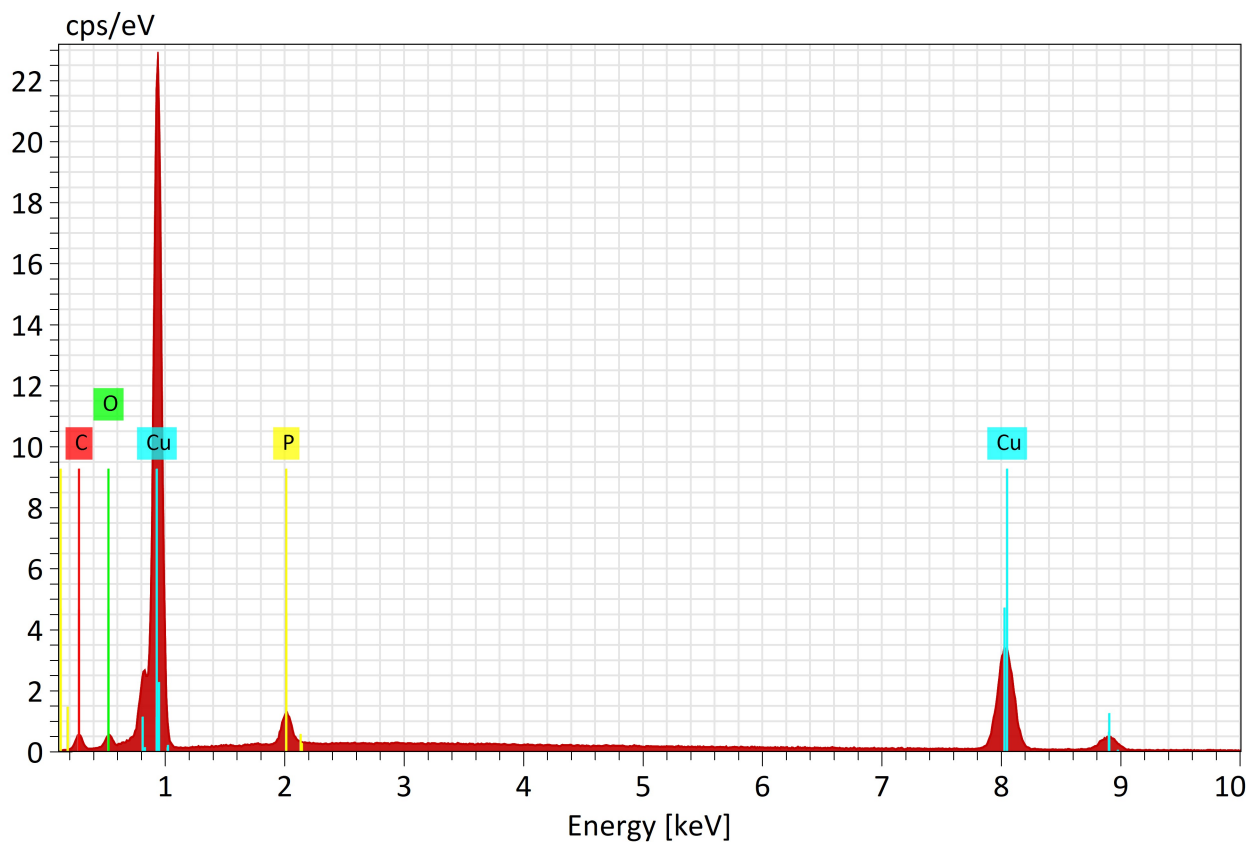


Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
3746	18/05/2023	14:07:30	15.0 keV	300x	8.9 mm



Application Note

Company / Department

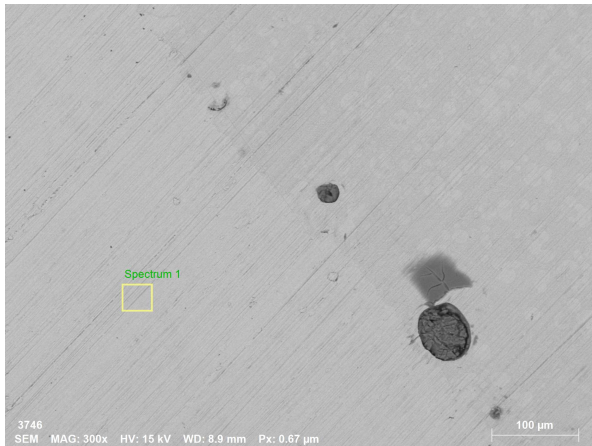


Map

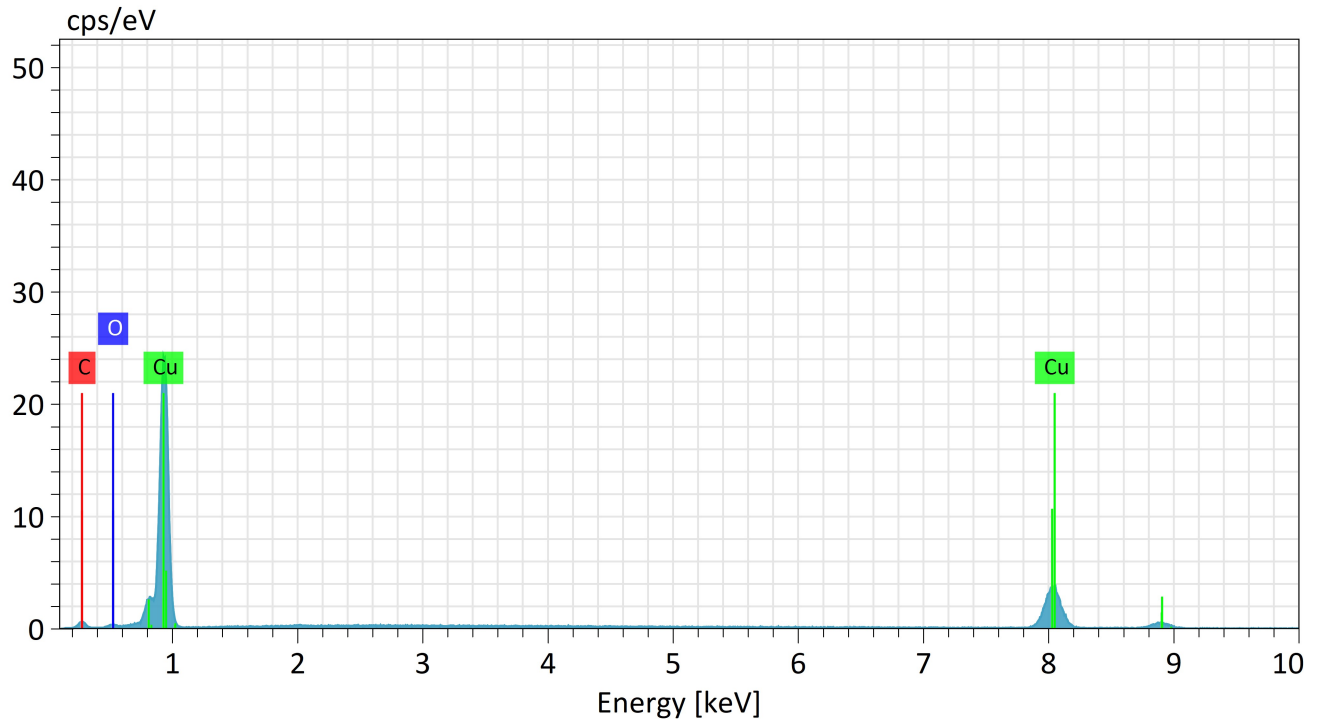
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Cu	29	64286	88.92	87.12	60.87	2.73	3.07
C	6	3944	8.34	8.17	30.21	0.47	5.69
O	8	2597	1.65	1.62	4.49	0.09	5.71
P	15	10854	3.16	3.09	4.43	0.11	3.62
		Sum	102.07	100.00	100.00		

Relatório

Universidade de Aveiro



Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
3746	18/05/2023	14:07:07	15.0 keV	300x	8.9 mm



Spectrum
Spectrum 1

Application Note

Company / Department

Spectrum 1

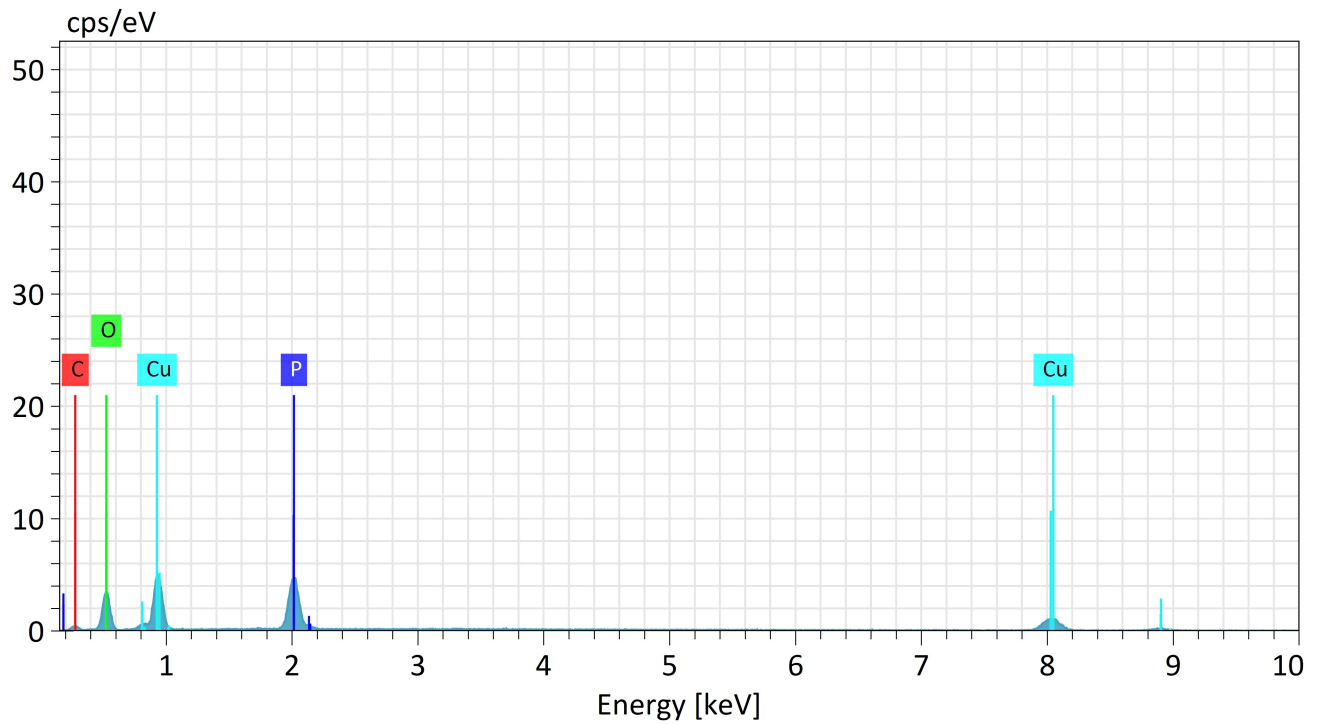
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
C	6	2320	8.07	8.06	31.13	0.47	5.88
Cu	29	38459	91.22	91.13	66.53	3.31	3.63
O	8	759	0.81	0.81	2.34	0.06	7.65
		Sum	100.09	100.00	100.00		

Relatório

Universidade de Aveiro



Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
3746	18/05/2023	14:07:07	15.0 keV	300x	8.9 mm



Spectrum
Spectrum 1

Application Note

Company / Department

Spectrum 1

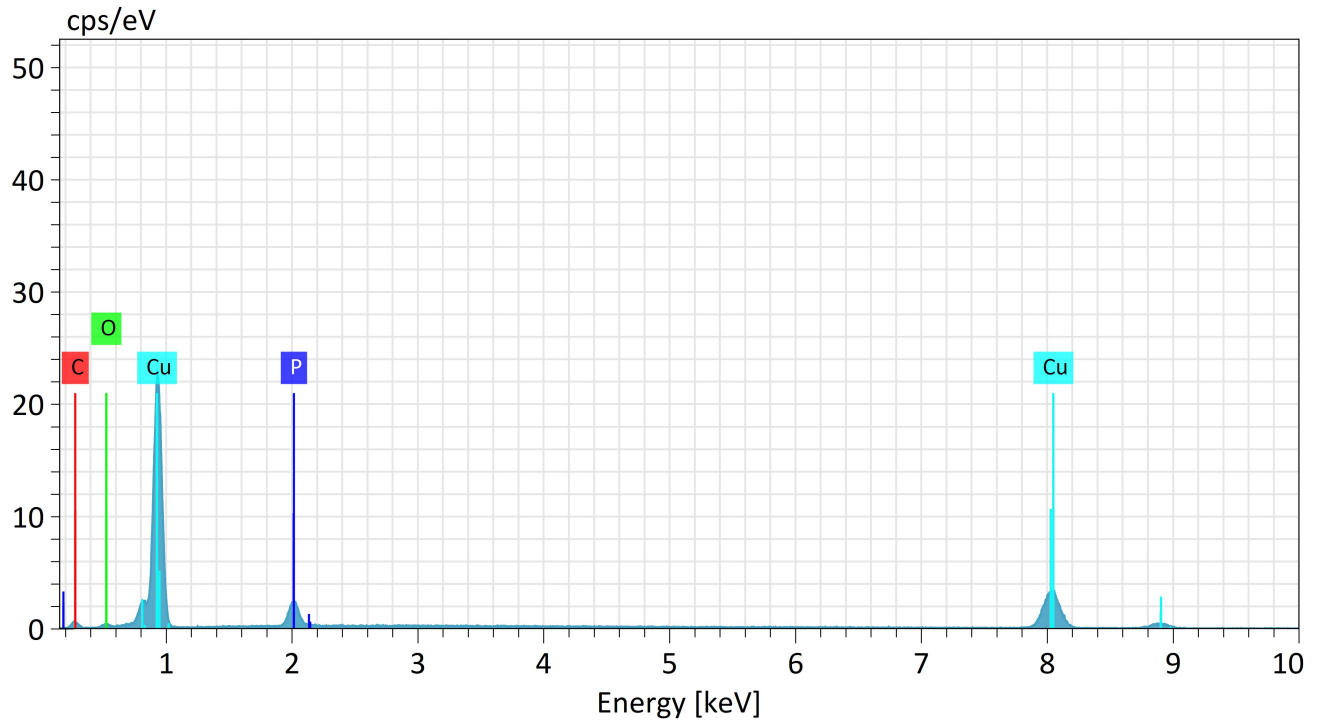
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
C	6	1772	10.46	11.17	24.16	0.62	5.96
O	8	14183	24.50	26.16	42.48	1.18	4.81
P	15	27361	16.85	18.00	15.10	0.71	4.20
Cu	29	11525	41.83	44.67	18.26	2.02	4.82
		Sum	93.64	100.00	100.00		

Relatório

Universidade de Aveiro



Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
3746	18/05/2023	14:07:07	15.0 keV	300x	8.9 mm



Spectrum
Spectrum 1

Application Note

Company / Department

Spectrum 1

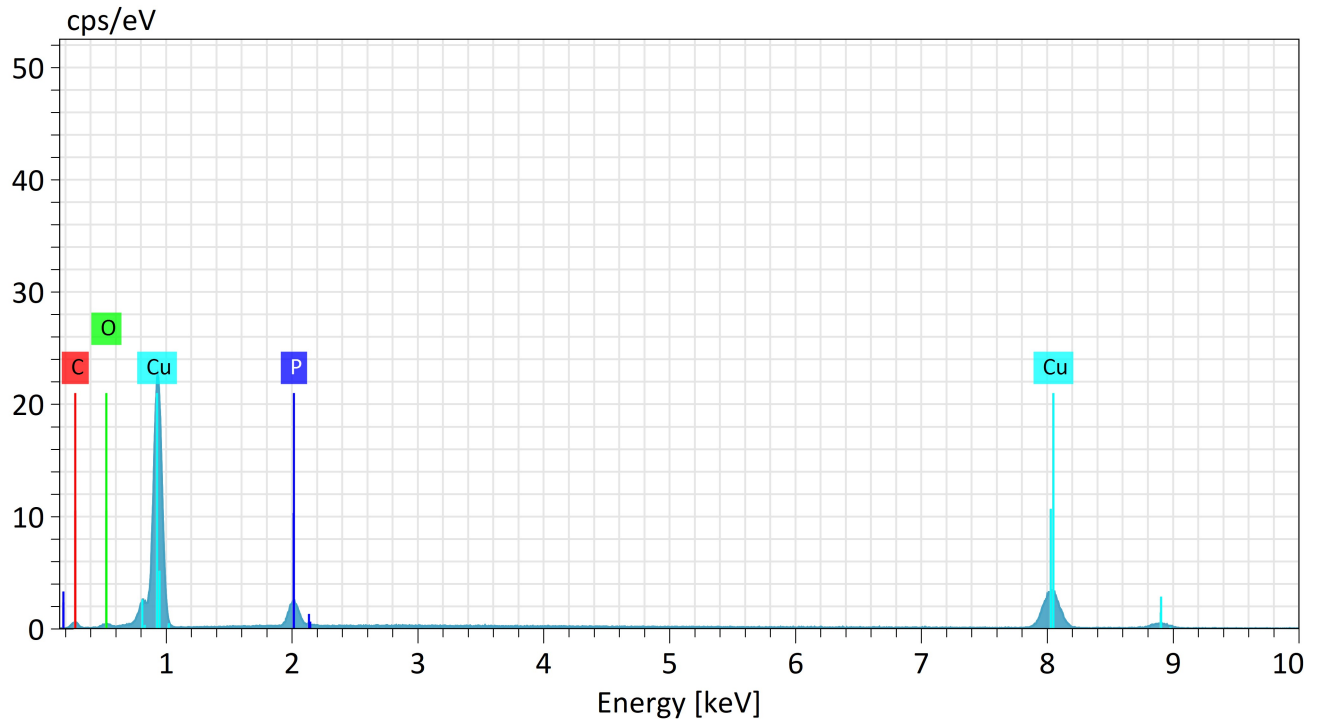
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
C	6	2179	8.65	8.42	30.56	0.52	5.97
O	8	885	1.04	1.01	2.75	0.08	7.33
P	15	12972	6.43	6.26	8.82	0.25	3.90
Cu	29	35216	86.66	84.32	57.87	3.23	3.73
		Sum	102.78	100.00	100.00		

Relatório

Universidade de Aveiro



Name	Date	Time	HV [kV]	Mag	WD [mm]
3746	18/05/2023	14:07:07	15.0 keV	300x	8.9 mm



Spectrum
Spectrum 1

Application Note

Company / Department

Spectrum 1

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
C	6	2165	8.43	8.20	29.81	0.50	5.88
O	8	1108	1.27	1.23	3.36	0.08	6.49
P	15	13336	6.54	6.36	8.97	0.25	3.88
Cu	29	35927	86.54	84.20	57.86	3.20	3.70
		Sum	102.77	100.00	100.00		

Referências

- [1] N. Enzinger, P. Loidolt, C. Wiednig, M. Stütz, and C. Sommitsch, “Electron beam welding of thick-walled copper components,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 22, no. 2, pp. 127–132, 2017.
- [2] U. Reisgen, S. Olschok, S. Jakobs, and C. Turner, “Sound welding of copper: laser beam welding in vacuum,” *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 447–454, 2016.
- [3] S. Auwal, S. Ramesh, F. Yusof, and S. M. Manladan, “A review on laser beam welding of copper alloys,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, no. 1, pp. 475–490, 2018.
- [4] “Welding and allied processes,” standard, International Organization for Standardization, Mar. 2016.
- [5] K. Weman, *Welding processes handbook*. Elsevier, 2011.
- [6] A. Pereira, “Notas de apoio à unidade curricular de tecnologia dos processos de ligação,” 2020.
- [7] “Standard Welding Terms and Definitions,” standard, American Welding Society, Oct. 2019.
- [8] H.-C. Chen, G. Bi, M. L. S. Nai, and J. Wei, “Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 216, pp. 287–293, 2015.
- [9] C. J. P. Vitorino, *Estudo da preparação de superfícies antes dos processos de soldadura por resistência por pontos, conversão química e oxidação anódica crômica com produto isento de crômio VI*. PhD thesis, 2016.
- [10] L. Biele, P. Schaaf, and F. Schmid, “Specific electrical contact resistance of copper in resistance welding,” *physica status solidi (a)*, vol. 218, no. 19, p. 2100224, 2021.
- [11] R. S. Mishra and Z. Ma, “Friction stir welding and processing,” *Materials science and engineering: R: reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1–78, 2005.
- [12] R. C. Chaves, *Soldadura por Fricção Linear de Juntas T em Três materiais dissimilares*. PhD thesis, Universidade de Coimbra, 2019.
- [13] T. Sakthivel and J. Mukhopadhyay, “Microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper,” *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 19, pp. 8126–8129, 2007.

- [14] W.-B. Lee and S.-B. Jung, "The joint properties of copper by friction stir welding," *Materials Letters*, vol. 58, no. 6, pp. 1041–1046, 2004.
- [15] G. Wagner, F. Balle, and D. Eifler, "Ultrasonic welding of hybrid joints," *Jom*, vol. 64, no. 3, pp. 401–406, 2012.
- [16] S. Elangovan, K. Prakasan, and V. Jaiganesh, "Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 163–171, 2010.
- [17] A. W. S. C. on Brazing and Soldering., *Brazing handbook*. American Welding Society, 2007.
- [18] A. Hasap, N. Noraphaiphaksa, and C. Kanchanomai, "The microstructure and strength of copper alloy brazing joints," *Welding journal*, vol. 93, no. 4, pp. 116–123, 2014.
- [19] L. Jeffus, *Welding*. Cengage Learning, 2011.
- [20] M. Way, J. Willingham, and R. Goodall, "Brazing filler metals," *International Materials Reviews*, vol. 65, pp. 1–29, 05 2019.
- [21] T. Zaharinie, Z. Huda, M. F. Izuan, and M. Hamdi, "Development of optimum process parameters and a study of the effects of surface roughness on brazing of copper," *Applied Surface Science*, vol. 331, pp. 127–131, 2015.
- [22] D. M. Jacobson and G. Humpston, *Principles of brazing*. Asm International, 2005.
- [23] A. Wretström, "Investigation of induction brazing on circular pipes: An detailed investigation of an induction brazing process," 2022.
- [24] A. Rozendaal, S. Le Roux, A. du Plessis, and C. Philander, "Grade and product quality control by microct scanning of the world class namakwa sands ti-zr placer deposit west coast, south africa: An orientation study," *Minerals Engineering*, vol. 116, pp. 152–162, 2018.
- [25] R. N. Razooqi, K. H. Razej, A. T. Abdulhameed, and S. S. Irhayyim, "The physical and mechanical properties of a shape memory alloy reinforced with carbon nanotubes (cnts)," *Tikrit Journal of Pure Science*, vol. 23, no. 9, pp. 80–88, 2018.
- [26] J. P. Cruz, C. M. Garzon, and A. A. Recco, "Sem-eds coating thickness assessment: an insight into the accuracy of monte carlo simulations carried out for tin coatings using three different freeware graphical user interface," *Microscopy and Microanalysis*, vol. 27, no. S1, pp. 2510–2512, 2021.