

**Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro**

# **Caracterização microscópica de juntas soldadas em PCI**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Diogo Monteiro Rodrigues**

Orientador: Professor Doutor Fábio André Magalhães Pereira

Coorientador: Engenheiro Nuno Almeida

Coorientadora: Professora Doutora Paula Luísa Nunes Braga da Silva



Vila Real, 2021



**Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro**

# **Caracterização microscópica de juntas soldadas em PCI**

**Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Diogo Monteiro Rodrigues**

Orientador: Professor Doutor Fábio André Magalhães Pereira

Coorientador: Engenheiro Nuno Almeida

Coorientadora: Professora Doutora Paula Luísa Nunes Braga da Silva

Composição do júri:

---

---

---

---

Vila Real, 2021



Atesto a originalidade do trabalho

Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Professor Doutor Fábio André Magalhães Pereira, da Professora Doutora Paula Luísa Nunes Braga da Silva e do Engenheiro Nuno Almeida da Continental.



*Aos meus pais, avós e tios.*



## **Agradecimentos**

Este trabalho, apesar de individual, é sempre feito com bastante apoio diretamente e indiretamente, contudo apesar de um obrigado ser pouco, deixo aqui alguns dos meus agradecimentos.

Em primeiro lugar, os meus agradecimentos ao orientador da dissertação professor Doutor Fábio André Magalhães Pereira pelo apoio, estímulo e confiança demonstrada, que foi, sem dúvida, uma chave essencial para a conclusão do meu projeto.

À professora Doutora Paula Luísa Nunes Braga da Silva, como Coorientadora neste projeto, procedeu à avaliação das ideias desenvolvidas e ajudou na elaboração da tese.

Ao Eng.º Nuno Almeida, diretor do departamento da qualidade da Continental Advanced Antenna, como Coorientador pela oportunidade de desenvolver um projeto relacionado com a empresa.

Agradecer a toda a equipa da Continental que me recebeu e me ajudou ao longo destes últimos meses, nomeadamente aos Técnicos Eduardo Martins e Asdrúbal Mendes, dando-me auxílio quando precisava, exemplos de profissionalismo, bem-estar e trabalho de equipa.

Devo gratular a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro pelo excelente ensino que me foi proporcionado e pelas pessoas com quem partilhei várias experiências ao longo destes anos, tanto amigos como colegas de curso, todos eles contribuíram de alguma forma para o meu sucesso.

Mas, acima de tudo, quero agradecer aos meus pais e a toda a minha família por me terem apoiado e partilhado esta dura caminhada, que sem eles não tinha sido possível. E pelo esforço investido ao longo de toda a minha vida para que eu tivesse as melhores condições, sem nunca me terem faltaram com nada.



## Resumo

O processo de soldadura de componentes eletrónicos nas Placas de Circuito Impresso (PCI) envolve vários fatores de grande importância que afetam a performance final do sistema. Numa PCI há uma distribuição heterogénea de componentes no espaço. A presença de componentes com composição e massa diferentes faz com que, durante o processo de soldadura, haja um gradiente de temperaturas ao longo da PCI. Desta forma o ciclo térmico de soldadura (aquecimento e arrefecimento) varia ao longo da placa e, conseqüentemente, leva a alterações das características finais das juntas soldada. É necessário atingir a temperatura correta durante um determinado tempo para que se obtenham camadas intermetálicas adequadas entre os componentes, a solda e os pads, que permitam uma boa junta. Nesta dissertação pretende-se caracterizar as juntas de soldadura e cravações. Nas juntas soldadas é feito o estudo da morfologia e estrutura da interface solda/substrato e observação dos compostos intermetálicos formados, nas cravações com o recurso da análise morfológica. Em ambas será utilizado o microscópio ótico (MO) para efetuar as análises.

O estudo é feito com o recurso a cortes metalográficos, permitindo deste modo observar múltiplos aspetos através da revelação da sua microestrutura e morfologia, incidindo sobre as juntas de soldadura e as cravações de cabos. O trabalho realizado permitirá definir os procedimentos mais adequados para identificar os defeitos nas juntas de soldadura e cravações, a realização de uma instrução de trabalho genérica sobre o procedimento integral a executar e comparação dos dois métodos experimentais a serem utilizados no estudo em questão.

Para o estudo da morfologia e estrutura da interface solda/substrato e observação dos compostos intermetálicos formados, foi utilizado o microscópio ótico (MO) e eletrónico de varrimento (MEV). Após observação das microestruturas no MO as amostras foram observadas no MEV, para a identificação dos compostos intermetálicos utilizando a técnica de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS). Através do MEV foram também observadas as interfaces solda/substrato.

**Palavras-chave:** Placas de Circuito Impresso, processo de soldadura, compostos intermetálicos, juntas de soldadura, cravações de cabos, solda/substrato, microscópio ótico, cortes metalográficos, instrução de trabalho genérica.



## Abstract

The welding process of electronic components on Printed Circuit Boards (PCI) involves several factors of great importance that affect the final performance of the system. In a PCI, there is a heterogeneous distribution of components in space. The presence of components with different compositions and masses means that, during the welding process, there is a temperature gradient along the PCI. In this way, the thermal welding cycle (heating and cooling) varies along the plate and, consequently, leads to changes in the final characteristics of the welded joints. It is necessary to reach the correct temperature for a certain time to obtain suitable intermetallic layers between the components, the solder and the pads, which allow a good union. This dissertation intends to characterize the welding joints and cables crimping. In the welded joints the study of the morphology and structure of the weld/substrate interface is made and observation of the intermetallic compounds formed, in the crimping using the morphological analysis. In both, the optical microscope (MO) will be used to perform the analyzes.

The study is done with the use of metallographic cuts, thus allowing to observe multiple aspects through the revelation of its microstructure and morphology, focusing on the welding joints and the crimping of the cable. The work to be carried out will allow the definition of the most appropriate procedures to identify the defects in the welding joints and cables crimping and the carrying out of a generic work instruction on the integral procedure to be carried out and comparison of the two experimental methods to be used in the study in question.

To study the morphology and structure of the solder/substrate interface and to observe the intermetallic compounds formed, optical (OM) and scanning electronic (SEM) microscopes were used. After observing the microstructures in the OM, the samples were observed in the SEM, for the identification of intermetallic compounds using the technique of energy dispersion X-ray spectroscopy (EDS). Through the SEM, the solder/substrate interfaces were also observed.

**Keywords:** Printed Circuit Boards, welding process, intermetallic compounds, welding joints, cable crimping, welding/substrate, optical microscope, metallographic cuts, general work instructions.



## Índice Geral

CAPÍTULO 1 .....	1
1.1 Considerações Gerais .....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Estrutura da Dissertação .....	4
CAPÍTULO 2 .....	7
2.1 Placas de Circuito Impresso (PCI).....	9
2.1.1 Classificação das PCIs.....	10
2.1.2 Acabamentos Superficiais da PCI .....	12
2.2 Produção de PCBAs (printed circuit board assembled).....	14
2.2.1 Componentes eletrônicos.....	14
2.2.2 Tecnologias de montagem de componentes .....	15
2.3 Processos de soldadura .....	17
2.3.1 Soldadura por <i>reflow</i> .....	17
2.3.2 Soldadura por onda .....	19
2.3.3 Defeitos das soldaduras na produção de PCBAs.....	21
2.4 Tipo de soldas comercializadas .....	23
2.4.1 Soldas SAC305 e SAC405 .....	23
2.5 Compostos intermetálicos .....	24

2.5.1	Pastas de solda .....	24
2.5.2	Interação entre a pasta de solda e os materiais de base .....	26
2.6	Cravações de cabos .....	29
CAPÍTULO 3 .....		33
3.1	Continental Vehicle Networking and Information (VNI).....	37
3.1.1	<i>Connected Car Networking (CCN)</i> .....	38
3.2	Continental Advanced Antenna .....	38
CAPÍTULO 4 .....		41
4.1	Cortes Metalográficos .....	43
4.1.1	Equipamento e condições de utilização .....	43
4.2	Instrução de Trabalho genérica nas instalações da Continental.....	49
4.2.1	Corte .....	49
4.2.2	Preparação das amostras .....	50
4.2.3	Desbaste.....	52
4.2.4	Polimento.....	54
4.3	Instrução de Trabalho genérica nas instalações da UTAD .....	56
4.3.1	Corte .....	56
4.3.2	Preparação das amostras .....	57
4.3.3	Desbaste.....	58
4.3.4	Polimento.....	59

4.4	Estudo das camadas intermetálicas .....	59
4.4.1	Microscópio Ótico .....	60
4.4.2	Microscópio eletrônico de varrimento (SEM) / Espectroscopia de dispersão de energias (EDS) .....	61
CAPÍTULO 5 .....		63
5.1	Análise das vantagens/desvantagens das máquinas de corte .....	65
5.2	Comparação dos dois diferentes tipos de resinas de montagem .....	65
5.3	Análise das vantagens/desvantagens das máquinas de desbaste/polimento .....	67
5.4	Análise microscópica .....	68
5.4.1	Análise microscópica das soldas em PCBs verticais .....	69
5.4.2	Análise microscópica das soldas em componentes <i>Throuh Hole</i> .....	71
5.4.3	Análise microscópica das soldas em cabos .....	73
5.4.4	Análise microscópica das cravações em cabos .....	75
5.4.5	Análise microscópica dos compostos intermetálicos .....	77
CAPÍTULO 6 .....		95
6.1	Trabalho Futuro .....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		99



## Índice de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática da constituição de uma PCI .....	9
Figura 2 – Diferentes tipos de PCIs [4] .....	11
Figura 3 - Representação esquemática dos vários tipos de placas flexíveis [5] .....	12
Figura 4 – Tipos de acabamento a) OSP; b) ENIG; c) <i>Imersion Tin</i> . [11] .....	14
Figura 5 - Componentes SMD e TH [15] .....	15
Figura 6 - PCBA com componentes TH [16] .....	16
Figura 7 - Tecnologia <i>SMT</i> .....	16
Figura 8 - Ciclo térmico utilizado na soldadura por <i>reflow</i> [20] .....	19
Figura 9 - Esquema do processo de soldadura por onda [22] .....	20
Figura 10 - Defeitos comuns na produção de PCBAs [13] .....	22
Figura 11 - Soldas sem chumbo utilizadas a) soldadura por reflow e b) soldadura por onda [26] .....	23
Figura 12 – Diagrama de equilíbrio da liga Cu-Sn .....	28
Figura 13 - Camada intermetálica formada em ligas SAC [32] .....	29
Figura 14 - Cravação ideal [37] .....	31
Figura 15 – Unidades industriais. Continental no mundo .....	36
Figura 16 – Antena da Volvo do projeto “MAM” fabricado na Continetal Advanced Antenna .....	39
Figura 17 – Máquina de serra de fita Mössner Rekord .....	44
Figura 18 – Máquina de corte manual ISOMET 5000 da marca “Buehler” [38] .....	45

Figura 19 – Máquina de polimento Saphir 550 da ATM .....	46
Figura 20 – Máquina de desbaste e polimento Rotopol da Struers .....	47
Figura 21 – Microscópio digital otico Inspex HD da marca “Ash” .....	48
Figura 22 - Microscópio óptico AxioTech da ZEISS .....	49
Figura 23 – Molde da marca Struers .....	50
Figura 24 – Amostras posicionados no centro dos moldes .....	50
Figura 25 – Material necessário para realizar a mistura da resina.....	51
Figura 26 – Enchimento dos moldes .....	52
Figura 27 – Repouso das amostras .....	52
Figura 28 – Preparação da máquina de desbaste abrasivo.....	53
Figura 29 – Iniciação do desbaste abrasivo .....	54
Figura 30 – Alteração do prato de desbaste pelo prato de polimento.....	55
Figura 31 – Pré-seleção dos dados para o polimento (esquerda) e produto MasterPrep Polishing Suspension (direita).....	55
Figura 32 – Amostra posicionada para iniciar corte.....	56
Figura 33 – Massa adesiva “Pattex” .....	57
Figura 34 – Amostra pronta para iniciar o desbaste .....	58
Figura 35 - Desbaste .....	59
Figura 36 – Soldas a analisar: a) Solda OK; b) Solda NOK .....	60
Figura 37 – Preparação das amostras: a) Método utilizado na Continental; b) Método utilizado na UTAD .....	67

Figura 38 – Desbaste/Polimento: a) Automático; b) Manual .....	68
Figura 39 – Exemplos de estudo das soldas ou cravações: a) soldas em PCBs verticais; b) soldas em MQS; c) soldas em cabos; d) cravações em cabos .....	68
Figura 40 – Junta soldada em PCBs verticais.....	69
Figura 41 – Junta soldada em PCBs verticais aceitável .....	70
Figura 42 – Junta de soldadura em PCBs verticais com defeitos (amarelo) .....	71
Figura 43 – Junta de soldadura em componentes <i>Through Hole</i> .....	72
Figura 44 – Junta soldada de componentes <i>Through Hole</i> aceitável .....	72
Figura 45 – Junta de soldadura de componente <i>Through Hole</i> com defeitos.....	73
Figura 46 – Critérios mínimos de aceitação: A e B – ângulo de molhamento da junta soldada não ultrapassar 90°; C e D – casos de exceção que ultrapassam o ângulo de 90° [13] .....	73
Figura 47 – Junta de soldadura em cabos .....	74
Figura 48 – Junta soldada em cabos aceitável.....	74
Figura 49 – Desenhos técnicos de uma cravação: tolerâncias do corte B-B .....	75
Figura 50 – Cravações em cabos .....	75
Figura 51 – Cravação em cabo aceitável .....	76
Figura 52 – Cravação em cabo com defeito .....	76
Figura 53 – Microestrutura da solda SAC 305 (2000x) [45].....	78
Figura 54 – Observação das microestruturas (50x): a) Solda boa; b) Solda má .....	78
Figura 55 – Comparação das microestruturas (200x): c) Solda boa; d) Solda má .....	79
Figura 56 – Amostra boa (SEM/EDS).....	79

Figura 57 – Identificação dos pontos de análise: Amostra boa .....	80
Figura 58 – Análise SEM: Ponto 1 (5000x) .....	80
Figura 59 – Análise de imagem SEM: Ponto 1 (5000x) .....	81
Figura 60 – Gráfico de análise EDS: ponto 1 .....	81
Figura 61 – Análise SEM: Ponto 2 (5000x) .....	82
Figura 62 – Análise de imagem SEM: Ponto 2 (5000x) .....	82
Figura 63 – Gráfico de análise EDS: ponto 2 .....	83
Figura 64 – Análise SEM: Ponto 3 (5000x) .....	83
Figura 65 – Análise de imagem SEM: Ponto 3 (5000x) .....	84
Figura 66 – Gráfico de análise EDS: ponto 3 .....	84
Figura 67 – Análise SEM: Pseudo ponto 4 .....	85
Figura 68 – Gráfico de análise EDS: Pseudo ponto 4 espectro 3 .....	85
Figura 69 – Amostra má (SEM/EDS) .....	86
Figura 70 – Identificação dos pontos de análise: Amostra má .....	86
Figura 71 – Análise SEM: Ponto 1 (2000x) .....	87
Figura 72 – Análise de imagem SEM: Ponto 1 (2000x) .....	87
Figura 73 – Análise EDS: ponto 1 .....	88
Figura 74 – Análise SEM: Ponto 2 (2000x) .....	88
Figura 75 – Análise de imagem SEM: Ponto 2 (2000x) .....	89
Figura 76 - Gráfico de análise EDS: ponto 2 .....	89

Figura 77 – Comparação entre o ponto 1 de ambas as amostras: a) Amostra boa; b) Amostra má (600x) .....	90
Figura 78 - Comparação entre o ponto 2 de ambas as amostras: c) Amostra boa; d) Amostra má (2000x) .....	90
Figura 79 – Comparação das microestruturas: e) Liga SAC305; f) Amostra boa no ponto 1 (2000x) .....	91
Figura 80 - Comparação das microestruturas: g) Liga SAC305; h) Amostra boa no ponto 2 (2000x) .....	91
Figura 81 - Comparação das microestruturas: i) Liga SAC305; j) Amostra má no ponto 1 (2000x) .....	92
Figura 82 - Comparação das microestruturas: k) Liga SAC305; l) Amostra má no ponto 2 (2000x) .....	92



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação das ligas de solda de acordo com o tamanho de partículas [12] ..	25
Tabela 2 – Diferentes tipos de pastas de solda [30] .....	26
Tabela 3 - Diferentes compostos intermetálicos que se podem formar com pasta de solda de estanho [24].....	27
Tabela 4 – Comparação entre as máquinas de corte, utilizando uma escala de 0 a 5 .....	65
Tabela 5 – Propriedades das montagens obtidas .....	66
Tabela 6 – Comparação das máquinas de desbaste/polimento.....	67
Tabela 7 – Critérios mínimos de aceitação de PCBs verticais [adaptado de 13] .....	69
Tabela 8 – Critérios mínimos de aceitação de componentes <i>Through Hole</i> [adaptado de 13] .....	71



## Siglas

CCN	–	<i>Connected Car Networking</i>
ENIG	–	<i>Electroless Nickel/ Imersion Gold</i>
IMCs	–	<i>Intermetallic Compounds</i>
OEM	–	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OSP	–	<i>Organic Solderability Preservative</i>
OTA	–	<i>Online Travel Agency</i>
PADS	–	<i>Personal Automated Design System</i>
PCBA	–	<i>Printed Circuit Board Assembled</i>
PCBs	–	<i>Printed Circuit Boards</i>
PCIs	–	Placas de Circuito Impressos
SMD	–	<i>Surface Mount Device</i>
SMT	–	<i>Surface Mount Technology</i>
TH	–	<i>Trough Hole</i>
VNI	–	<i>Vehicle Networking and Information</i>



# CAPÍTULO 1

---

INTRODUÇÃO



## 1 Introdução

O projeto final de curso apresentado foi realizado no âmbito da unidade curricular de Dissertação/Projeto de mestrado do Mestrado de Engenharia Mecânica (MEC), do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). O estágio decorreu nas instalações da empresa Continental Advanced Antenna, que está centrada no ramo automóvel, mais concretamente na produção de antenas inteligentes.

### 1.1 Considerações Gerais

As placas de circuito impresso (PCIs), também designadas por PCBs - *Printed Circuit Boards*, estão presentes em quase todos os dispositivos eletrónicos. A soldadura dos componentes eletrónicos nas placas é um aspeto importante, uma vez que é necessário atingir a temperatura correta, durante um determinado tempo, para que se obtenham camadas intermetálicas adequadas entre os componentes, a solda e os PADS - *Personal Automated Design System*.

Um *pad* é uma pequena superfície de cobre numa placa de circuito impresso que permite soldar o componente à placa.

Para além disso, a seleção e caracterização das ligas de solda desempenha um papel essencial a fim de se prever com precisão a fiabilidade das juntas de soldadura.

Durante o processo de soldadura ocorre a reação dos elementos constituintes do substrato com a solda líquida o que resulta na formação de compostos intermetálicos, na zona da interface, que promovem a ligação dos componentes à placa.

Este projeto surgiu de uma proposta feita pela empresa em questão. A Continental Advanced Antenna fundada em 2019, tem como missão o desenvolvimento e produção de antenas inteligentes para a indústria automóvel. O projeto desenvolvido enquadra-se na área da Qualidade, mais propriamente no estudo da fiabilidade das juntas soldadas e cravações em cabos, através da execução de cortes metalográficos. Consistiu igualmente na realização de uma

instrução de trabalho genérica sobre o procedimento a executar e comparação dos dois métodos experimentais utilizados no estudo em questão.

### **1.2 Objetivos**

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo da caracterização microscópica de juntas soldadas em placas de circuito impresso e das cravações em cabos, com o intuito de verificar a fiabilidade de ambas.

Foi também objetivo deste estudo a de uma instrução de trabalho genérica sobre o procedimento integral a executar e comparação dos dois métodos experimentais a serem utilizados no estudo em questão.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

O texto encontra-se organizado em 5 capítulos.

No capítulo 1, apresenta-se a introdução da dissertação, iniciando pela contextualização da dissertação, e posteriormente os objetivos da mesma.

No capítulo 2, é feito o enquadramento teórico, a introdução às Placas de Circuito Impresso, PCIs, e todos os processos envolvidos na produção das mesmas.

No capítulo 3, dá-se a conhecer da história do grupo Continental, onde está inserida a Continental Advanced Antenna.

No capítulo 4, apresenta-se o trabalho desenvolvido, que incide nas técnicas e procedimentos experimentais usados durante o estágio bem como a comparação com outras técnicas e procedimentos utilizados noutras indústrias.

No capítulo 5, são expostos e discutidos os resultados do trabalho desenvolvido.

No capítulo 6, são apresentadas as respectivas conclusões do trabalho realizado, baseadas nos resultados adquiridos, comparando-os aos resultados esperados.



# CAPÍTULO 2

---

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados aspectos relevantes quanto ao conhecimento sobre as diversas variantes relacionadas com o processo de soldadura em geral. Inicialmente é apresentada uma pequena introdução sobre as Placas de Circuito Impresso (PCI), sobre os processos de soldadura.

### 2.1 Placas de Circuito Impresso (PCI)

A PCI foi registada como patente pela primeira vez em 1943 por Paul Eisler [1] sendo responsável pelo suporte mecânico dos componentes eletrónicos e pela conectividade elétrica do circuito. A PCI é formada por um substrato de fibra de vidro embebido em resina epóxi que contem circuitos de cobre metálicos impressos, de face simples ou multicamada, sendo os últimos mais usados na atualidade [1].

Uma PCI, além de ser formada pelo material base FR-4 (*Flame Resistant 4*) composto por tecido de fibra de vidro com um aglutinante de resina epóxi resistente a chamas e pelas pistas de cobre, possui *pads* (terminais) em cobre. Nos *pads* é realizada a conexão dos componentes elétricos superficiais (SMD - *Surface Mount Device*) à PCI (Figura 1), e ainda vias condutoras, que são furos metalizados que atravessam completamente a PCI para a ligação de componentes TH (*Trough Hole*) [2].

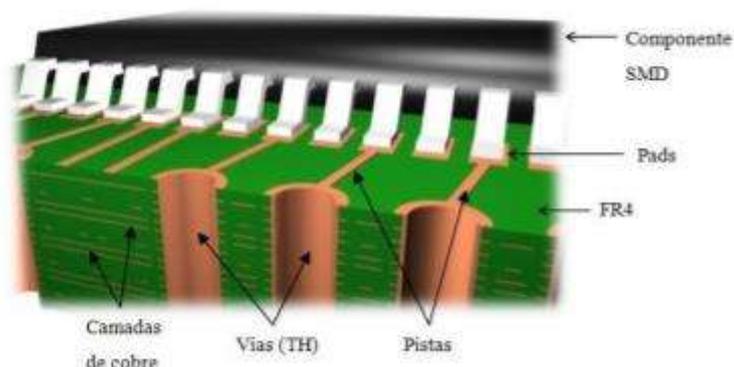


Figura 1 - Representação esquemática da constituição de uma PCI

Grande parte das PCIs produzidas mundialmente, cerca de 90%, são placas rígidas. No entanto existem algumas PCIs flexíveis, permitindo que os circuitos sejam dobrados. O circuito flexível sobreviverá a centenas de milhares de ciclos, sem qualquer interrupção nos circuitos [2]. Este tipo de PCIs abrange cerca de 10% do mercado. Um pequeno subconjunto desse tipo de circuito são os chamados circuitos flexíveis rígidos, onde uma parte da placa é rígida, ideal para montar e ligar componentes e uma, ou mais partes, é flexível, fornecendo as vantagens dos circuitos flexíveis mencionados anteriormente [2].

### 2.1.1 Classificação das PCIs

A classificação das PCIs é feita segundo vários aspetos, sendo a sua classificação confusa e ambígua. A que usa a aplicação a que se destinam os produtos, subdivide-se em três classes: PCIs de consumo, PCIs profissionais e PCIs de alta fiabilidade. Esta classificação é feita por ordem crescente no que respeita aos requisitos dos produtos, ou seja, pela ordem acima referida os produtos são de classe para classe mais caros, mais complexos, com maior exigência na qualidade e com elevado controlo dos processos de produção [2].

Na atualidade a classificação de PCIs é mais simples e compreensível, baseando-se na quantidade de camadas de cobre que cada placa contém. Logo, identificam-se nos seguintes tipos de PCIs [2, 3]:

- **PCI de face simples:** placa formada por um só lado de solda, isto é, onde existe o circuito impresso de cobre, em que no passado eram montados componentes TH, deixando o corpo do componente no lado contrário. No presente estas PCIs (Figura 2) são pouco utilizados;
- **PCI de dupla face:** como a sua designação indica, consiste numa placa constituída por dois lados que contém o circuito de cobre, fornecendo uma maior quantidade de componentes e simultaneamente a montagem de componentes SMD e TH;
- **PCI de multicamada:** estes tipos de placas são formadas por um conjunto de várias camadas de circuitos de cobre, e são usadas em situações onde a densidade de ligações necessárias é demasiado alta para se usar apenas duas camadas. São utilizadas em produtos muito complexos, altas performances e com maior custo económico. Na atualidade, com o evoluir da tecnologia e da produção em massa,

conseguem produzir-se placas com 4 ou 6 camadas, com a mesma facilidade com que se produzem as de dupla face (Figura 2) [2, 3].

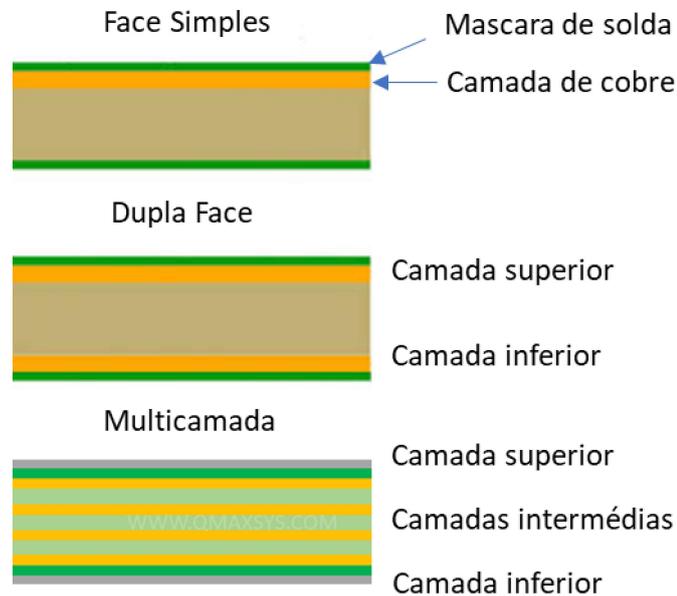


Figura 2 – Diferentes tipos de PCBs [4]

As PCBs podem ser classificadas pelo tipo de material de isolamento: placas rígidas, placas semirrígidas e placas flexíveis. As placas rígidas são formadas por vários tipos de materiais, as placas semirrígidas são uma combinação de placas rígidas com flexíveis, onde as partes rígidas suportam os componentes que estão conectadas pelas partes flexíveis [2, 5]. As placas flexíveis são formadas por substratos de poliéster ou poliamida, com espessuras na ordem de 0,1mm. Neste tipo de placas existe cobre nas faces, e estão disponíveis com face simples, dupla ou multicamada (Figura 3). As de face simples são as que têm mais procura. As propriedades volumétricas são muito eficientes, já que são muito utilizadas em equipamentos eletrónicos [2, 5].

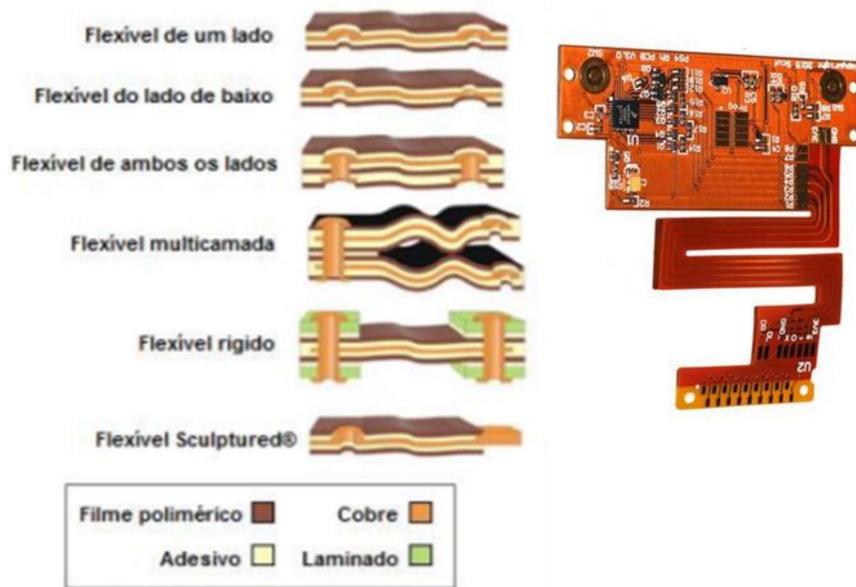


Figura 3 - Representação esquemática dos vários tipos de placas flexíveis [5]

### 2.1.2 Acabamentos Superficiais da PCI

Depois da produção da PCI, é preciso criar um revestimento/acabamento superficial final para proteger o cobre existente na PCI, com a finalidade de evitar a sua oxidação [6, 7]. O acabamento superficial desempenha várias funções, tais como [8]:

- Formar uma forte junta de solda através de uma superfície soldável;
- Prevenir a oxidação ou corrosão dos circuitos, até a montagem;
- Contruir uma barreira para diminuir a dissolução de cobre durante os processos de soldadura.

Como existem variados tipos de acabamentos superficiais, haverá a formação de interfaces diferentes, influenciando a microestrutura e propriedades mecânicas das juntas soldadas [9]. O efeito da interface solda/substrato é de elevada importância quando se fala em ligações com espessuras inferiores a 100µm, em que as propriedades da junta, ao serem tão finas vão provocar a formação de liga de solda e também de compostos intermetálicos, os quais vão ser muito importantes na fiabilidade da junta [9, 10].

Dos vários acabamentos superficiais são de salientar:

- ***Organic Solderability Preservative – OSP***: este acabamento (Figura 4 a)) baseia-se num revestimento orgânico que protege a superfície de cobre até aos processos de soldadura. Originam camadas de espessura entre 0,2 e 0,5 $\mu$ m. Este revestimento vai servir de proteção do cobre até que a placa sofra algum processo térmico, que originará a remoção da camada de proteção [1]; Além disso esta camada de proteção tem um tempo de vida curto em armazenamento (6-12 meses) [6, 8];
- ***Electroless Nickel/ Imersion Gold – ENIG***: este tipo de acabamento (Figura 4 b)) baseia-se na imersão da PCI num banho onde se acumula uma camada de níquel com espessura entre 3 e 6  $\mu$ m, por meio de um agente redutor; A camada de níquel é submersa num banho de ouro, formando uma camada fina de ouro com uma espessura entre 0,05 e 0,10 $\mu$ m [1, 8]; Durante o processo de soldadura uma parte de ouro dissolve-se, para deixar livre uma camada de níquel não oxidada para a formação da junta soldada [8]; O ENIG é um acabamento com alguns problemas, visto que necessita um controlo apertado devido:
  - a sua camada de ouro fina e porosa, que pode originar uma oxidação,
  - por causa de o níquel migrar para a superfície prejudicando a soldabilidade, que se traduz num defeito chamado *Black Pad* que poderá obrigar à reparação ou rejeição desses produtos [8];

Este tipo de processo permite que o níquel proteja a dissolução de cobre, apresentando-se um ótimo acabamento no que diz respeito coplanariedade e molhabilidade. O seu tempo de vida é superior a um ano em armazenamento.

- ***Imersion Tin***: processo onde uma placa é imersa num banho de estanho (Figura 6 c)), que origina a formação de uma densa camada de estanho por cima do cobre [8]; Este processo de imersão forma um acabamento com dimensões diretamente relacionadas com a formação dos seus compostos intermetálicos, onde a sua espessura está compreendida entre 0,8 e 1,2 $\mu$ m; A simplicidade deste processo apresenta um acabamento com boa coplanariedade, em que o tempo de vida é superior a um ano; Um dos problemas deste acabamento é a necessidade dum controlo apertado para prevenir o crescimento de filamentos de estanho que pode originar um curto-circuito. Por outro lado, devem ser prevenidos também problemas de

molhabilidade e soldabilidade, com uma camada de estanho puro á superfície, isto se os compostos intermetálicos se prolongarem até á superfície [8].

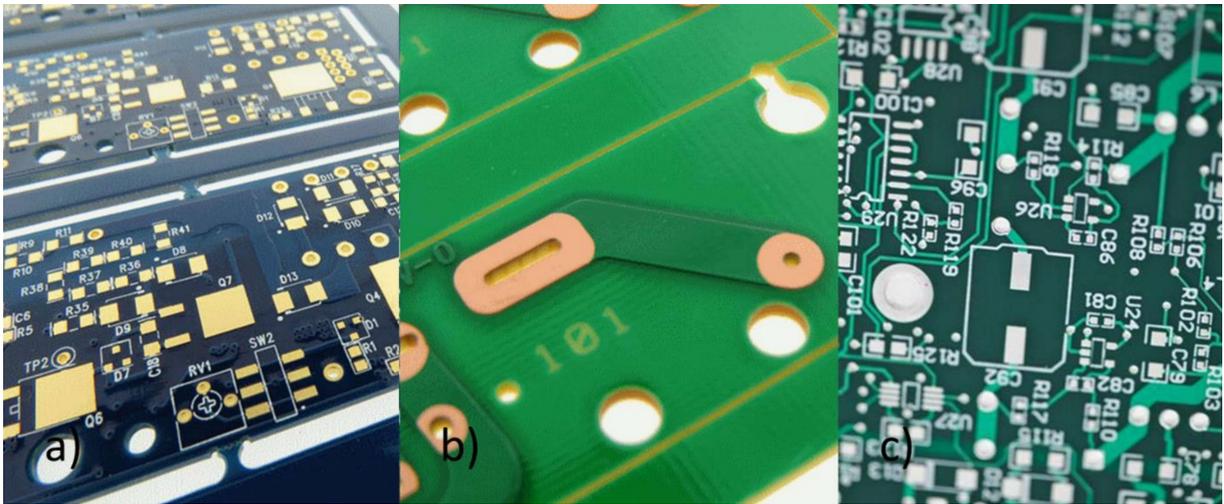


Figura 4 – Tipos de acabamento a) OSP; b) ENIG; c) *Imersion Tin*. [11]

## 2.2 Produção de PCBAs (printed circuit board assembled)

Os PCBAs consistem na fase seguinte á produção do PCB, onde os componentes são montados através de um processo de soldadura na placa. A produção dos PCBAs pode acoplar variadíssimos processos de manutenção do PCB entre outros processos ligados aos componentes eletrónicos, tais como, a soldagem, fixação, soldadura, proteção (camadas de proteção contra a humidade ou extratores de calor), inspeções e montagem final dos produtos [12].

### 2.2.1 Componentes eletrónicos

A conexão dos componentes das PCBs pode ser feita através de *pads* metálicos ou pernos de ligação, originando uma interligação entre eles [1].

Existem dois tipos de tecnologia na montagem de componentes eletrónicos, TH onde os *pads* contêm furos para a montagem de componentes e SMD onde os componentes ficam acoplados diretamente na superfície dos *pads*, e ainda a montagem dos componentes com estes dois

processos em simultâneo, o que acontece na atualidade com muita frequência [1]. A Figura 5 mostra as diferenças entre os componentes SMD e TH utilizados na indústria eletrónica [13, 14].

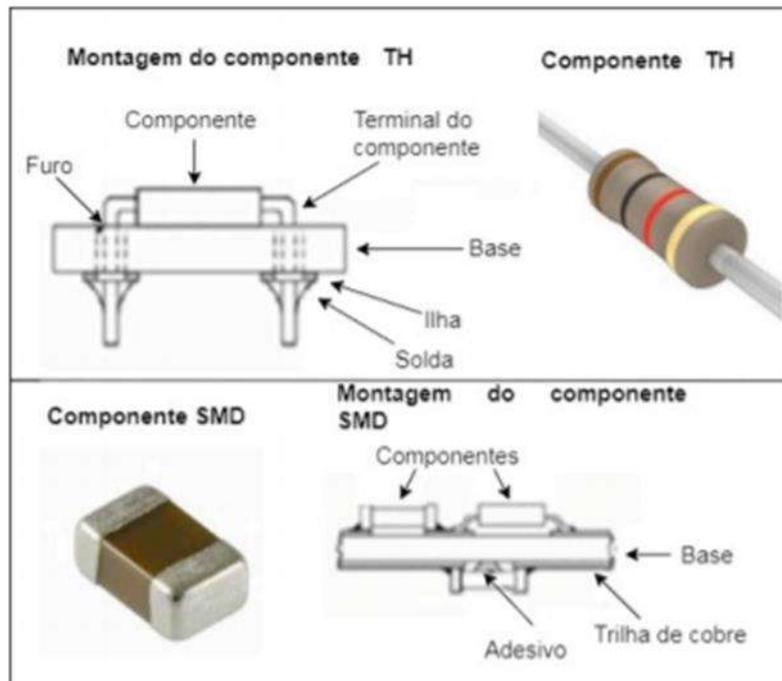


Figura 5 - Componentes SMD e TH [15]

### 2.2.2 Tecnologias de montagem de componentes

A tecnologia *Through Hole Technology* consiste na montagem de componentes, onde nos furos dos PCBs são inseridos os componentes com pinos até atravessarem o PCB, ficando ligados eletricamente entre si, e depois são soldados. O aparecimento desta tecnologia começa nos anos 20, ganhando maior importância no início dos anos 60 com a implementação da soldadura por onda [1]. O grande problema da tecnologia TH, está associado ao tamanho destes componentes que ligeiramente superior relativamente aos componentes SMD, impedindo assim a grande quantidade destes dispositivos por PCBs, o que vai limitar as funções dos mesmos. A figura 6 apresenta um exemplo de um PCBA com tecnologia *Through Hole* [1].

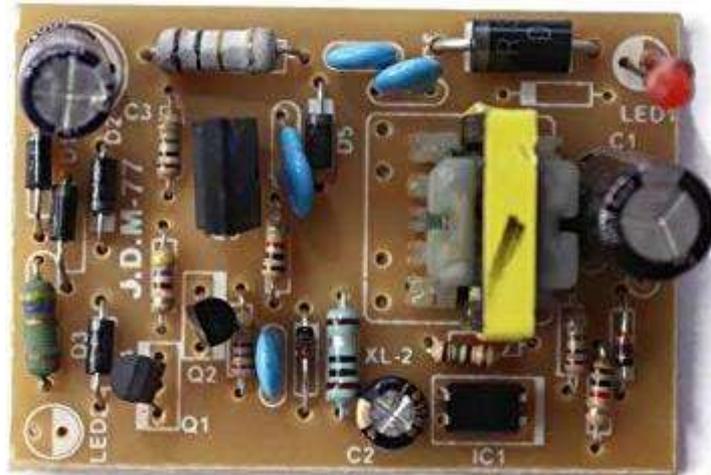


Figura 6 - PCBA com componentes TH [16]

A *Surface Mount Technology* (SMT) é um processo de montagem de componentes elétricos, onde estes são montados e soldados em *pads* à superfície da placa, podendo ser feitas montagens num só lado ou em ambos os lados da placa. Este tipo de processo é automatizado devido à necessidade de controlo e precisão durante todo o processo (aplicação da pasta, introdução dos componentes e fusão da pasta), visto que os componentes são de dimensão reduzida e sensíveis [1]. O nome dos componentes eletrónicos concebidos desta forma são dispositivos de montagem superficial. A figura 7 representa a evolução da miniaturização e complexidade das placas no processo SMT.

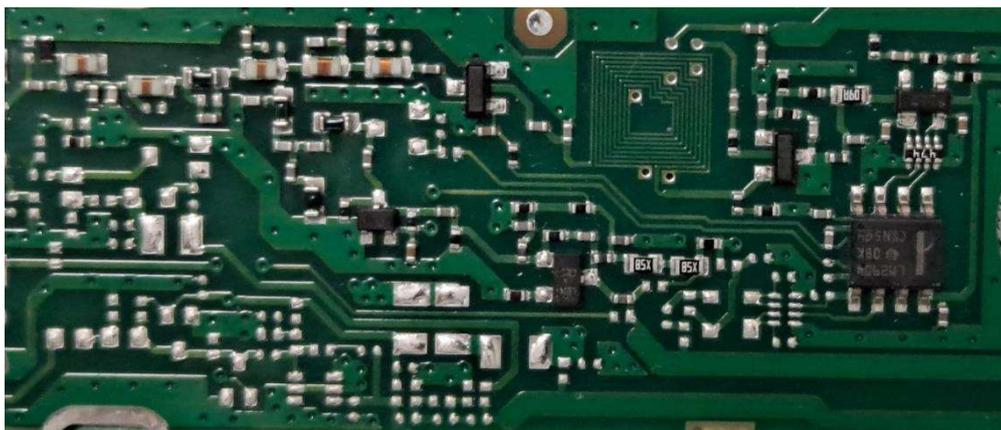


Figura 7 - Tecnologia SMT

Atualmente as tecnologias TH e SMT são uma prática muito usual, começando pela soldadura de componentes SMD na parte superior da placa pelo processo de *reflow*, enquanto que se os componentes estiverem localizados na parte inferior da placa são soldados pelo processo de soldadura por onda, mas com o auxílio de pontos de cola para fixarem os componentes na placa, antes de iniciar o processo.

### 2.3 Processos de soldadura

Os componentes eletrónicos, divididos em SMD e componentes TH, podem ser montados nos PCBs através da soldadura por *reflow*, soldadura por onda ou por soldadura seletiva. Os processos mais utilizados são a soldadura por reflow e a soldadura por onda.

A técnica de soldadura por *reflow* começou a ser utilizada quando os componentes SMD apareceram no mercado, enquanto que a técnica de soldadura por onda é utilizada para soldar componentes em que os seus terminais previamente estanhados, são introduzidos nos furos da PCI [17].

#### 2.3.1 Soldadura por *reflow*

A soldadura por *reflow* é um processo onde uma pasta de solda é usada para ligar um ou milhares de minúsculos componentes elétricos às suas PCIs, através de um aquecimento controlado deste conjunto, resultando na fusão da pasta de solda e conseqüente criação de juntas de soldadura permanentes.

A soldadura por *reflow* com fornos de convecção industriais longos é a metodologia preferida para soldar componentes de tecnologia de montagem em superfície ou SMT (*Surface Mount Technology*) a uma PCI [18].

O objetivo principal do processo de *reflow* é transferir calor suficiente para fundir a solda e formar as juntas de soldadura sem causar dano aos componentes ou ao PCI. Num perfil de soldadura por refluxo típico, normalmente são utilizados quatro estágios (Figura 8):

- **Pré-aquecimento:** Durante esta fase, os componentes, PCB e solda são aquecidos a uma temperatura de pré-refluxo (150°C) ou de permanência especificada, tomando cuidado para não aquecer muito rapidamente. O aquecimento muito rápido pode causar defeitos, como componentes que quebram e a pasta de solda respingar, causando bolas de solda durante o refluxo.
- **Pré-Refluxo:** O objetivo desta fase é garantir que todos os componentes estejam na temperatura exigida antes de entrar no estágio de refluxo. O pré-refluxo geralmente dura entre 60 e 120 segundos, dependendo do 'diferencial de massa' do conjunto e dos tipos de componentes presentes. Quanto mais eficiente for a transferência de calor durante a fase de pré-refluxo, menos tempo será necessário, com atenção para não atingir a temperatura de pré-refluxo ou tempo excessivo, podendo resultar no esgotamento do fluxo.
- **Refluxo:** Este é o estágio em que a temperatura dentro do forno de refluxo aumenta acima do ponto de fusão da pasta de solda (235°C), causando a formação de um líquido. O tempo em que a solda é mantida acima de seu ponto de fusão é importante para garantir que ocorra o 'contacto' correto entre os componentes eletrônicos e o PCB. O tempo é geralmente de 30 a 60 segundos e não deve ser excedido para evitar a formação de juntas de solda quebradiças. É importante controlar o pico de temperatura (235-245°C) durante a fase de refluxo, pois alguns componentes podem falhar se expostos a calor excessivo.
- **Arrefecimento:** Este é simplesmente o estágio durante o qual o conjunto é arrefecido, mas é importante não arrefecer o conjunto muito rapidamente - normalmente a taxa de arrefecimento recomendada não deve exceder 3°C / segundo [19].

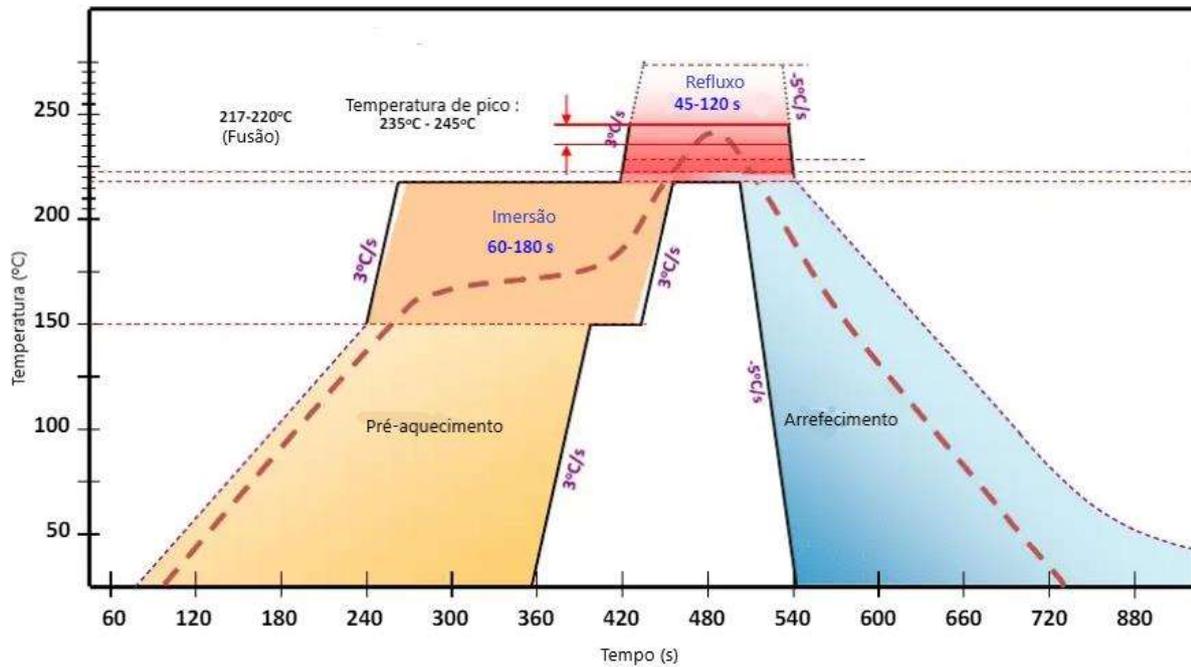


Figura 8 - Ciclo térmico utilizado na soldadura por *reflow* [20]

### 2.3.2 Soldadura por onda

A soldadura por onda é um processo de soldadura em grande escala pelo qual os componentes eletrónicos são soldados a uma placa de circuito impresso (PCI) para formar um conjunto eletrónico. O nome é oriundo do uso de ondas de solda fundida para anexar componentes de metal ao PCI. O processo utiliza um tanque para armazenar uma quantidade de solda fundida, os componentes são inseridos ou colocados no PCB e este ao ser carregado é passado por uma onda bombeada ou cascata de solda (Figura 9). A solda molha as áreas metálicas expostas da placa, criando uma conexão mecânica e elétrica confiável. O processo é muito mais rápido e pode criar um produto de qualidade superior comparativamente á soldadura manual de componentes [21].

A soldadura por onda é usada tanto para montagens de circuito impresso através de orifício quanto para montagem em superfície (SMT). No último caso, os componentes são colados pelo equipamento de colocação na superfície da placa de circuito impresso antes de passar pela onda de solda fundida [21].

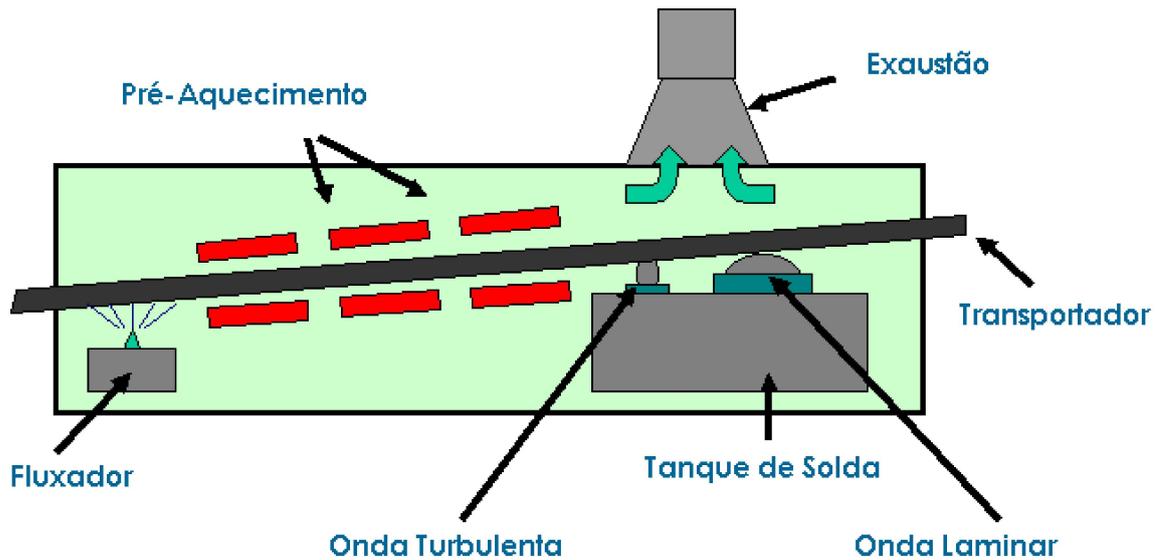


Figura 9 - Esquema do processo de soldadura por onda [22]

A soldadura por onda é um processo em linha no qual a parte inferior da placa de circuito impresso é tratada com fluxo, a seguir pré-aquecida e mergulhada em solda líquida. Na próxima etapa, a placa é arrefecida. Esta é a essência de todo o processo de soldagem por onda. De seguida é apresentado o processo, etapa a etapa, do funcionamento da máquina de soldadura por onda [23]:

- **Fusão da solda:** Este é o primeiro passo em todo o processo de soldadura por onda. A máquina de solda por onda tem solda armazenada num tanque. O tanque é aquecido para fundir a solda. A temperatura apropriada é atingida para atingir a consistência correta, de modo que o processo de soldadura possa ser realizado posteriormente.
- **Limpeza dos componentes:** Os componentes a serem soldados são limpos completamente nesta etapa. Se alguma camada de óxido for formada nos componentes, ela será removida. Isso é feito pelo processo denominado por aplicação de fluxo. Existem dois tipos principais de fluxo - corrosivo e não corrosivo, ambos de alta acidez.
- **Colocação do PCI:** Após fundir a solda e limpar os componentes a serem soldados, a placa de circuito impresso é colocada no banho de solda. A placa é fixa com os

grampos metálicos da máquina, que garantem o posicionamento e colocação firmes do PCI.

- **Aplicação da solda:** Depois do PCI se encontrar corretamente colocado, a solda fundida é aplicada e pode assentar. Esta etapa requer determinado tempo, para permitir que a solda assente nas juntas completamente e garantir que nenhum relevo seja formado.
- **Limpeza:** Esta é a etapa final do processo de soldadura por onda. Quaisquer resíduos de fluxo formados durante o processo são limpos nesta etapa. A placa de circuito é lavada e limpa com a ajuda de água desionizada e solventes.

### 2.3.3 Defeitos das soldaduras na produção de PCBAs

Os problemas ou defeitos associados aos PCBAs, são originados pelos materiais das placas ou componentes, inclusive em todos processos de conceção do produto, tais como, propriedades dos materiais (pasta ou placa) ou contaminações dos mesmos [24]. De modo a simplificar o processo de análise dos tipos de defeito, a Continental recorre às normas do IPC-A-610. Estas normas dividem-se em 3 classes de critérios de aceitação [13]:

- Classe 1: Produtos eletrónicos em geral. Esta classe baseia-se nas aplicações do produto em que o seu foco é a função do produto completo;
- Classe 2: Produtos eletrónicos para serviços específicos. Esta classe foca-se na performance continua e vida longa dos produtos, além de os produtos com trabalho continuo e sem interrupções.
- Classe 3: Produtos eletrónicos de elevada *performance*. Nesta categoria é de importância avultada o funcionamento contínuo e em alta performance dos produtos, visto que o tempo de inatividade não é tolerado, como o caso de equipamento de suporte de vida, onde a sua atividade tem de ser ininterrupta.

Os defeitos mais comuns em PCBAs estão especificados na Figura 10.

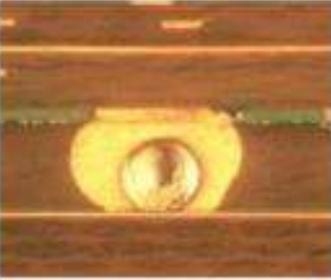
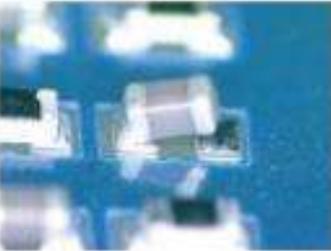
Defeito	Descrição do defeito
<p data-bbox="368 300 544 327"><b>Bolas de solda</b></p> 	<p data-bbox="730 344 1374 533">Este defeito pode evidenciar-se após o processo de soldagem por <i>reflow</i> e pode ser resultado de incompatibilidade entre a solda e o <i>soldermask</i>; problemas de humidade ou de evaporação do fluxo.</p>
<p data-bbox="323 607 596 633"><b>Solder shorts/ bridging</b></p> 	<p data-bbox="730 618 1353 857">Podem resultar da deficiente aplicação de pasta ou do processo de soldagem, tendo em conta a miniaturização constante dos componentes que se traduz por distâncias entre <i>pads</i> cada vez menores. Resultando assim na ligação por solda de dois <i>pads</i> resultando em curto-circuito.</p>
<p data-bbox="277 898 643 925"><b>Enchimento incompleto de TH</b></p> 	<p data-bbox="730 947 1353 1133">Este caso não é considerado especificamente um defeito. É um requisito/especificação e usualmente está relacionado com problemas de molhabilidade, fluxação ou de temperatura.</p>
<p data-bbox="389 1211 528 1238"><b>Porosidade</b></p> 	<p data-bbox="730 1249 1374 1489">Como é de prever o principal fator que está na origem deste tipo de defeito é a humidade que pode ficar aprisionada na própria placa ou na solda, que aquando da passagem por um processo térmico de soldagem pode ter uma incorreta evaporação.</p>
<p data-bbox="392 1554 525 1581"><b>Tombstone</b></p> 	<p data-bbox="730 1559 1358 1850">Este caso específico é usualmente observado em produtos com acabamentos superficiais <i>HASL</i>. Este defeito provém principalmente de acabamentos desnivelados, que resultam em impressões de pasta deficientes, logo soldagem inconstante. Pode resultar de casos em que um dos <i>pads</i> é dissipador térmico soldando mais tarde ou nem soldando.</p>

Figura 10 - Defeitos comuns na produção de PCBAs [13]

## 2.4 Tipo de soldas comercializadas

Até hoje as soldas Estanho-Chumbo eram as mais utilizadas no mundo, devido às suas características de alta soldabilidade e excelente acabamento que oferecem ao produto final. No entanto, este tipo de soldas tem um grande problema em termos ambientais e para a saúde humana, devido ao chumbo ser uma substância altamente tóxica. Em alternativa a estas soldas foram criadas as soldas livres de chumbo (Figura 11), em que estas têm características semelhantes ou melhores que as soldas de Estanho-Chumbo [25].

As ligas sem chumbo mais utilizadas são as SAC305 (96,5Sn – 3,0Ag – 0,5Cu) e as SAC405 (95,5Sn – 4,0Ag – 0,5Cu).

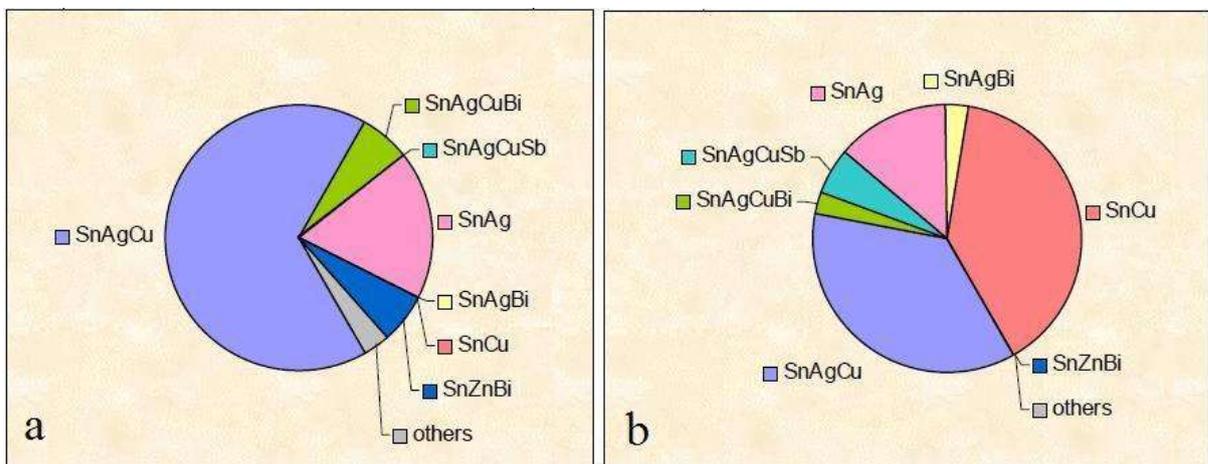


Figura 11 - Soldas sem chumbo utilizadas a) soldadura por reflow e b) soldadura por onda [26]

### 2.4.1 Soldas SAC305 e SAC405

As soldas SAC305 e a SAC405 são soldas livres de chumbo, que foram desenvolvidas para substituir as ligas de solda com chumbo.

A SAC 305 constituída por 96,5% de Estanho, 3,0% de Prata e 0,5% de Cobre é utilizada no processo de soldadura por onda, normalmente disponibiliza em fio de 3 mm de diâmetro. A SAC405 é constituída por 95,5% de Estanho, 4,0% de Prata e 0,5% de Cobre, em que este tipo de solda é utilizada no processo de soldadura por *reflow*, é fornecida em pasta, sendo constituída por pó de solda e fluxo. Estas ligas têm a mesma temperatura de fusão, 217°C [27].

As ligas de solda de Sn-Ag possuem boas características mecânicas, e o seu ponto de fusão é de 221°C, relativamente superior às ligas com chumbo, Sn-Pb, em que o seu ponto de fusão é de 187°C. A adição de cobre nesta liga sem chumbo tem várias vantagens, tais como, melhoria das propriedades mecânicas e térmicas das juntas soldadas, melhoria a molhabilidade da solda, redução ligeira da temperatura de fusão e permissão de um crescimento mais lento dos componentes intermetálicos [27].

### 2.5 Compostos intermetálicos

Os compostos intermetálicos resultam da reação dos elementos constituintes do substrato com a solda líquida durante o processo de soldadura, originando a formação de novos compostos. Estes compostos têm o objetivo de promover a ligação de componentes á placa. A origem dos IMCs (*Intermetallic Compounds*) está diretamente ligada com as propriedades de tensão e deformação das juntas soldadas [28].

#### 2.5.1 Pastas de solda

A pasta de solda resulta da junção de partículas de uma liga metálica com o fluxo que serve de condutor. Depois de chegar ao ponto de fusão, as partículas juntam-se dando origem a uma massa líquida uniforme que quando entra em contacto com o *pad*, formam compostos intermetálicos nas interfaces [12].

De acordo com os processos de soldadura, os aspetos mais importantes das pastas de solda são: a sua metalurgia, o tamanho das partículas, o tipo de fluxo e seus resíduos, a viscosidade, a sensibilidade à temperatura e humidade, entre outros. O aspeto mais relevante dos anteriormente enunciados é a viscosidade, devido ao tipo de escoamento da mistura. Além deste aspeto o tamanho das partículas e a sua distribuição alteram as características da impressão da pasta [12].

O tamanho das partículas e as muito pequenas distâncias entre *pads*, (cerca de 0,5 mm) influenciam a escolha da pasta de solda.

Na seguinte tabela 1, são especificadas as classificações das pastas de solda em concordância com o tamanho das partículas [12].

Tabela 1 - Classificação das ligas de solda de acordo com o tamanho de partículas [12]

Tipo de liga de solda	Intervalo de tamanho de partículas. No mínimo 80% ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho máximo ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho de partículas mínimo. Menos de 1% ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho de partículas mínimo. Menos de 10% ( $\mu\text{m}$ )
<b>I</b>	150-75	160	150	20
<b>II</b>	75-45	80	75	20
<b>III</b>	45-25	50	45	20
<b>IV</b>	38-20	40	38	20
<b>V</b>	25-15	30	25	15
<b>VI</b>	15-5	20	15	5

A formação de diferentes compostos intermetálicos deve-se à composição e características da pasta. Estes compostos irão afetar a microestrutura e características das juntas [12, 24].

Um dos aspectos com maior importância na soldadura é a temperatura, visto que em todos os elementos a serem soldados deve ser atingida a temperatura de fusão da solda, onde vai acontecer a molha das superfícies. Ao realizar este processo, a temperatura de fusão a ser atingida pode ser elevada, podendo provocar danos nos componentes a serem soldados, o que vai comprometer o funcionamento dos mesmos. Este assunto tem extrema importância com o uso das pastas de solda de *lead free* [12].

A pasta Sn6Pb37 foi sempre a mais utilizada, com ponto de fusão de 183°C, mas o aparecimento da nova legislação cerca da eliminação do chumbo, por ser um produto nocivo para o ambiente, levou à criação das pastas *lead free*, com boa molhabilidade, resistência à fadiga e maleabilidade. As pastas *lead free* SAC (Sn-Ag-Cu) tem uma temperatura de fusão superior, 217 a 221°C, e devido à sua constituição podem formar diferentes compostos intermetálicos afetando as características das juntas de soldadura [12, 29]. Na Tabela 2, podemos visualizar os diferentes tipos de pasta de solda.

Tabela 2 – Diferentes tipos de pastas de solda [30]

Pasta de solda	Ponto de fusão (°C)	Temperatura de operação (°C)	Janela de processo (°C)
<b>Sn-Pb</b>	183	250-260	67-77
<b>Sn-Ag-Cu</b>	217	265-270	48-53
<b>Sn-Cu-Ni</b>	217	265-270	38-43

Como as pastas de solda têm temperaturas de fusão diferentes, realiza-se uma etapa de pré-aquecimento nos processos de soldadura, com o intuito de prevenir o choque térmico, simplificar o molhamento e também para ativar o fluxo [2, 8].

### 2.5.2 Interação entre a pasta de solda e os materiais de base

No contato entre o cobre e a liga fundida, átomos de cobre tendem a espalhar-se no metal líquido. A concentração de átomos de cobre à superfície tende a ser elevada, originando a formação de uma interface com constituição diferente da liga metálica; esta denominada por camada intermetálica [24]. Esta interface usualmente é a zona que apresenta maior debilidade do conjunto das partes a ligar, devido a estes compostos apresentarem características de rigidez e fragilidade, aumentando as probabilidades de formação de fissuras ou fraturas. Por isso, os compostos intermetálicos podem ter influência nas características das juntas de soldadura, assim como afetar os processos de ligação e molhamento [31].

O aumento exponencial da camada intermetálica representa-se pela seguinte expressão:

$$X = (kt)^{(1/2)} \tag{1}$$

Onde,

X – é a espessura da camada intermetálica

t – é o tempo

k – é uma constante de crescimento a uma temperatura específica

A formação de diferentes compostos intermetálicos em diferentes substratos está representada na tabela 3.

Tabela 3 - Diferentes compostos intermetálicos que se podem formar com pasta de solda de estanho [24].

Substrato do <i>pad</i>	Compostos intermetálicos
<b>Cu (Cobre)</b>	Cu <sub>3</sub> Sn ( $\epsilon$ ); Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> ( $\eta$ )
<b>Ni (Níquel)</b>	Ni <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> , Ni <sub>3</sub> Sn <sub>4</sub> , Ni <sub>3</sub> Sn <sub>7</sub>
<b>Fe (Ferro)</b>	FeSn, FeSn <sub>2</sub>
<b>Ag (Prata)</b>	Ag <sub>3</sub> Sn

Esta formação de diferentes compostos intermetálicos vai definir as características e a qualidade das juntas de soldadura.

Na junção de estanho com cobre, vão formar-se duas camadas intermetálicas Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> e Cu<sub>3</sub>Sn, denominadas de fase  $\eta$  e  $\epsilon$  respetivamente (Figura 12).

O ponto eutético desta liga está localizado a 99,3 % de estanho e 0,7 % de cobre à temperatura de 227°C. A transformação eutética desta liga é traduzida pela seguinte equação 2 [29]:



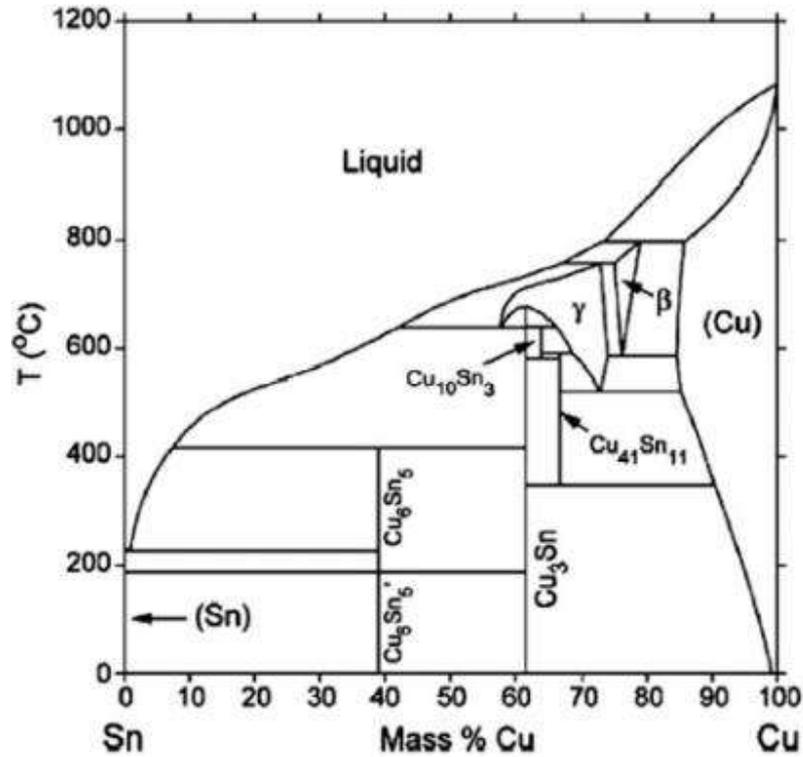


Figura 12 – Diagrama de equilíbrio da liga Cu-Sn

As pastas de solda SAC são ligas formadas por 2 fases, uma com abundância de estanho e outra com prata. Separadas pelo volume da solda, é possível verificar-se a formação de partículas pequenas, geralmente  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ , e  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  originárias da interface solda/cobre que, depois de atingido o limite máximo de crescimento começam a espalhar-se pela junta de soldadura (Figura 13).

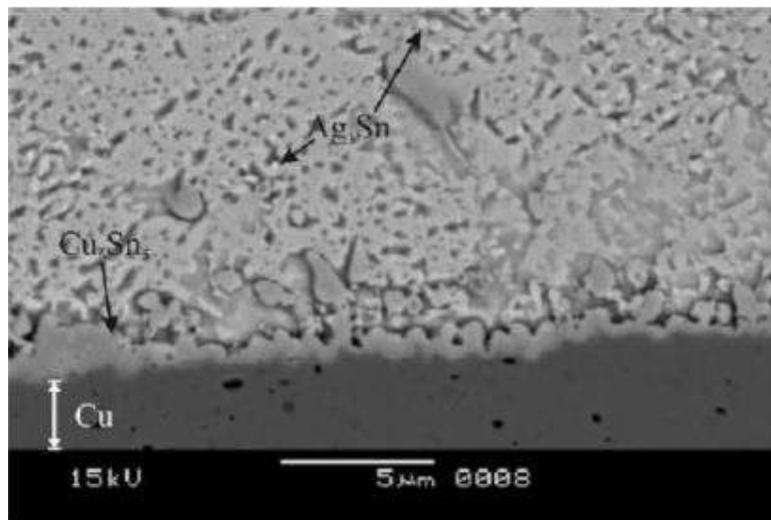


Figura 13 - Camada intermetálica formada em ligas SAC [32]

Em algumas situações, as partículas compostas por  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  ao serem encontradas em regiões onde se concentram tensões, podem influenciar a fiabilidade das juntas soldadas. Estas partículas podem estar relacionadas com velocidades de arrefecimento lentas no processo de soldadura [33].

Como referido anteriormente, as partículas intermetálicas ( $\text{Ag}_3\text{Sn}$  e  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) podem melhorar e fortalecer a resistência á fadiga das juntas de solda. Tem de ser dada especial atenção á sua espessura, ou seja, a sua espessura tem de ser devidamente controlada, devido às suas propriedades mecânicas e térmicas [34]. Se os IMCs tiverem espessuras elevadas podem provocar falhas mecânicas da PCI. No entanto uma formação irregular ou insuficiente de compostos intermetálicos, pode dar origem a juntas soldadas instáveis ou fracas [35,36].

## 2.6 Cravações de cabos

A cravação há muito que é reconhecida como uma técnica elétrica e mecanicamente sólida para a terminação de fios. Como a cravação é um processo estritamente mecânico, é relativamente fácil de automatizar. Devido a essa capacidade de automação, a cravação tornou-se uma técnica aceitável de terminação de fios/cabos em muitos setores [37].

Os terminais que são projetados para a cravação rápida em máquinas automáticas ou semiautomáticas costumam ser significativamente diferentes dos que são projetados para montagem através de ferramentas manuais. Contudo a maioria dos terminais e contatos para cravação por máquina também possam ser aplicados com ferramentas manuais [37].

Os terminais que são projetados para aplicação manual normalmente não podem ser usados em máquinas automáticas. A seleção de um método de cravação é determinada por uma combinação de cinco fatores:

- Acesso do fio;
- Tamanho do fio;
- Quantidade de produção;
- Disponibilidade de energia;
- Projeto do terminal ou contato.

Existem, é claro, outros fatores que devem ser considerados. Por exemplo, se os condutores acabados podem ser manuseados bruscamente, como na indústria de eletrodomésticos ou automotiva, o isolamento do condutor e do terminal ou contato deverão ser de maior tamanho do que o eletricamente necessário para resistir quando usados incorretamente.

O utilizador deve lembrar-se da importância de manter a combinação adequada do terminal do fio e da ferramenta. Só assim a geometria e a profundidade da cravação ideal podem ser obtidas.

Em suma, para se obter uma cravação ideal, é melhor seguir as recomendações do fabricante, uma vez que a maioria dos terminais foi projetada para uma forma de cravação específica.

Numa cravação ideal (Figura 14) a conexão tem cerca de 80% do quadrado original após o processo de cravação devido ao processo de fluxo [37].



Figura 14 - Cravação ideal [37]

Vantagens na utilização do método de cravação em cabos durante a sua produção:

- nenhum dano à saúde associado a exalações de metais pesados e solda;
- produção eficiente de conexões em cada volume de produção, escolhendo a tecnologia de fabrico adequada;
- sem isolamento queimado, descolorido ou superaquecido;
- nenhuma interferência nas características da mola de contatos resilientes por calor de solda.

Vantagens na utilização do método de cravação em cabos no geral:

- sem pontos de solda fria;
- manutenção da flexibilidade do cabo atrás da ligação de cravação;
- resistente a vibrações;
- maiores forças de tração como, por exemplo ligações soldadas;
- ligação elétrica não corrosiva [37].



# CAPÍTULO 3

---

GRUPO CONTINENTAL



### 3 Grupo Continental

A Continental foi fundada em Hanover em 1871 como uma sociedade por ações "Continental- Caoutchouc- und guta-percha Compagnie". Em Hanover, a sua laboração principal incluía produtos suaves de borracha, tecidos revestidos por borracha, e pneus maciços para carruagens e bicicletas.

Em 1898, os êxitos iniciais no desenvolvimento e produção foram comemorados com a produção de pneus sem desenho de piso (lisos), para automóveis. No virar do século, o primeiro dirigível alemão LZ 1 utiliza material de borracha Continental para vedação dos recipientes de gás. Em 1904 a Continental tornou-se na primeira companhia mundial a desenvolver e a produzir pneus para automóveis com desenho de piso e em 1905 iniciou a produção de pneus antiderrapantes com rebites precursores dos pneus para neve com pinos, semelhante aos pneus com pregos posteriores, e três anos mais tarde, inventou a jante desmontável para automóveis ligeiros, permitindo assim, a economia de tempo e de esforço na mudança do pneu. Em 1909, o aviador francês Louis Blériot, efetua a primeira travessia aérea do canal da Mancha; a fuselagem e asas do seu avião são revestidas com material da marca Continental.

No final de 1920, a empresa fundiu-se com as principais empresas de produção de borracha para formar assim, a "Continental Gummi - Werke AG".

Em 1951 iniciou a produção de correias transportadores com telas metálicas. Em 1955, foi a primeira empresa a desenvolver molas para camiões e autocarros. A produção em série de pneus radiais ligeiros começou em 1960. Cerca de 30 anos depois, trouxe para o mercado os primeiros pneus ecológicos para veículos de passageiros.

Em 1955, a divisão "Automotive Systems" foi fundada com a finalidade de intensificar a atividade comercial e desenvolvimento de sistemas automotivos para a indústria automóvel. Apresentam, em 1997 a tecnologia-chave para sistemas ecológicos de arranque do motor e geradores convencionais, de híbridos.

Hoje, a Continental está entre os 5 maiores fornecedores mundiais da indústria automóvel. Como fornecedor de sistemas de travagem, sistemas e componentes para acionamentos e chassis, instrumentação, soluções de *infotainment*, eletrónica de veículos, pneus e elastómeros

técnicos, a Continental contribui para uma maior segurança na condução e na proteção ambiental global [39].

Na Figura 15 pode ver-se a expansão desta empresa em termos mundiais. A Continental é também um parceiro competente na comunicação automobilística em rede. Em Portugal, o grupo Alemão conta com 4 unidades fabris, localizadas em Famalicão, Paranhos e em Vila Real.

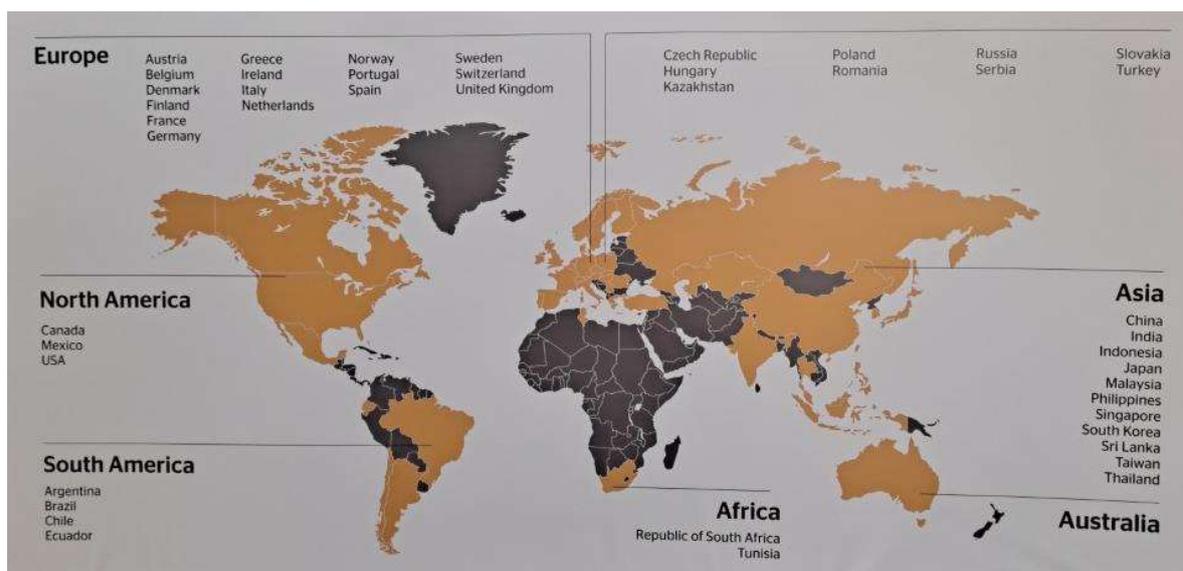


Figura 15 – Unidades industriais. Continental no mundo

Esta marca, de referência na indústria automobilística, é a criadora da tecnologia que produz o atual pneu mais seguro do mundo e é a principal fornecedora de equipamentos eletrónicos e de pneus de várias marcas conceituadas, como é o caso da Audi, da Daimler, da BMW e da Volkswagen, entre outras grandes montadoras de veículos. O grupo Continental está presente em 60 países e emprega mais de 240 000 pessoas [40].

### 3.1 Continental Vehicle Networking and Information (VNI)

A área de negócios *Vehicle Networking and Information* (VNI) desenvolve soluções e serviços para veículos em rede com motoristas e passageiros, outros veículos, infraestrutura e *cloud* [41].

A visão “*Always On*” vê o veículo do futuro como um parceiro que apoia os seus passageiros com soluções inteligentes e seguras. Para a Continental VNI, o veículo de amanhã está perfeitamente conectado em rede, fácil de usar, confortável e inteligente. A conectividade abre caminho para uma experiência de direção mais segura, eficiente e confortável, e os veículos estão a tornar-se um “dispositivo inteligente”, mantendo os motoristas e passageiros sempre bem informados [41].

A interface homem-máquina também desempenha um papel fundamental para a mobilidade futura. Esta estrutura e visualiza informações de forma rápida e clara, levando em consideração a situação de direção e a condição do motorista. Os utilizadores estão continuamente a receber *feedback* confiável sobre todas as suas ações. Isso tira o esforço do motorista, fortalece a confiança nas funções individuais do veículo e é um aspeto importante na estrada no que concerne à direção automatizada [41].

Com competências de integração de sistema da VNI, desenvolveram-se soluções de ponta a ponta, baseadas em *hardware* e *software* que são competitivos em termos de custos, mas também altamente inovadores. Atendendo-se a aplicativos e funções padrão, mas também no desenvolvimento de soluções que levam em consideração a crescente demanda por poder de computação, futuras aplicações, funções e arquiteturas de todo o veículo para conectividade holística e experiência do utilizador ou para direção autónoma [41].

Também estão a ser criadas novas funções e serviços inovadores que vão além do veículo e criam valor agregado para clientes e para o utilizador final. Expansão continua no negócio de serviços em relação ao gerenciamento de frotas, parcerias estratégicas, participações acionárias majoritárias e minoritárias e aquisições desempenham um papel importante para expandir experiência e força da empresa [41].

### 3.1.1 *Connected Car Networking* (CCN)

A unidade de negócios *Connected Car Networking* (CCN) representa uma conectividade perfeita e arquiteturas elétricas/eletrônicas modernas para veículos. A CCN desenvolve tecnologias e serviços pioneiros para conectar veículos com o mundo exterior de uma forma segura e confiável, processar e gerenciar os dados do veículo em novas arquiteturas elétrica/eletrônica de veículos e digitalizar a experiência de acesso ao veículo para a máxima comodidade do motorista. O CCN integra dispositivos inteligentes ao ecossistema automotivo para uma experiência holística do utilizador [41].

Com comunicação confiável e conectividade através dos limites do domínio, as soluções CCNs melhoram a eficiência do veículo (por exemplo, computador de alto desempenho, módulos de controle do corpo, sistemas de informação de pneus), conveniência (por exemplo, chaves virtuais, porta elétrica, controle inteligente de vidro, integração de dispositivo inteligente) e segurança. Soluções completas de ponta a ponta permitem vários serviços em todo o veículo, por exemplo, atualizações OTA seguras e diagnósticos remotos de veículos, serviços baseados em chave virtual, bem como integração de software OEM e de terceiros [41].

As soluções de *Connected Car Networking* são os principais impulsionadores para futuros veículos de direção inteligente e autônoma. [41]

## 3.2 Continental Advanced Antenna

A Continental Advanced Antenna Portugal, localizada em Vila Real, é uma das principais especialistas e fabricantes de antenas para veículos da Europa. Produz cerca de 18 milhões de antenas por ano, que são exportadas para todo o mundo. Com cerca de 550 colaboradores, a Continental Advanced Antenna Portugal é uma das maiores empregadoras privadas no distrito de Vila Real. A empresa pertence à área de negócio *Vehicle Networking Information* (VNI), faz parte da Unidade de Negócio *Connected Car Networking* (CCN) e labora, essencialmente, com o segmento *premium* de marcas da indústria automóvel.

A Continental Advanced Antenna pertence à divisão interior do grupo Continental, faz parte da unidade de negócio Body & Security e trabalha, essencialmente, com o segmento ‘*premium*’

de marcas como o grupo Daimler, BMW, Audi, Volvo, entre outros grupos importantes do setor automóvel. O mercado das antenas para veículos promete ser um negócio em crescimento, com a Continental a estimar que aumente cerca de 6,5%, por ano, até 2022, lembrando que as antenas inteligentes para veículos são o ponto de partida para a conectividade do futuro dentro e fora do automóvel.

O módulo de antena inteligente substitui as antenas individuais que, até hoje, eram espalhadas em torno dos veículos, combinando as antenas e os componentes eletrônicos complementares num módulo de *hardware* (Figura 16), o que não só simplifica o conjunto de cabos e reduz o espaço da instalação, como melhora simultaneamente a qualidade do sinal.

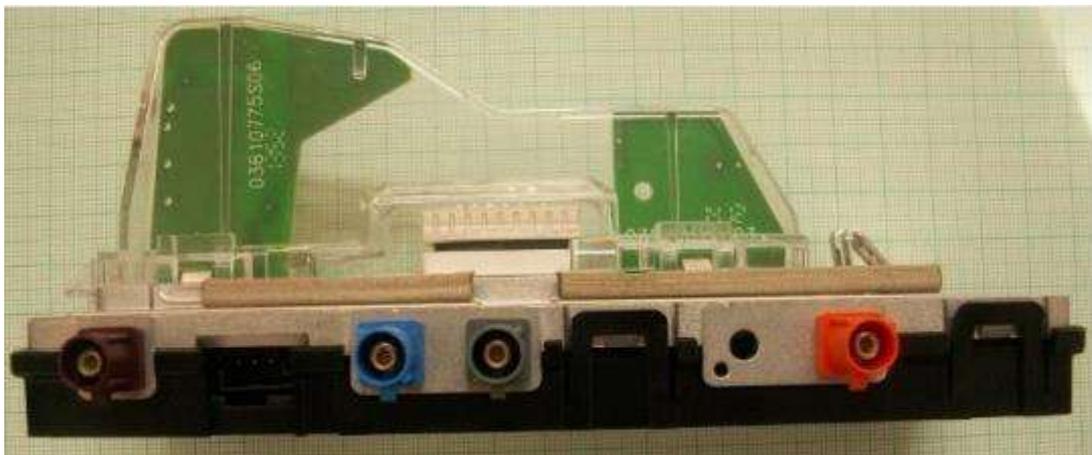


Figura 16 – Antena da Volvo do projeto “MAM” fabricado na Continental Advanced Antenna



# CAPÍTULO 4

---

TRABALHO DESENVOLVIDO



## **4 Trabalho Desenvolvido**

O estudo desenvolvido na Continental Advanced Antenna foi integrado no departamento da Qualidade e orientado pelo responsável do mesmo, Eng. Nuno Almeida. Tem como objetivo principal, o estudo da fiabilidade das juntas de soldadura e cravação de cabos, através de cortes metalográficos. E ainda a criação de um documento genérico com o procedimento integral realizado, comparando dois métodos diferentes e tirando as devidas conclusões.

### **4.1 Cortes Metalográficos**

A preparação de amostras é um processo que compreende uma sequência de etapas realizadas tendo em vista preparação de superfícies para a realização de diversos tipos de análises metalográficas, permitindo deste modo observar múltiplos aspetos através da revelação da sua microestrutura e morfologia. Estas etapas incluem, a seleção do local a analisar, o corte, a montagem, o polimento e o ataque químico ou eletroquímico, para posterior análise.

#### **4.1.1 Equipamento e condições de utilização**

Os equipamentos utilizados para a preparação de amostras para metalografia incluem máquinas de corte, onde é possível realizar o corte de peças com diferentes formas e dimensões, e máquinas de polimento com unidade de polimento automático, onde é possível o polimento com lixas de água e com panos de polimento. Para o ataque químico utilizam-se reagentes apropriados, específicos para cada material e objetivos e o eletroquímico recorre a fontes de alimentação que conjuntamente com as soluções químicas apropriadas promovem a revelação da microestrutura.

4.1.1.1 Máquinas de corte metalográfico

As máquinas de corte são utilizadas para obter as peças cortadas com as dimensões requeridas para o respetivo estudo. As máquinas utilizadas durante a realização deste estágio foram máquinas de serra de fita e de corte de precisão.

A serra de fita utilizada da marca Mössner Rekord (Figura 17) e possui as seguintes características:

- Corte de vários tipos de materiais
- Plataforma para corte em aço ou metálica
- Grande superfície para corte



Figura 17 – Máquina de serra de fita Mössner Rekord

A máquina de corte de precisão utilizada, foi da marca da Buehler, modelo IsoMet 500 (Figura 18) e possui as seguintes características e vantagens:

- Permite o corte de amostras delicadas com deformação mínima;
- Mecanismo de alimentação linear;
- Base em alumínio fundido permite estabilidade e resistência à vibração com componentes de precisão e rolamentos lineares;
- Duas opções de corte (automático e manual).



Figura 18 – Máquina de corte manual ISOMET 5000 da marca “Buehler” [38]

#### 4.1.1.2 Máquinas de polimento

As máquinas de polimento destinadas a polir determinada amostra. Este tipo de máquina tem duas funções: 1) o desbaste da amostra através de um disco onde são colocadas determinadas lixas com o objetivo de atingir o ponto de análise; 2) a função de polimento, trocando para o prato de polimento, onde este é realizado com a utilização de um pano (têxtil) e de uma pasta ou spray abrasivo.

A máquina de polimento utilizada, modelo Saphir 550, da marca ATM (Figura 19), e apresenta as seguintes características e vantagens:

- Corte automático da água e enxaguamento da bacia;
- Velocidade variável dos pratos (50 a 600 rpm);
- Anel de proteção contra respingos e tampa de proteção contra poeira;
- *Touchscreen* para operação simples e possibilidades de guardar programas;
- Pressão de contato única e central selecionável.



Figura 19 – Máquina de polimento Saphir 550 da ATM

A máquina de desbaste e polimento usada, modelo Rotopol 21, da marca Struers (Figura 20) apresenta as seguintes propriedades:

- Cabeça de lixar / polir RotoForce-4;
- Lubrificador por gotejamento Lupo;
- Velocidade de 150 rpm ou 300 rpm;
- Discos de polimento ( $\varnothing$ ): 25 cm;
- Lixamento/polimento automático ou manual;
- Força aplicável de 5 a 400 N.



Figura 20 – Máquina de desbaste e polimento Rotopol da Struers

#### 4.1.1.3 Microscópio óticos

Os equipamentos óticos de análise possuem regra geral uma pequena profundidade de campo, permitindo apenas a observação de superfícies perfeitamente planas e polidas. Desta forma, a preparação de amostras assume-se de extrema importância na qualidade de uma análise.

Utilizou-se um microscópio digital Inspex HD da Ash (Figura 21) que possui as seguintes características e vantagens:

- Inspeção precisa e detalhada com faixa dinâmica de níveis de ampliação e iluminação LED integrada;
- Design versátil compatível com uma ampla gama de opções de montagem. O dimensionamento em tempo real no ecrã é fornecido por grades e cursores XY integrados;
- Possibilidade de atribuição de cotas das amostras analisadas (cravações)

- Adequado para processos de reparação e retrabalho, controle de qualidade e diagnóstico de falhas numa ampla gama de indústrias;
- Menor fadiga do operador e maior eficiência de produção devido ao design ergonómico que permite ao utilizador sentar-se ou ficar em pé, numa postura confortável e segura, aliviando as dores nas costas, pescoço e olhos, normalmente associados aos microscópios tradicionais.



Figura 21 – Microscópio digital ótico Inspex HD da marca “Ash”

O microscópio óptico usado, modelo Axiotech da marca ZEISS (Figura 22) tem as seguintes propriedades:

- Ocular;
- Objetivas de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x;
- Regulador da altura da mesa;
- Possibilidade de acoplamento de camera.



Figura 22 - Microscópio óptico Axiotech da ZEISS

## **4.2 Instrução de Trabalho genérica nas instalações da Continental**

Nesta secção é feita uma instrução de trabalho genérica acerca do procedimento integral realizado durante o estágio nas instalações da Continental. Este processo é composto pelas 5 fases seguintes:

- Corte
- Preparação das amostras
- Desbaste
- Polimento
- Análise microscópica

### **4.2.1 Corte**

Inicialmente os cortes são feitos de acordo com as dimensões dos moldes (Figura 23), onde serão inseridas as amostras. Posteriormente é adicionada a resina para montagem da amostra. As amostras não podem ter dimensões que ultrapassem os 20 mm de altura e os 25 mm de diâmetro.



Figura 23 – Molde da marca Struers

Os cortes foram realizados com o auxílio da máquina de corte com serra de fita nas instalações da Continental descrita no ponto 4.1.1.1.

#### 4.2.2 Preparação das amostras

Depois de efetuados os cortes, posicionaram-se as amostras no centro dos moldes utilizando cliques para suporte, de modo a atingir a altura desejada no molde (Figura 24), perto do operador, para posteriormente facilitar o enchimento com a resina.



Figura 24 – Amostras posicionados no centro dos moldes

A preparação da resina consiste na dosagem de dois tipos de produtos da marca Struers, ClaroCit Powder e ClaroCit Liquid. Para iniciar a dosagem necessita-se de dois moldes, duas colheres, ClaroCit Powder e ClaroCit Liquid da marca Struers e um *stick* de madeira (Figura 25). Depois de termos este material á nossa disposição realizamos a dosagem por volume, em que as proporções indicadas pelo fabricante são 5 colheres de pó e 2 colheres de líquido (enchimento de 3 moldes).



Figura 25 – Material necessário para realizar a mistura da resina

Posteriormente, adicionamos o pó no líquido e durante 90 segundos mexe-se de forma lenta e constante em ambos os sentidos de rotação, de forma a obter uma mistura homogênea e evitar a formação de bolhas de ar. Após o término da mistura (imediatamente), deve encher-se os moldes cuidadosamente e de forma constante (Figura 26), para permitir a distribuição da mistura sobre as amostras previamente colocadas nos moldes.

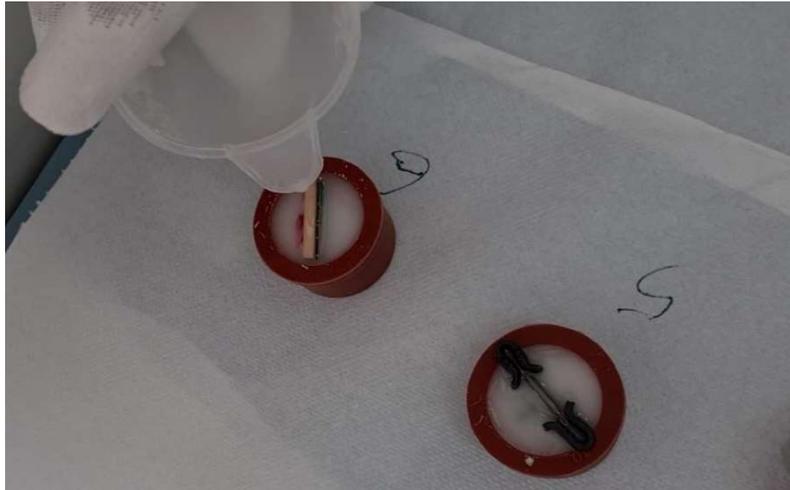


Figura 26 – Enchimento dos moldes

Para finalizar são deixados repousar no mínimo 20 minutos para garantir a dureza necessária (Figura 27), e posteriormente as amostras montadas são retiradas dos moldes de borracha, para iniciar o processo de desbaste abrasivo.



Figura 27 – Repouso das amostras

#### 4.2.3 Desbaste

Antes de iniciar o processo de desbaste abrasivo, realiza-se a preparação do equipamento, começa-se por ligar máquina de desbaste e polimento, abrir a água e verificar se a mangueira do ar comprimido e do saneamento estão acopladas á mesma. Posteriormente,

necessário pré-selecionar uma carga inicial de 5 N e 600 rpm e o devido tempo (Figura 28). Coloca-se a lixa mais abrasiva (P240) no prato de suporte (Figura 28), humedecendo com água ambas as partes para facilitar a sua fixação e coloca-se a proteção lateral. Em seguida desce-se o suporte sem tocar no disco abrasivo (aproximadamente a 5 mm do disco).



Figura 28 – Preparação da máquina de desbaste abrasivo

Após efetuada a preparação do equipamento, pode iniciar-se o desbaste abrasivo, colocando as amostras no suporte, abrindo a torneira com o caudal necessário para lubrificar a lixa e ligar a máquina no botão start (Figura 29). O processo é iniciado com uma carga aplicada de 5 N e ao longo do desbaste aumenta gradualmente até 15 N, monitorizando e interrompendo o processo as vezes necessárias, antes de atingir o ponto pretendido para análise.



Figura 29 – Iniciação do desbaste abrasivo

Quando a zona desbastada estiver perto do ponto de análise, prossegue-se o desbaste com a lixa mais fina (P2500), para eliminar os traços abrasivos efetuados pela lixa mais abrasiva, até ao ponto pretendido de análise (sensivelmente no ponto intermedio da junta soldada), interrompendo o processo sempre que necessário para garantir a qualidade da amostra.

#### 4.2.4 Polimento

O polimento é executado após o processo de desbaste. É necessário alterar o prato de desbaste pelo prato de polimento, onde é colocado o pano Polishing Coths OMEGA S (300 mm) da ATM (Figura 30). Após a troca efetuada limpa-se as amostras com água, desce-se o suporte metálico sem tocar no disco de polimento (cerca de 5mm), e volta a colocar-se as amostras no suporte metálico.

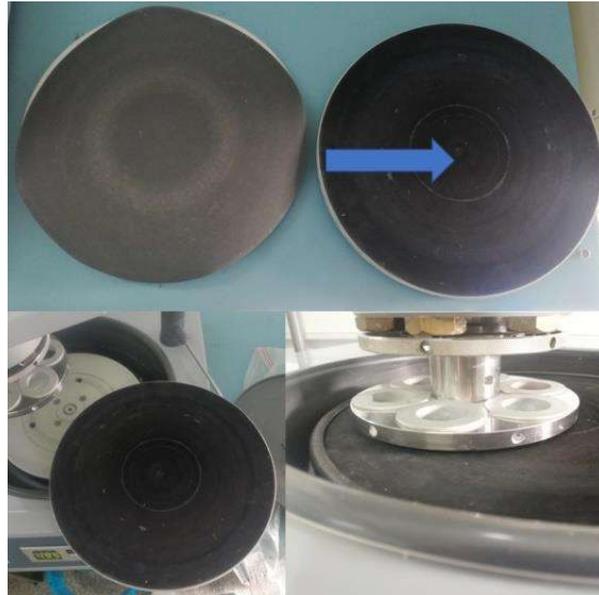


Figura 30 – Alteração do prato de desbaste pelo prato de polimento

Assim sendo, é pré-selecionada uma carga de 5 N, uma velocidade de 50 rpm (Figura 10). Ao longo do processo é adicionada a MasterPrep Polishing Suspension Alumina de 0,05  $\mu\text{m}$ , da marca Buehler, com o auxílio de um conta gotas, como se pode observar na Figura 31, e a carga é aumentada até 10 N ao longo de 20 minutos, para obter uma amostra polida e pronta para análise.



Figura 31 – Pré-seleção dos dados para o polimento (esquerda) e produto MasterPrep Polishing Suspension (direita)

### 4.3 Instrução de Trabalho genérica nas instalações da UTAD

No que respeita a realização da instrução de trabalho genérica do procedimento realizado na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, nomeadamente no laboratório de Materiais, resultou num procedimento composto por 5 etapas:

- Corte
- Preparação das amostras
- Desbaste
- Polimento
- Análise microscópica

#### 4.3.1 Corte

Os cortes realizados neste processo foram realizados pela máquina de cortes metalográficos com o modelo ISOMET 5000 da marca “*Buehler*” no Laboratório de Materiais da UTAD, descrita no ponto 4.1.1.1.

Para efetuar os cortes nas amostras, estas devem ser colocadas no centro do apoio de fixação e posicionadas de acordo com a lamina no sítio a efetuar o corte (Figura 32).

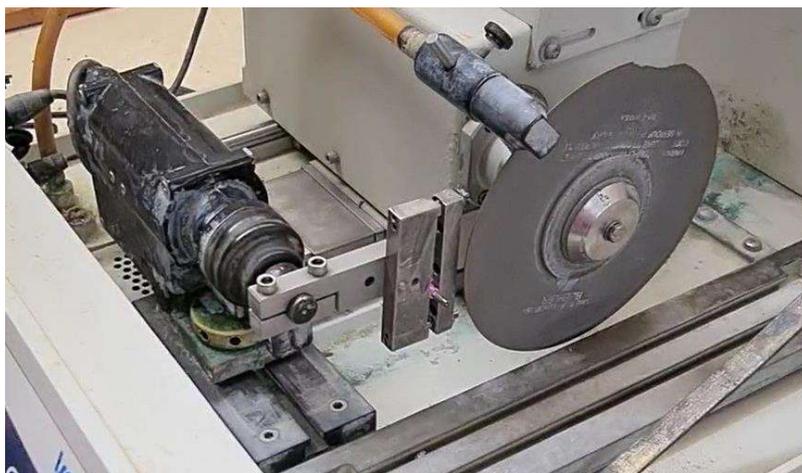


Figura 32 – Amostra posicionada para iniciar corte

Posteriormente deve-se ligar a refrigeração e acionar a lubrificação e a rotação do disco de carboneto de tungstênio e selecionar em modo manual ou em modo automático.

As dimensões da amostra não necessitam de ter tamanhos fixos devido ao processo de desbaste ser feito manualmente.

### 4.3.2 Preparação das amostras

Posteriormente aos cortes efetuados, procede-se a montagem da amostra. As amostras são envolvidas sobre uma massa adesiva da marca Pattex (Figura 33) de endurecimento rápido.



Figura 33 – Massa adesiva “Pattex”

A preparação da massa consiste no amassamento durante um minuto, até adquirir uma cor branca, depois envolve-se a amostra a analisar e espera-se 5 minutos para que ocorra o endurecimento.

O molde vai ser colocado numa prensa para garantir a uniformidade da superfície a analisar, para posteriormente se poder iniciar o processo de desbaste (Figura 34).

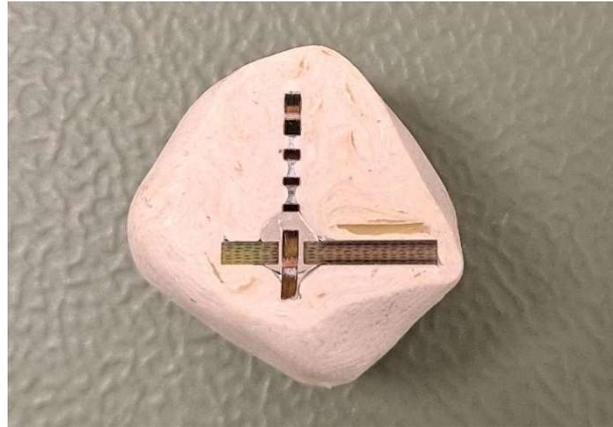


Figura 34 – Amostra pronta para iniciar o desbaste

### 4.3.3 Desbaste

O desbaste é realizado com recurso a máquina ROTOPOL da marca “Struers” descrita no ponto 4.1.1.1. Antes de iniciar o processo de desbaste abrasivo, realiza-se a preparação do equipamento, começa-se por ligar máquina de desbaste e polimento, abrir a água e verifica-se a mangueira de esgoto/descarga está acoplada á mesma.

Posteriormente processo é iniciado com uma lixa de carboneto de silício de granulometria P240, passando de seguida para as lixas de P400, P800, P1200 até P2500, com um intervalo de 2 minutos em cada mudança de lixa, a uma velocidade de 300 rpm, aplicando uma carga moderada. Este desbaste é feito inteiramente de forma manual (Figura 35) e requer uma atenção redobrada para atingir o ponto de análise e manter a uniformidade da amostra, ou seja, é necessária constante monitorização da amostra. Feito isto, as amostras estão prontas para iniciar a etapa do polimento.



Figura 35 - Desbaste

#### 4.3.4 Polimento

O processo de polimento, é executado no prato do lado direito da máquina Rotopol (Figura 35), onde está colocado o pano MicroCloth PSA (254 mm) da Buehler.

A operação consiste em humedecer ligeiramente o pano com álcool e adicionar *spray* de alumina MicroPolish II de 1 $\mu$ m da Buehler, e aplicando manualmente uma carga moderada na amostra em contacto com o pano, rodando a amostra em sentido inverso a rotação do disco, durante cerca de 5 minutos.

#### 4.4 Estudo das camadas intermetálicas

Para realizar o estudo da formação das camadas intermetálicas é necessário efetuar um ataque químico para salientar microestrutura da amostra e verificar a existência ou não das camadas intermetálicas.

O reagente químico Adler foi utilizado, após consulta bibliográfica, para efetuar o ataque devido a este realçar os cordões de soldadura. Este é composto por 3g de Cloreto de Cobre II amoniacal, 20 ml de água destilada, 15g de Cloreto de Ferro III e 50 ml de ácido clorídrico concentrado [42].

O objetivo da realização do ataque químico é observar as microestruturas e efetuar a comparação entre uma solda OK (boa), Figura 36 a), e uma solda NOK (má), Figura 36 b), ambas do mesmo processo de soldadura.

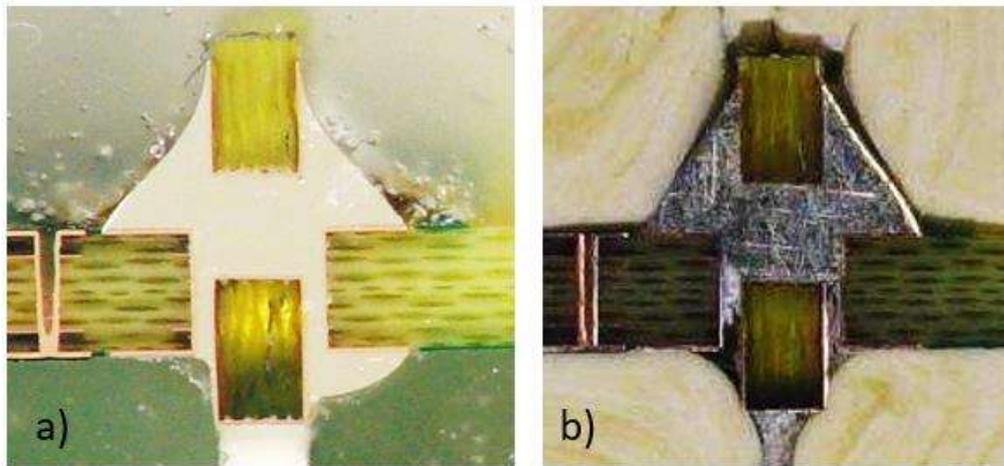


Figura 36 – Soldas a analisar: a) Solda OK; b) Solda NOK

O procedimento do ataque químico consistiu na imersão da superfície das amostras no reagente durante cerca de 10 segundos, até ser visível a oxidação da solda, e imediatamente limpar a amostra com água para eliminar o ácido corrosivo. Esta operação requer o uso de luvas e máscara de proteção. Posteriormente foram observadas as estruturas no microscópio ótico e microscópio eletrónico de varrimento (SEM/EDS) e obtidas as fotomicrografias.

#### 4.4.1 Microscópio Ótico

A microscopia ótica, a mais tradicional de todas, continua sendo uma técnica robusta para o estudo da microestrutura dos materiais. Oferece resolução da ordem dos micron, à qual vulgarmente se associa a um aumento de 1000 vezes, com profundidade de campo semelhante. Em comparação com outros microscópios modernamente disponíveis, o microscópio ótico

(MO) tem facilidade de operação e custo modesto, que fazem com que seja o instrumento básico em qualquer laboratório de microscopia.

#### **4.4.2 Microscópio eletrônico de varrimento (SEM) / Espectroscopia de dispersão de energias (EDS)**

Nesta técnica a área da amostra a ser observada é varrida por um feixe de elétrons formando a imagem. De todos os sinais para formar a imagem, destacam-se os elétrons secundários (informação topográfica) e os elétrons retrodifundidos (informação morfológica). A análise através de SEM permite a avaliação da morfologia, ou seja, obtenção de imagens de superfícies polidas ou rugosas, com grande profundidade de campo e alta resolução, consequentemente a fácil interpretação das imagens, com aparência tridimensional.

Por outro lado, a análise por EDS, é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes numa amostra (análise qualitativa), assim como determinar a quantidade de cada elemento (análise semi-quantitativa). Consiste na excitação dos átomos da amostra, através da incidência de um feixe de elétrons. Esta excitação causa posteriormente a libertação de energia pelos elétrons, na gama dos raios-X, permitindo assim a identificação e correspondente quantificação dos elementos, uma vez que a libertação de energia depende essencialmente da estrutura atômica única presente de cada elemento [43].



# CAPÍTULO 5

---

ANÁLISE E RESULTADOS



## 5 Análise e Resultados

O presente capítulo diz respeito á análise e discussão dos resultados do presente trabalho. Deste modo, apresentar-se-ão as análises e comparações dos dois procedimentos utilizados e posteriormente a análise microscópica de algumas amostras.

### 5.1 Análise das vantagens/desvantagens das máquinas de corte

Nesta secção será feita a comparação entre as duas máquinas de corte utilizadas durante os diferentes processos, como se pode verificar na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre as máquinas de corte, utilizando uma escala de 0 a 5

	Efetividade	Viabilidade	Impacto no problema	Segurança	Custo de Implementação	Resultado
Máquina de serra de fita	2	1	3	1	0	7
Máquina de corte de precisão	4	5	4	5	4	14

### 5.2 Comparação dos dois diferentes tipos de resinas de montagem

Este ponto vai incidir sobre a comparação do método de preparação das amostras realizadas nas instalações da Continental e da UTAD. Num dos métodos foi utilizada a resina e no outro, utilizou-se a massa adesiva. Na tabela 5 apresenta as diferentes vantagens e desvantagens de cada método utilizado.

Tabela 5 – Propriedades das montagens obtidas

	ClaroCit kit Struers	Massa adesiva Pattex
<b>Dureza</b>	Muito Boa	Boa
<b>Transparência</b>	Muito boa após o polimento	Inexistente
<b>Aspetto/Forma</b>	Homogêneo e circular	Deformado e turbo
<b>Tempo de cura</b>	20 minutos	5 minutos
<b>Maleabilidade</b>	Nula	Bastante maleável
<b>Tempo de preparação</b>	5 minutos	1 minuto
<b>Dosagem</b>	5 colheres de pó e 2 colheres de líquido (3/4 amostras)	Dependente do tamanho da amostra analisar
<b>Recipiente de moldagem</b>	Copo	Não é necessário
<b>Dimensões das amostras</b>	20 mm de altura e 25 mm de largura	Variável

Para melhor compreensão das diferentes propriedades, é possível visualizar na Figura 37, os aspectos visuais dos dois distintos métodos utilizados.

Como podemos constatar estes diferentes tipos de métodos têm a suas vantagens e desvantagens, como estão enumeradas anteriormente, ou seja, o uso da resina ClaroCit kit da Struers tem a vantagem da sua apresentação, mas requer mais tempo na sua preparação. O uso da massa adesiva Pattex tem a vantagem de ser utilizada para uma situação mais crítica e de análise imediata necessária.

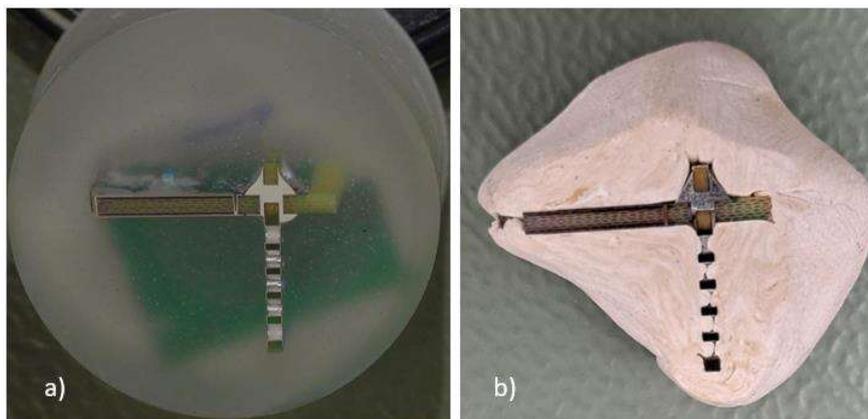


Figura 37 – Preparação das amostras: a) Método utilizado na Continental; b) Método utilizado na UTAD

### 5.3 Análise das vantagens/desvantagens das máquinas de desbaste/polimento

Na tabela 6 apresentam as vantagens e desvantagens associadas ao uso das máquinas de desbaste/polimento durante os dois processos realizados.

Tabela 6 – Comparação das máquinas de desbaste/polimento

	Saphir 550 da ATM	Rotopol 21 da Struers
<b>Tipo de menu</b>	Digital e analógico	Analógico
<b>Velocidade</b>	50 a 600 rpms	150 ou 300 rpms
<b>Programas</b>	Possibilidade de criar	Sem memória
<b>Desbaste/polimento</b>	Automático	Manual
<b>Tipo de prato</b>	Desbaste ou polimento	Desbaste e polimento
<b>Refrigeração</b>	Água	Água
<b>Tempo selecionável</b>	0.1 a 99.9 minutos	Não utilizado
<b>Amostras finais</b>	Traços abrasivos leves	Traços abrasivos acentuados derivados do desbaste/polimento manual

Para uma comparação mais detalhada pode-se verificar que o desbaste/polimento executado de forma automática tem melhores condições de atingir o ponto de análise, visto que as amostras estão sempre ao mesmo nível e com carga constante aplicada sobre a lixa ou pano.

Em modo manual o processo é mais complexo visto que a carga aplicada na amostra é variável, e a superfície em contato com a lixa varia, verificando-se zonas onde a amostra está mais e menos desbastada, concluindo-se a não uniformidade da amostra (Figura 38).

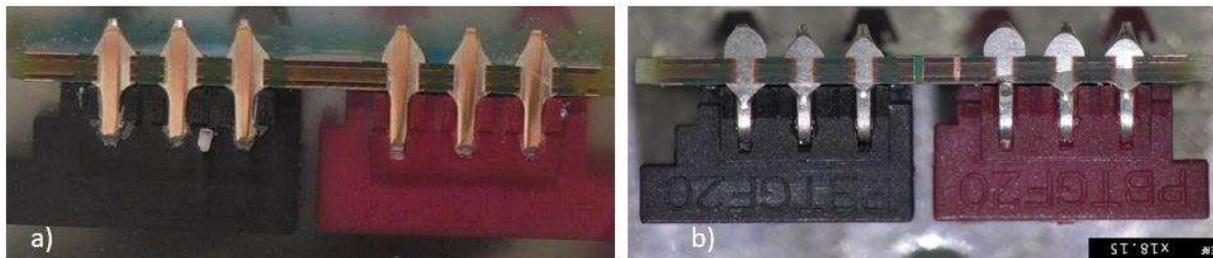


Figura 38 – Desbaste/Polimento: a) Automático; b) Manual

#### 5.4 Análise microscópica

A análise microscópica concentra-se na observação das microestruturas existentes em determinada amostra depois de efetuado o ataque químico e com auxílio de um microscópio ótico, onde se analisam as amostras de acordo com determinadas Normas do IPC [13]. O estudo realizado na empresa incidiu sobre as soldas nos PCBs verticais, MQS e cabos, e ainda sobre cravações em cabos (Figura 39).

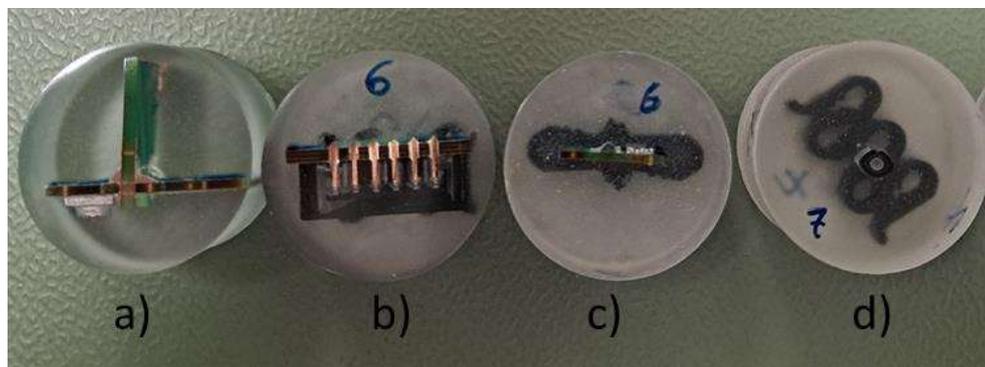


Figura 39 – Exemplos de estudo das soldas ou cravações: a) soldas em PCBs verticais; b) soldas em MQS; c) soldas em cabos; d) cravações em cabos

### 5.4.1 Análise microscópica das soldas em PCBs verticais

Esta análise foi feita de acordo com as normas do IPC-A-610, da página 7-56 do capítulo 7.3.5.2.12 (*Supported Holes – Board in Board*) na tabela 7-5 (*Board in Board – Minimum Solder Conditions*) e tem de respeitar os seguintes parâmetros:

Tabela 7 – Critérios mínimos de aceitação de PCBs verticais [adaptado de 13]

Critério	Classe 2
<b>Preenchimento vertical de solda</b> <b>Nota: Os 25% de altura não preenchida inclui ambos os lados de fonte da solda e destino da solda</b>	75%
<b>Molhamento do pad da placa "filha" no lado destino da solda à largura da ligação de solda do PCBA (placa "mãe")</b>	75%
<b>Percentagem da área do pad do PCBA (placa "mãe") coberta com molhamento de solda no lado destino da solda</b>	0%
<b>Largura do molhamento e preenchimento da ligação de solda no lado fonte da solda do PCBA aos pads, de ambos os lados da placa "filha"</b>	75%
<b>Percentagem da área do pad do PCBA (placa "mãe") coberta com molhamento de solda no lado fonte da solda</b>	75%

A junta soldada dos PCBs verticais que foi avaliada de acordo com o IPC-A-610, está representada no corte A-A da Figura 40.

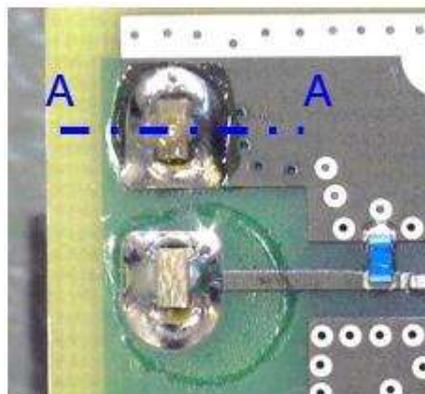


Figura 40 – Junta soldada em PCBs verticais

A junta de soldadura da Figura 41 é aceitável, respeitando os critérios mínimos enumerados na tabela 7. Apresentando-se com:

- Preenchimento vertical de solda superior a 75%
- Molhamento do pad da placa “filha” no lado destino da solda à largura da ligação de solda do PCBA (placa “mãe”) superior a 75%
- Largura do molhamento e preenchimento da ligação de solda no lado fonte da solda do PCBA aos pads, de ambos os lados da placa “filha” superior a 75%
- Percentagem da área do pad do PCBA (placa "mãe") coberta com molhamento de solda no lado fonte da solda superior a 75%

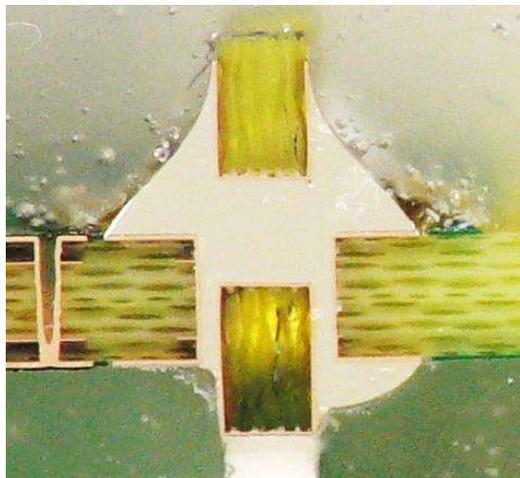


Figura 41 – Junta soldada em PCBs verticais aceitável

A junta soldada representada na Figura 42 não é aceitável visto que não respeita os critérios mínimos requeridos no IPC-A-610. A causa de reprovação desta solda:

- Preenchimento vertical de solda inferior a 75%
- Molhamento do pad da placa “filha” no lado destino da solda à largura da ligação de solda do PCBA (placa “mãe”) inferior a 75%

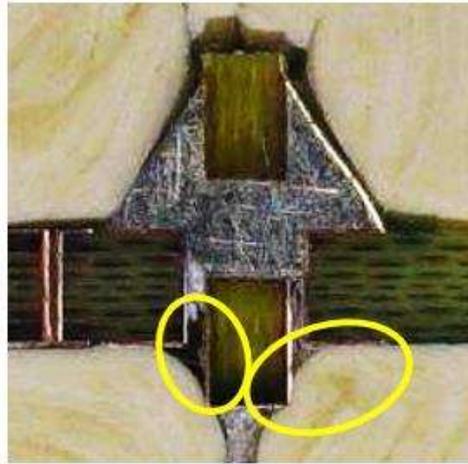


Figura 42 – Junta de soldadura em PCBs verticais com defeitos (amarelo)

#### 5.4.2 Análise microscópica das soldas em componentes *Through Hole*

A análise é realizada de acordo com o IPC-A-610 na página 7-42, respeitando os seguintes critérios expostos na tabela 8 [13].

Tabela 8 – Critérios mínimos de aceitação de componentes *Through Hole* [adaptado de 13]

Critério	Classe 3
<b>Enchimento vertical</b>	75%
<b>Molhabilidade circunferencial da solda no <i>pad</i> no lado destino</b>	270°
<b>Percentagem da área <i>pad</i> original coberta com solda molhável no lado destino da solda</b>	0
<b>Molhabilidade circunferencial da solda no <i>pad</i> no lado fonte</b>	330°
<b>Percentagem da área do <i>pad</i> com solda molhável no lado fonte da solda</b>	75%

A junta de soldadura dos componentes *Through Hole* que foi avaliada de acordo com o IPC-A-610, está representada no corte B-B da Figura 43.

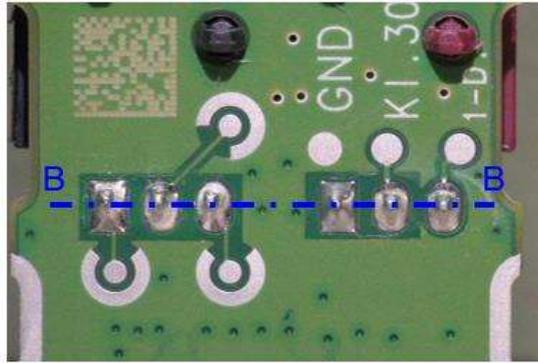


Figura 43 – Junta de soldadura em componentes *Through Hole*

A junta soldada representada na Figura 44 é aceitável, porque cumpre os requisitos mínimos de aceitação referidos na tabela 8. Aceitação desta solda baseia-se nos seguintes parâmetros:

- Preenchimento vertical de solda superior a 75%
- Molhabilidade circunferencial da solda no pad no lado destino superior a 270°
- Molhabilidade circunferencial da solda no pad no lado fonte superior a 330°
- Percentagem da área do pad com solda molhável no lado fonte da solda superior a 75%

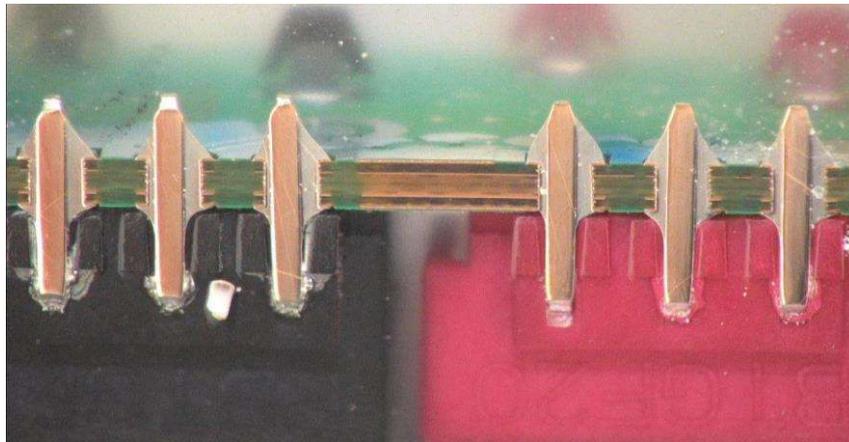


Figura 44 – Junta soldada de componentes *Through Hole* aceitável

Na Figura 45 apresenta-se uma solda de componentes *Throug Hole* com defeitos, devido ao não cumprimento dos critérios mínimos de aceitação, tais como:

- Preenchimento vertical de solda inferior a 75% (4 pino da MQS)
- Molhabilidade circunferencial da solda no pad no lado destino inferior a 270° (4 pino da MQS)

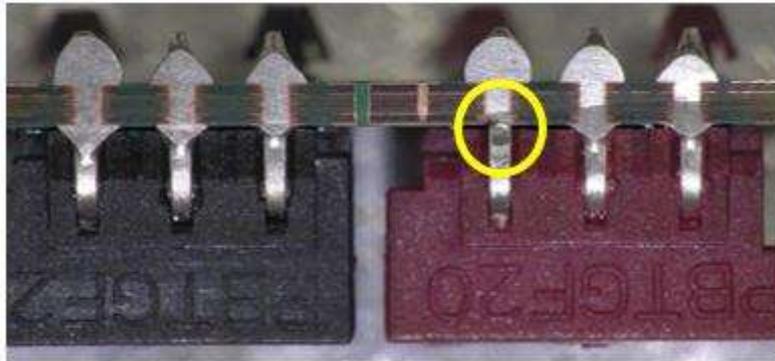


Figura 45 – Junta de soldadura de componente *Through Hole* com defeitos

### 5.4.3 Análise microscópica das soldas em cabos

Os parâmetros de análise para avaliar as soldaduras em cabos é feita de acordo com o IPC-A-610 na página 5-1, em que se rege pelo ângulo de molhabilidade da solda (Figura 46), não podendo exceder os 90°, havendo algumas exceções.

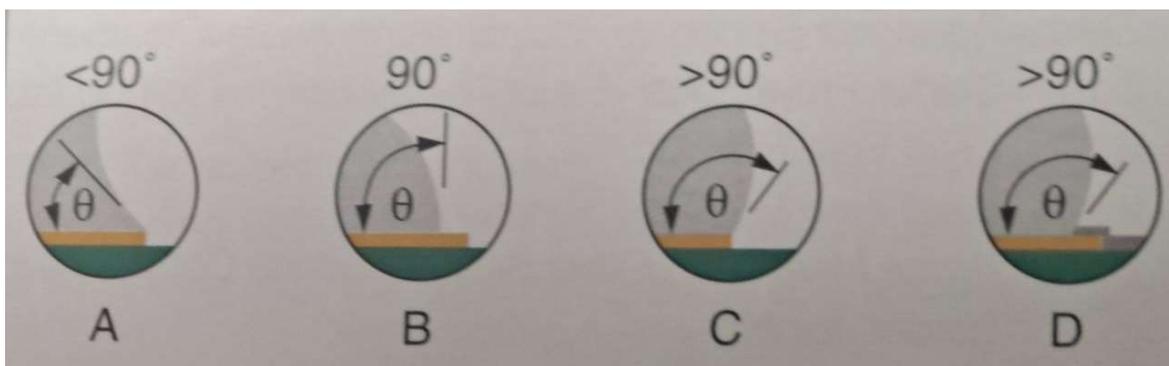


Figura 46 – Critérios mínimos de aceitação: A e B – ângulo de molhamento da junta soldada não ultrapassar 90°; C e D – casos de exceção que ultrapassam o ângulo de 90° [13]

A junta soldada em análise está representada pelo corte C-C na Figura 47, em conformidade com o IPC-A-610.

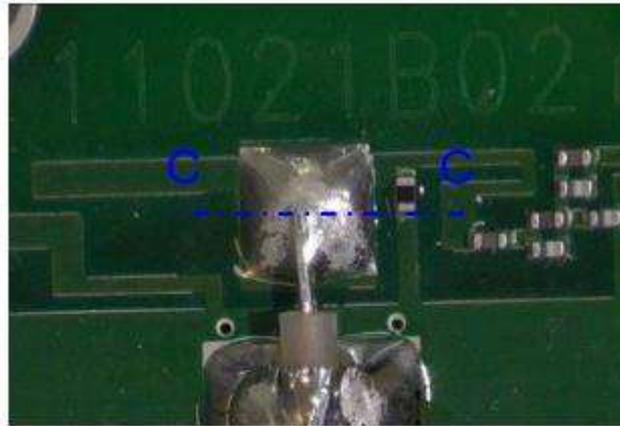


Figura 47 – Junta de soldadura em cabos

Na Figura 48 apresenta-se a junta de soldadura aceitável, respeitando os critérios mínimos de aceitação do IPC-A-610. A solda apresenta os seguintes critérios:

- Ângulo de molhamento da junta soldada não ultrapassa  $90^\circ$
- Dialético em bom estado, sem esmagamento e/ou deformação

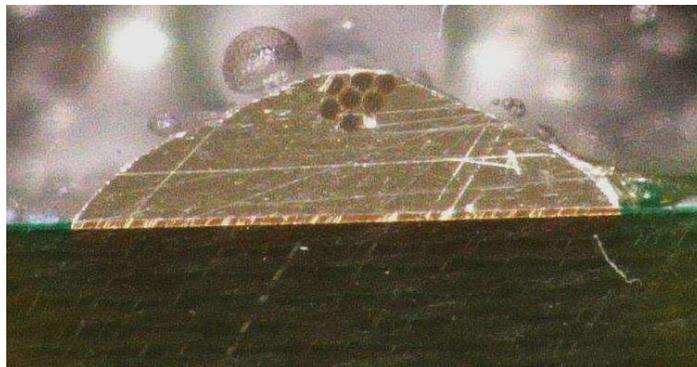


Figura 48 – Junta soldada em cabos aceitável

#### 5.4.4 Análise microscópica das cravações em cabos

Esta avaliação é feita para observar se o dielético está em bom estado, se existem deformações ou esmagamentos resultantes do processo de cravação, que vão ou não comprometer a fiabilidade dos cabos. Para realizar esta análise é necessário ter acesso ao desenho técnico (Figura 49) das peças a serem analisadas.

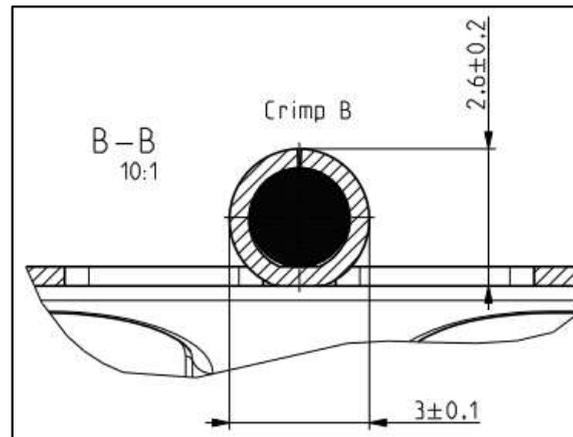


Figura 49 – Desenhos técnicos de uma cravação: tolerâncias do corte B-B

As duas cravações em estudo são as do corte D-D e E-E, como está exemplificado na Figura 50.



Figura 50 – Cravações em cabos

A cravação do corte D-D (Figura 51) é aceitável de acordo com o desenho técnico (Figura 49) e as condições visuais, tais como:

- Tolerâncias do desenho técnico respeitadas
- Cravação uniforme
- Dialético em bom estado, sem esmagamento e/ou deformação

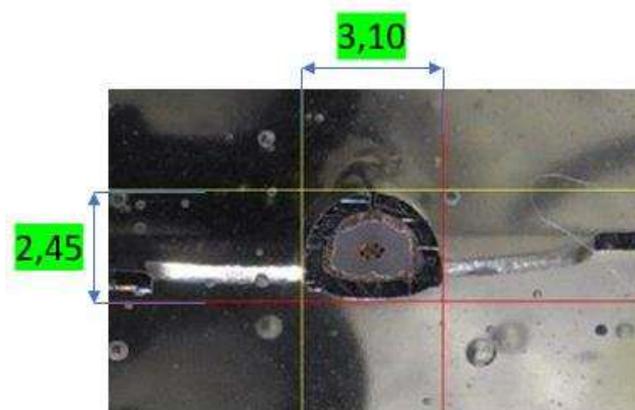


Figura 51 – Cravação em cabo aceitável

A cravação do corte E-E (Figura 52) de acordo com o desenho técnico (Figura 49) e as condições visuais apresenta os seguintes defeitos:

- Tolerâncias do desenho técnico desrespeitadas
- Dialético com esmagamento e deformação

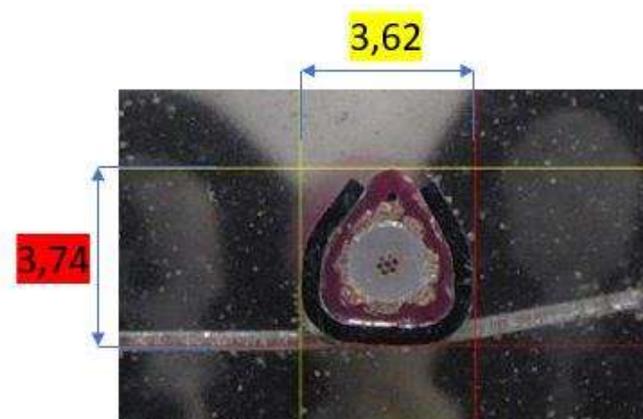


Figura 52 – Cravação em cabo com defeito

#### 5.4.5 Análise microscópica dos compostos intermetálicos

Os compostos intermetálicos são geralmente considerados *partes más* em juntas de soldadura, embora existam exceções, como já foi mencionado no ponto 2.5. A formação excessiva destes compostos nas juntas soldadas, significa a alteração da composição e do desempenho mecânico da mesma.

Camadas de compostos intermetálicos interfaciais podem ser um indicador da qualidade de solda. A formação de grandes plaquetas  $Ag_3Sn$  provoca a grave degradação das propriedades mecânicas da junta soldada [43].

##### 5.4.5.1 Identificação dos Compostos intermetálicos

A análise feita dos compostos intermetálicos incidu sobre as soldas em PCBs verticais, nomeadamente na comparação da formação dos IMCs numa amostra boa e má.

Este estudo foi realizado com recurso á microscópia ótica e microscópia eletrónica de varrimento (SEM/EDS).

##### 5.4.5.1.1 Microscópia Ótica

Após a realização do ataque químico e observação das microestruturas no microscópio ótico, a microestrutura obtida, nos dois casos em estudo, é característica deste tipo de ligas metálicas. Esta é formada por um constituinte dendrítico e um constituinte eutético de forma lamelar. Na Figura 53 são visíveis estes compostos.

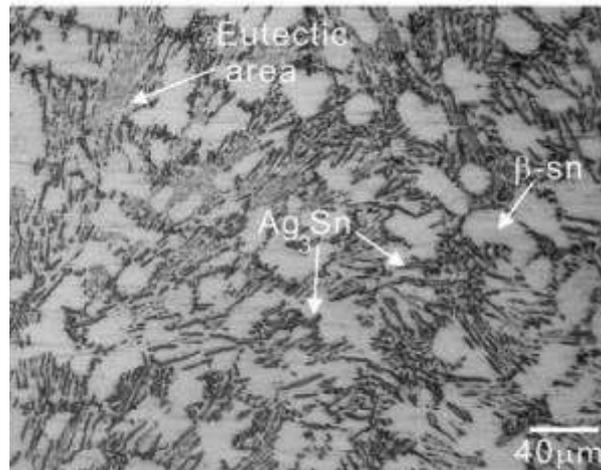


Figura 53 – Microestrutura da solda SAC 305 (2000x) [45]

Como se pode comprovar através das imagens (Figura 54) obtidas nas microestruturas observadas, tanto nas da solda boa como nas da solda má, existe a formação destes compostos intermetálicos.

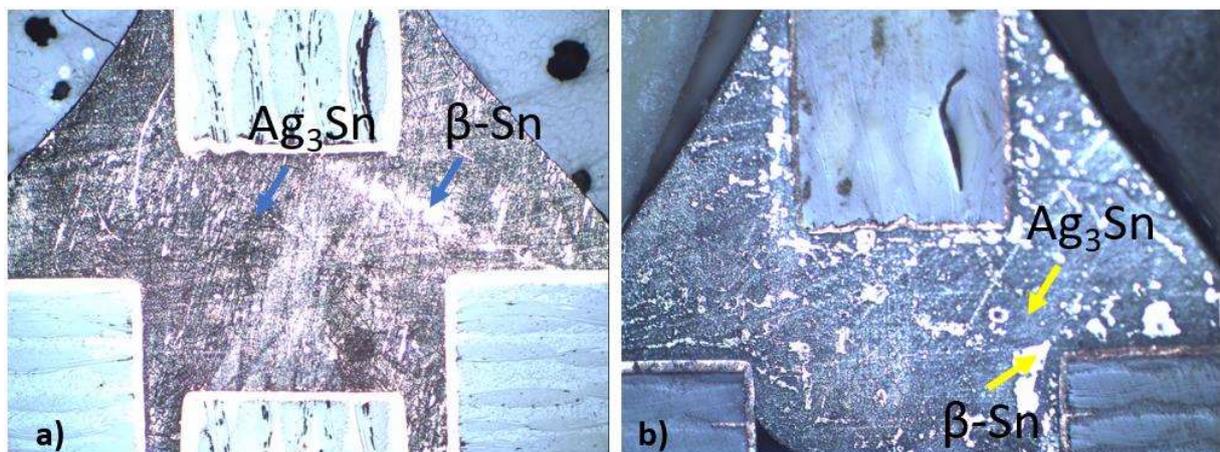


Figura 54 – Observação das microestruturas (50x): a) Solda boa; b) Solda má

Depois de identificar as camadas intermetálicas, realizou-se um estudo comparativo entre a solda má e boa, constatando-se as diferenças entre elas. Na solda má verificou-se a formação de grandes precipitações de IMCs de  $\beta$ -Sn junto ao cobre, enquanto na solda boa existem apenas

pequenas precipitações desse composto. Também se verificou a existência de grãos maiores dos compostos  $Ag_3Sn$  e  $\beta-Sn$  na solda má em relação á solda boa (Figura 55).

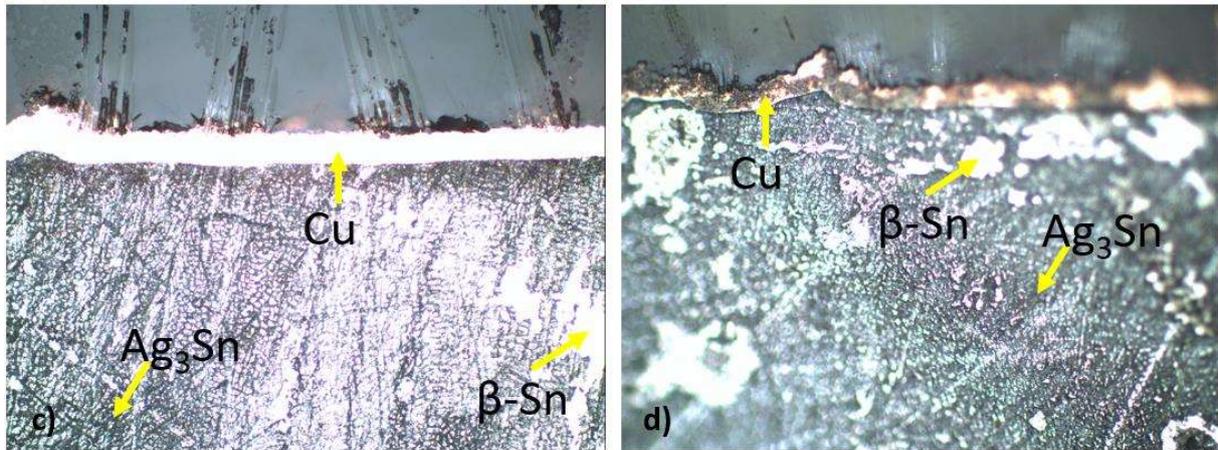


Figura 55 – Comparação das microestruturas (200x): c) Solda boa; d) Solda má

#### 5.4.5.1.2 Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM/EDS)

Para uma análise mais aprofundada e para comprovar as estruturas identificadas de acordo com o microscópio ótico, recorreu-se á análise com SEM e á técnica EDS. A análise efetuada incidiu sobre as mesmas amostras, uma boa e uma má.

Inicialmente foi realizada uma análise da amostra boa, no seguinte campo representado na figura 56.

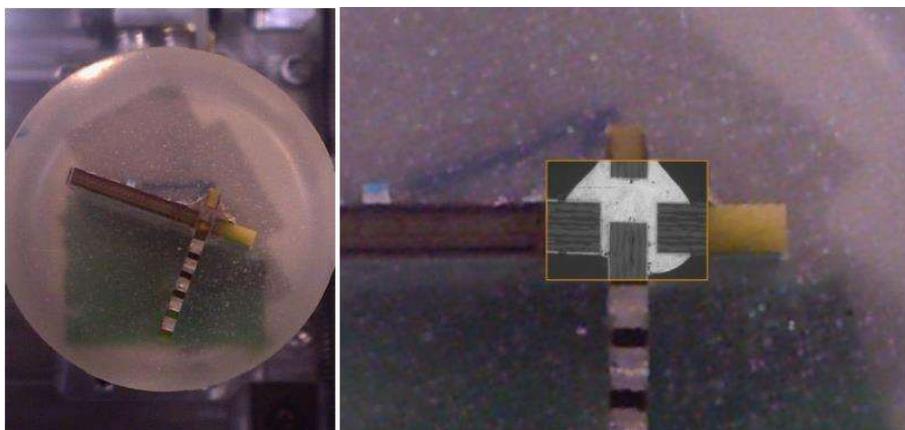


Figura 56 – Amostra boa (SEM/EDS)

Os pontos a serem analisados estão identificados na Figura 57.

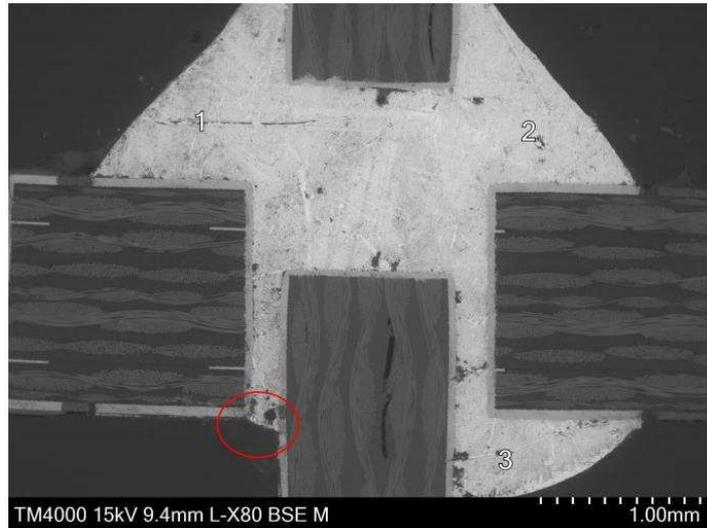


Figura 57 – Identificação dos pontos de análise: Amostra boa

No ponto 1 observa-se na sua maior parte aglomerados de Sn e Ag, em padrões mais regulares e o Cu mais disperso de acordo com a imagem obtida pelo SEM (Figura 58 e 59).

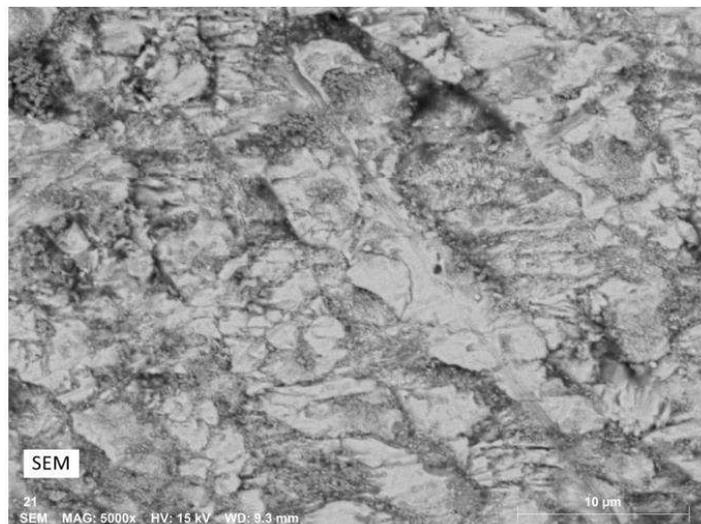


Figura 58 – Análise SEM: Ponto 1 (5000x)

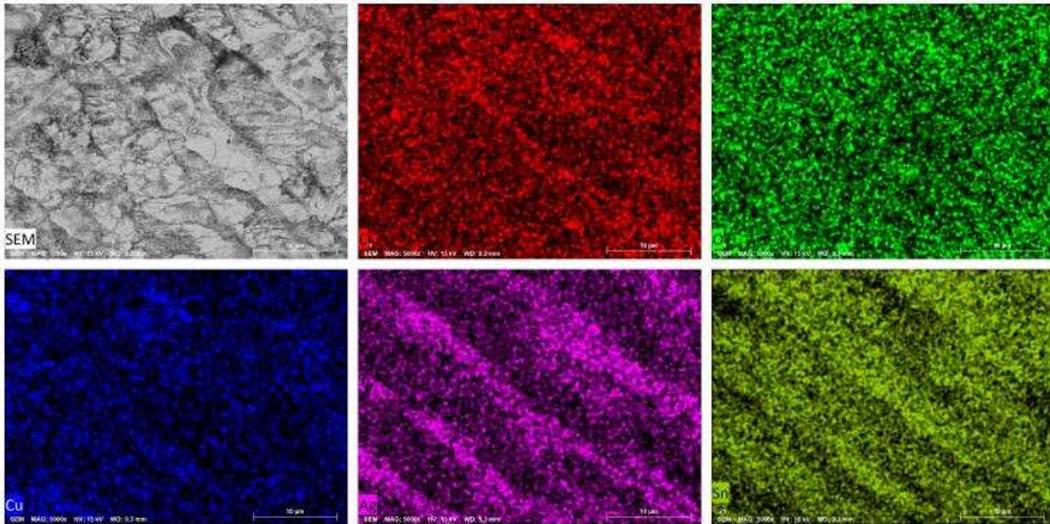


Figura 59 – Análise de imagem SEM: Ponto 1 (5000x)

De acordo com análise EDS, identificaram-se os elementos Ag, Cu e Sn confirmando o varrimento de imagem da figura 60. A existência de C e O, também identificados, podem ser explicadas por contaminações no manuseamento.

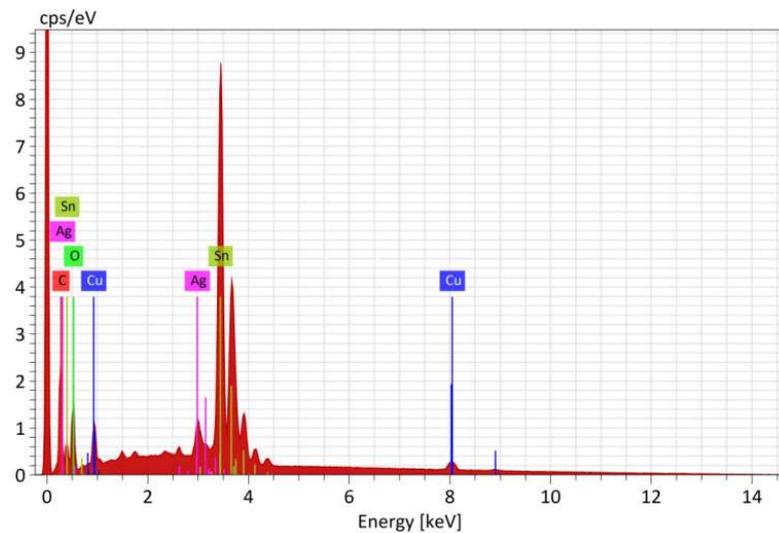


Figura 60 – Gráfico de análise EDS: ponto 1

No ponto 2, visualiza-se uma matriz muito semelhante ao ponto 1, como se pode verificar na Figura 61 e 62.

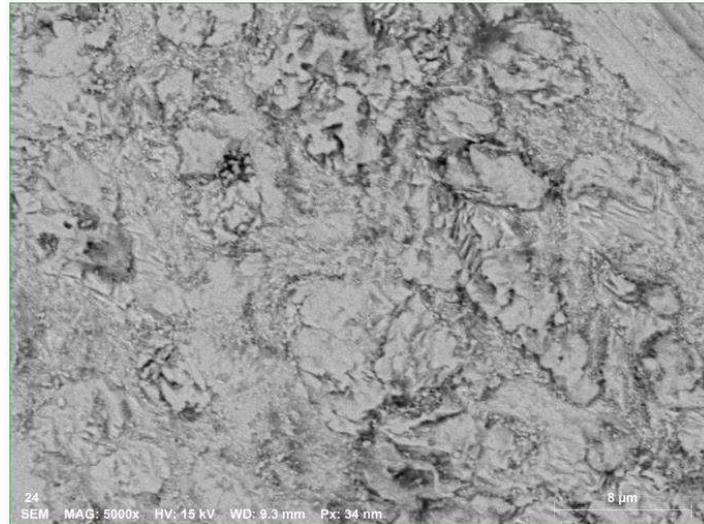


Figura 61 – Análise SEM: Ponto 2 (5000x)

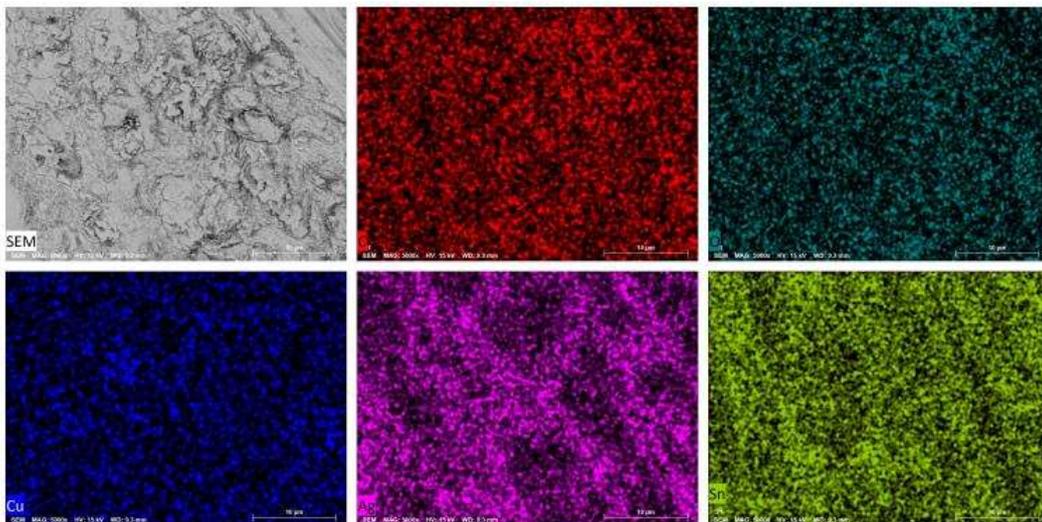


Figura 62 – Análise de imagem SEM: Ponto 2 (5000x)

De acordo com a análise do gráfico do EDS no ponto 2 exposto na Figura 63, constata-se presença dos mesmos elementos químicos.

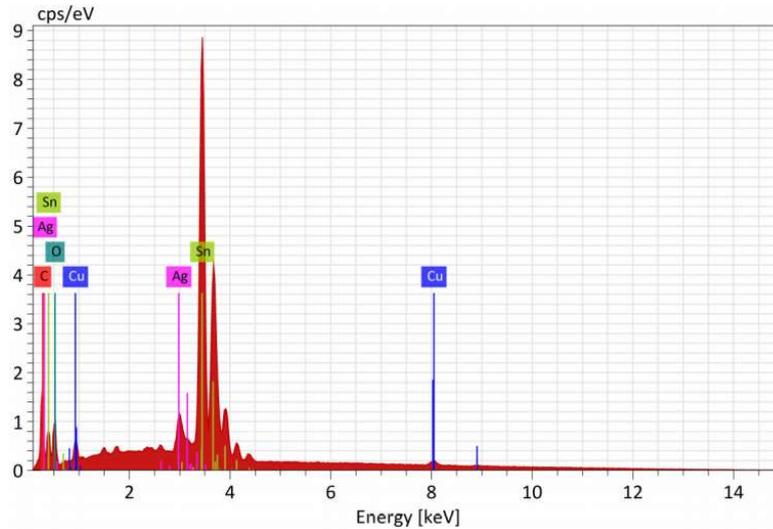


Figura 63 – Gráfico de análise EDS: ponto 2

A análise do SEM no ponto 3, comprova a uniformidade de distribuição dos elementos por toda a superfície, com alguma prevalência de contaminações de carbono mais acentuadas (Figura 64 e 65). A existência de Cl, provavelmente estará relacionada com o manuseamento das resinas de montagem.

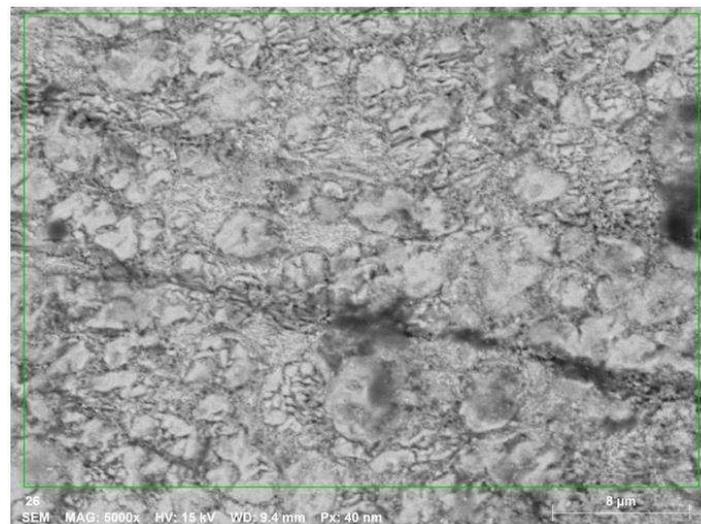


Figura 64 – Análise SEM: Ponto 3 (5000x)

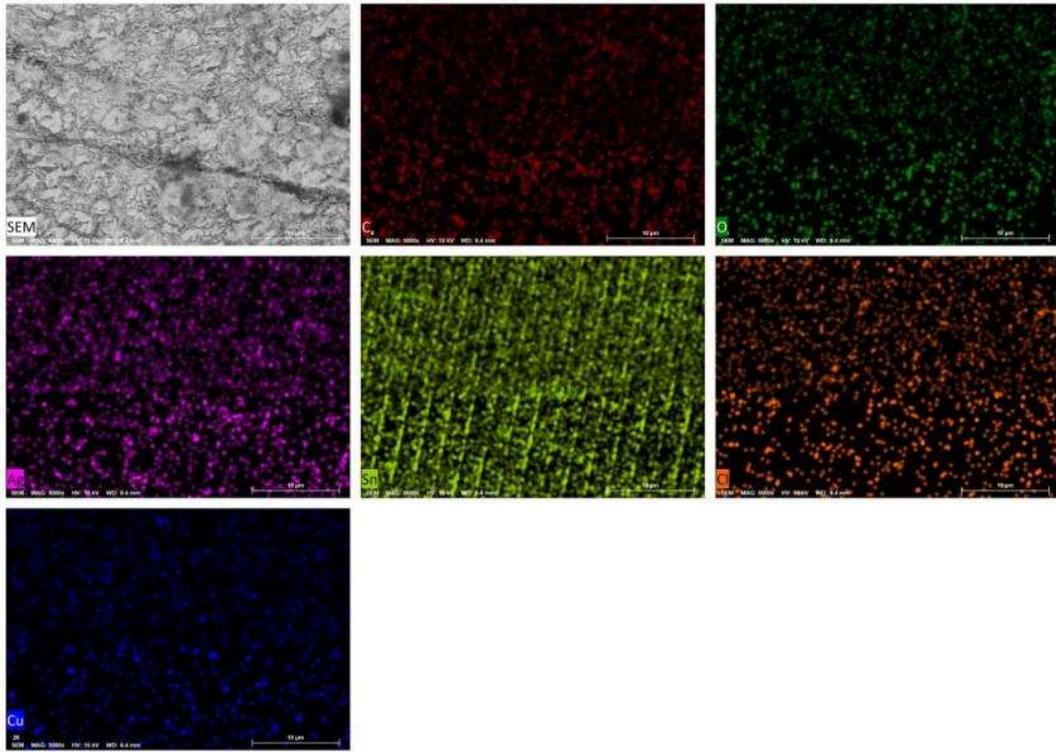


Figura 65 – Análise de imagem SEM: Ponto 3 (5000x)

Na análise do espectro EDS no ponto 3 (Figura 66), verifica-se o mesmo padrão de resultados, mas com o aparecimento do Cl.

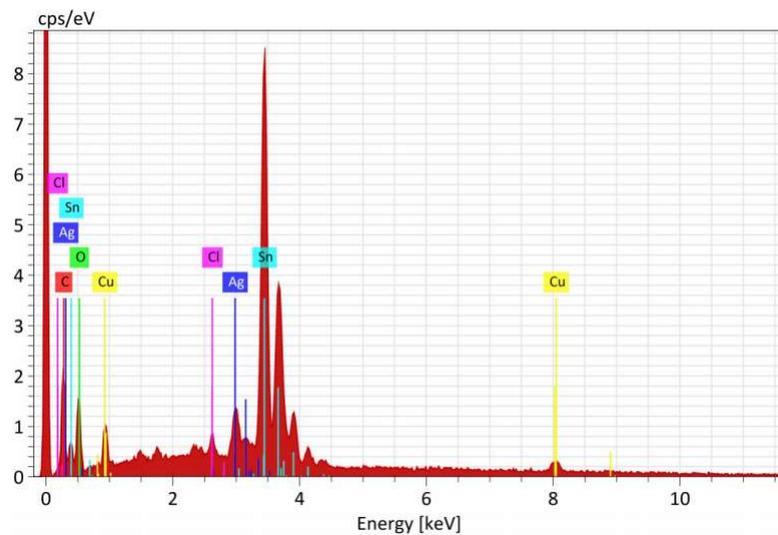


Figura 66 – Gráfico de análise EDS: ponto 3

Na zona indicada da Figura 67, onde não se consegue ver material aglomerante (solda) verificou-se a diferença entre composição elementar para perceber se seria outro material ou se seria resina, denominado pseudo ponto 4. De acordo com o espectro 3 conclui-se a existência, maioritariamente, de Sn.

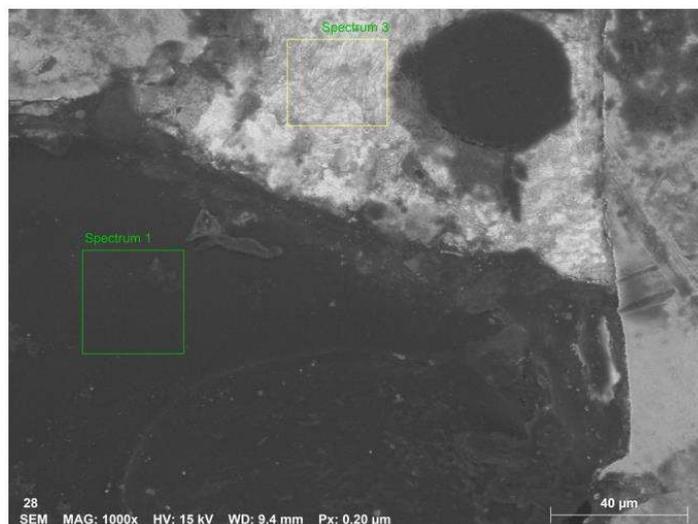


Figura 67 – Análise SEM: Pseudo ponto 4

De acordo com análise EDS (Figura 68), estão presentes os mesmos elementos identificados para os pontos anteriores, com maior incidência de Sn e ainda de Cl e Al (provavelmente do spray de alumina utilizado no polimento).

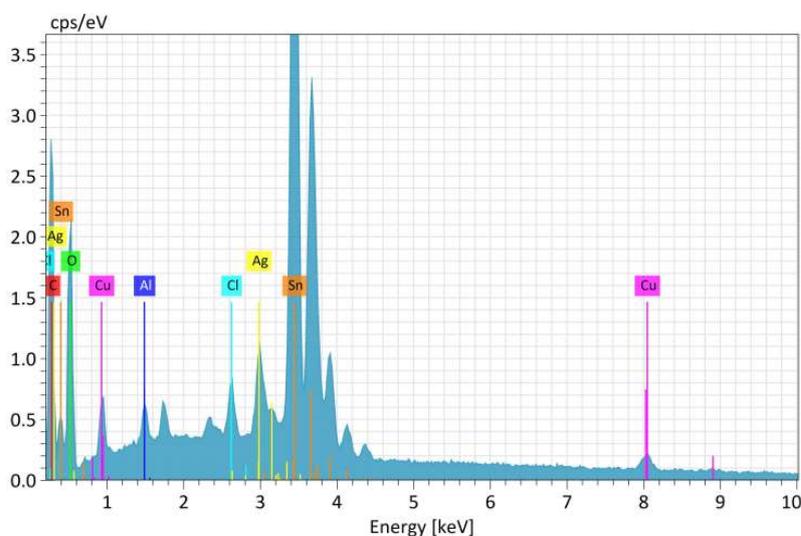


Figura 68 – Gráfico de análise EDS: Pseudo ponto 4 espectro 3

Depois de realizar a análise a amostra boa, realizou-se a análise á amostra má no campo assinalado, como se pode verificar na Figura 69.

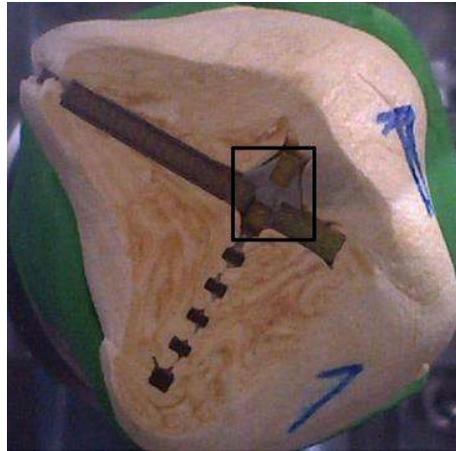


Figura 69 – Amostra má (SEM/EDS)

Os pontos a serem analisados estão identificados na Figura 70.

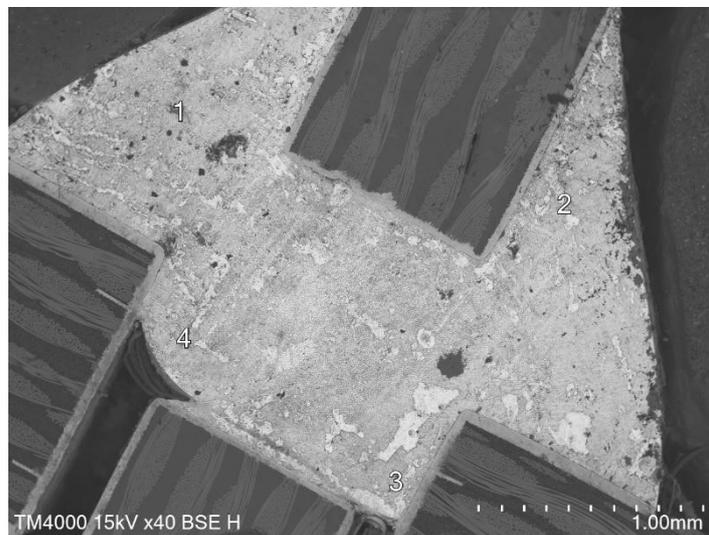


Figura 70 – Identificação dos pontos de análise: Amostra má

No ponto 1 observa-se na sua maior parte aglomerados de Sn maioritariamente, em padrões mais regulares. Ag e Cu surgem mais dispersos de acordo com a imagem (Figura 71 e 72) fornecida pelo SEM.

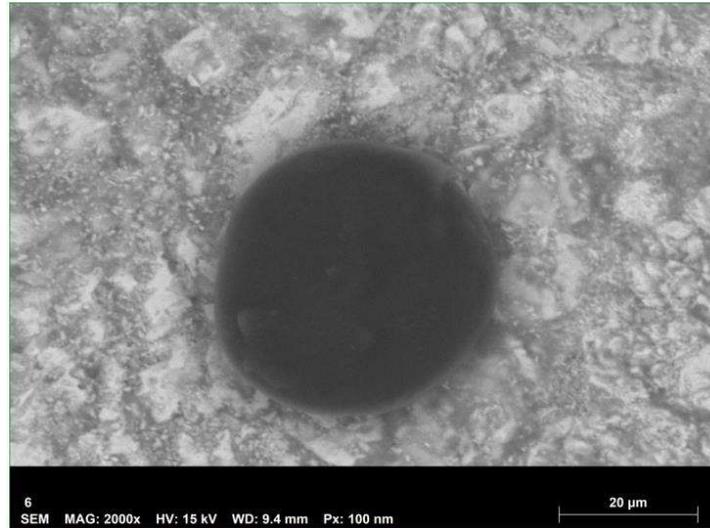


Figura 71 – Análise SEM: Ponto 1 (2000x)

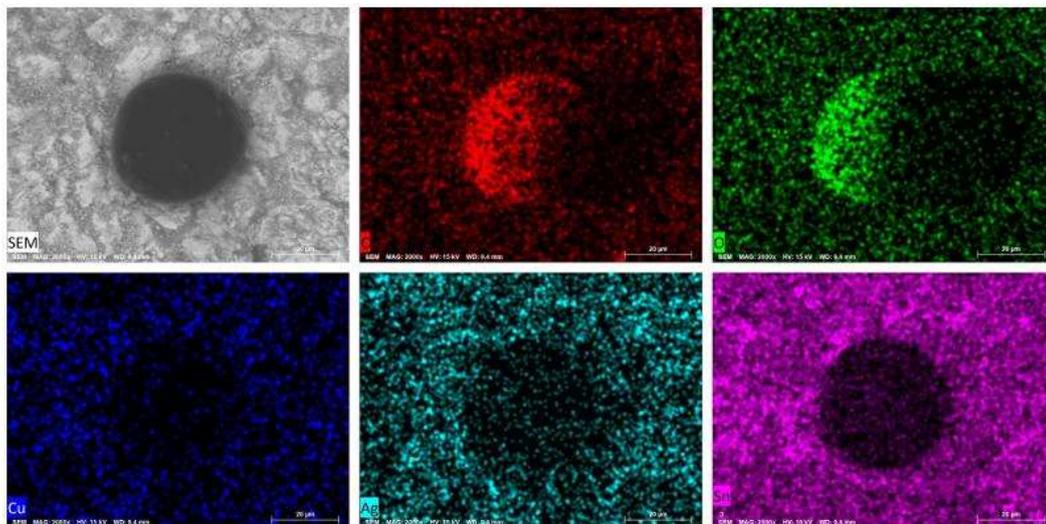


Figura 72 – Análise de imagem SEM: Ponto 1 (2000x)

Com recurso á análise EDS (Figura 73), identificaram-se os elementos Ag, Cu e Sn. Além disso, tal como já tinha ocorrido na amostra “boa”, constata-se ainda a existência de C e O.

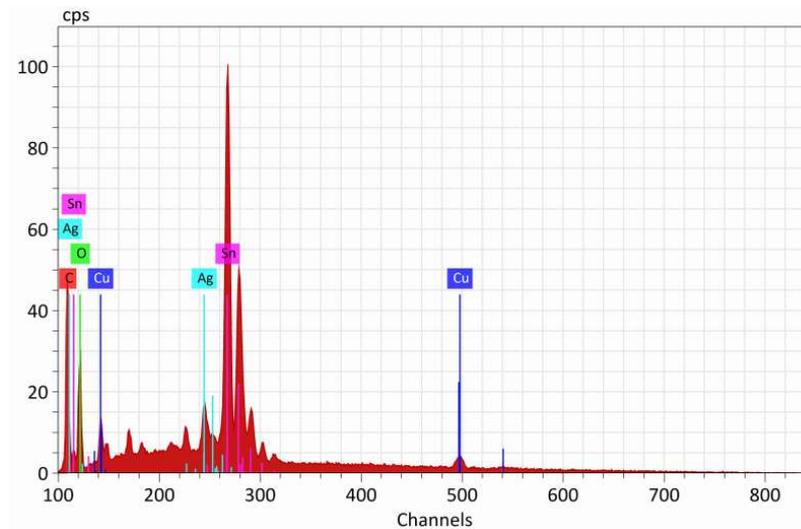


Figura 73 – Análise EDS: ponto 1

Em relação ao ponto 2, de acordo com análise do SEM (Figura 74 e 75) verificou-se uma grande concentração de Sn.

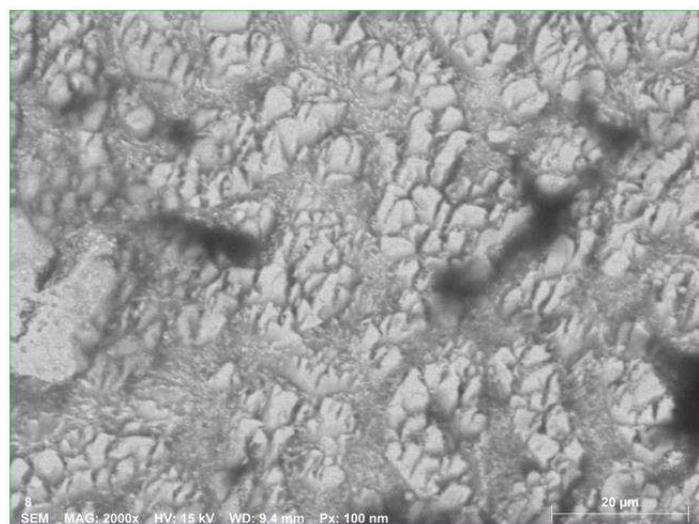


Figura 74 – Análise SEM: Ponto 2 (2000x)

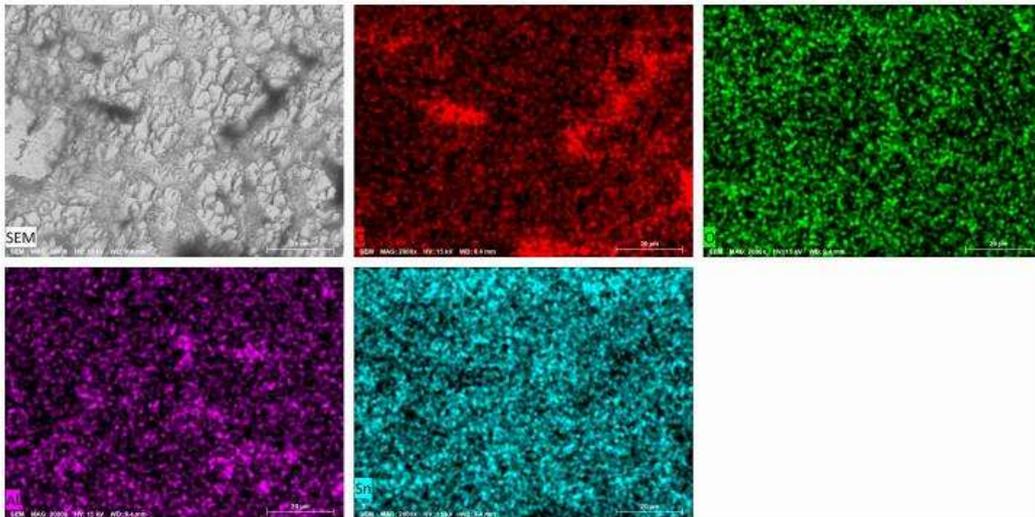


Figura 75 – Análise de imagem SEM: Ponto 2 (2000x)

Na análise do EDS (Figura 76), identificou-se maioritariamente a presença de Sn. Além disso surgem o C, O e Al.

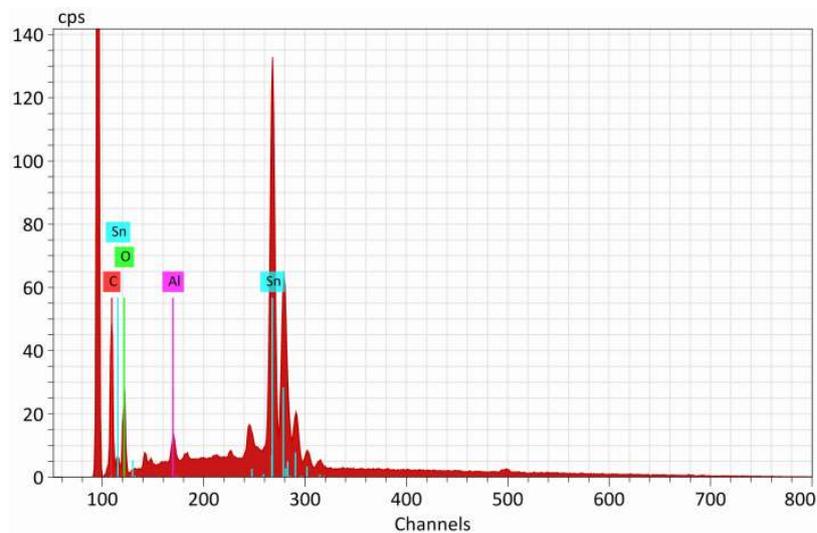


Figura 76 - Gráfico de análise EDS: ponto 2

Depois de executada a análise individual de amostra boa e má nos referidos pontos, realizou-se uma comparação entre elas e também relativamente a apresentação das microestruturas da liga de solda SAC 305.

Comparando a amostra boa e a má, relativamente ao ponto 1, verifica-se que a amostra 1 apresenta grãos mais finos que a amostra 2, como se pode visualizar na Figura 77.

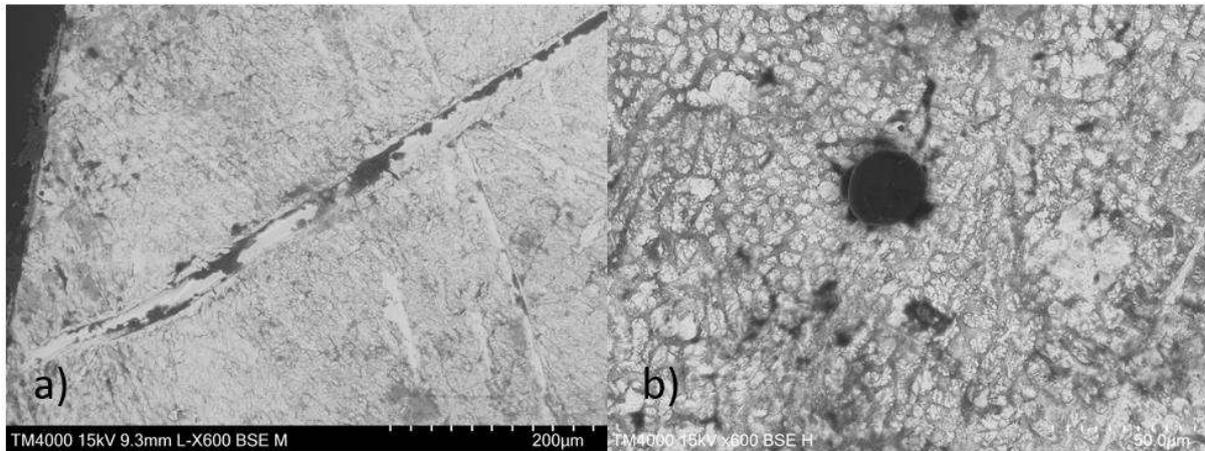


Figura 77 – Comparação entre o ponto 1 de ambas as amostras: a) Amostra boa; b) Amostra má (600x)

No ponto 2, tal como no ponto 1, a amostra boa apresenta grãos mais finos que a amostra má (Figura 78).

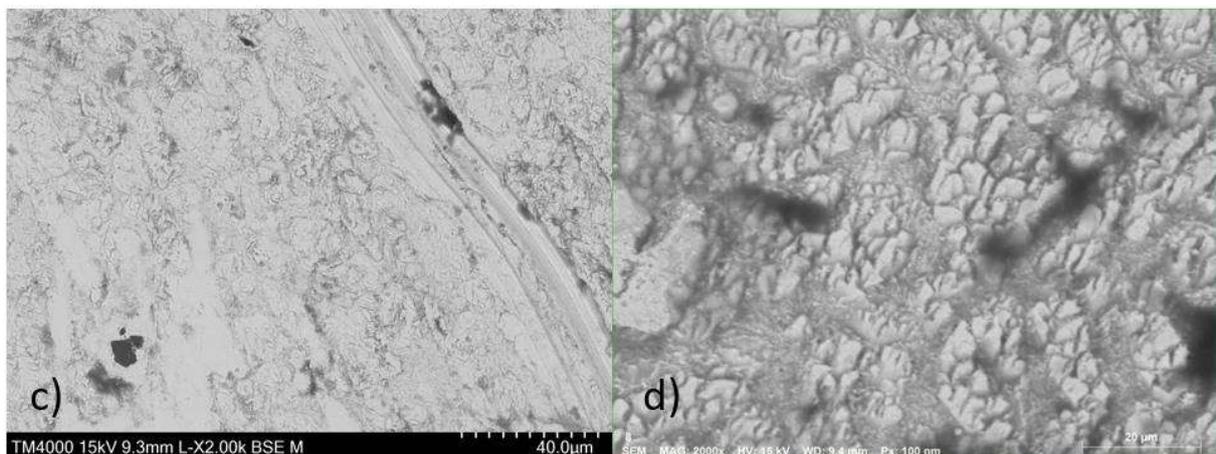


Figura 78 - Comparação entre o ponto 2 de ambas as amostras: c) Amostra boa; d) Amostra má (2000x)

Comparativamente a amostra boa no ponto 1 em relação á microestrutura da liga SAC 305, constata-se a ocorrência de uma microestrutura muito similar, como se pode visualizar na Figura 79.

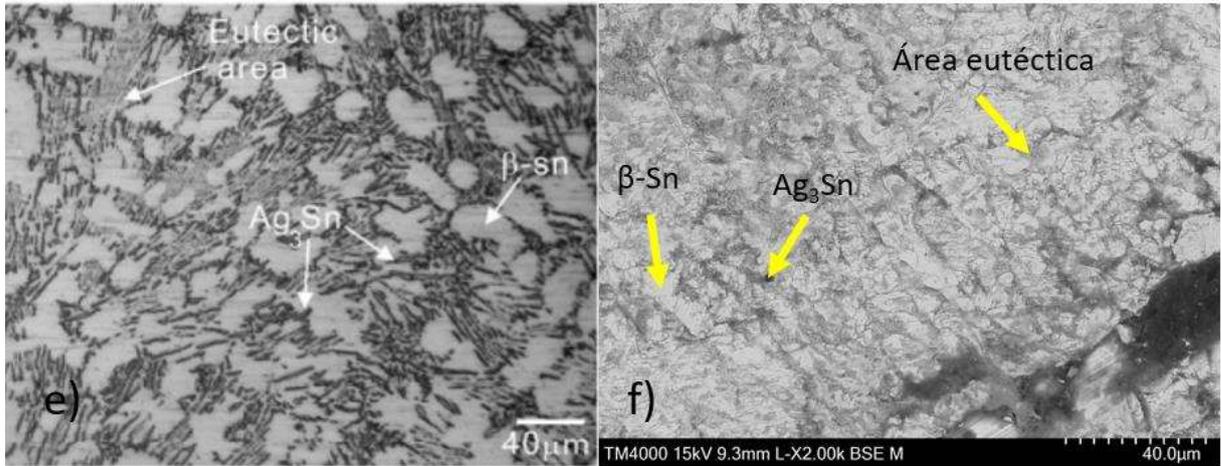


Figura 79 – Comparação das microestruturas: e) Liga SAC305; f) Amostra boa no ponto 1 (2000x)

No ponto 2 da amostra boa, visualiza-se um padrão semelhante ao ponto 1, mas com zonas mais irregulares onde ocorrem maiores aglomerados de β-Sn (Figura 80).

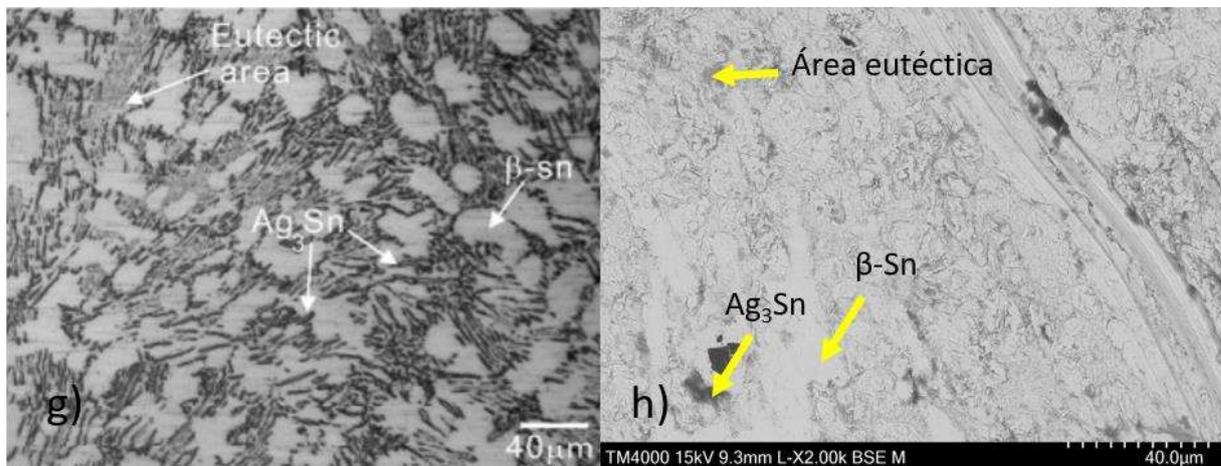


Figura 80 - Comparação das microestruturas: g) Liga SAC305; h) Amostra boa no ponto 2 (2000x)

Na amostra má no ponto 1, em comparação com a microestrutura da SAC305, apresenta uma microestrutura semelhante (Figura 81), mas com a presença de vazios o que vai comprometer o funcionamento da junta soldada.

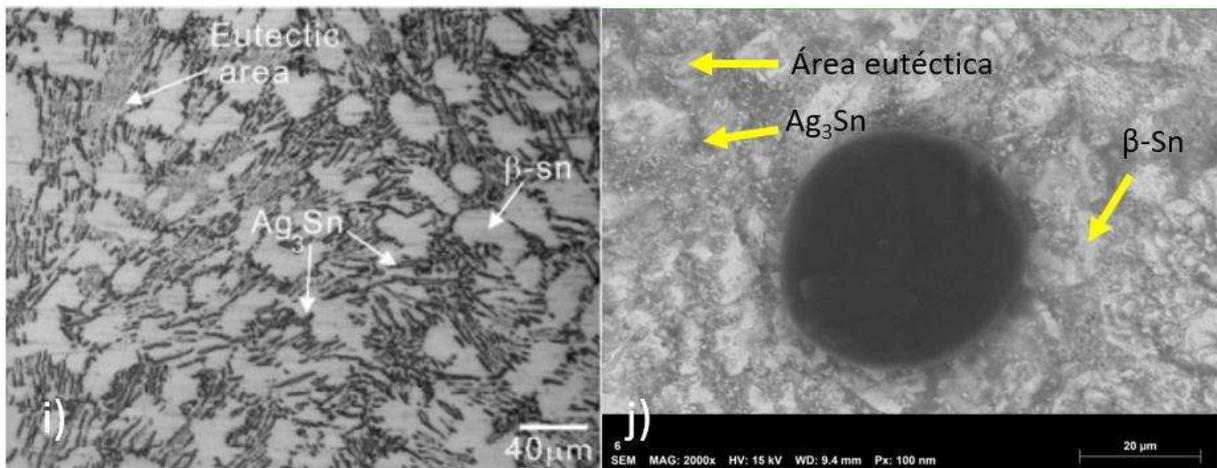


Figura 81 - Comparação das microestruturas: i) Liga SAC305; j) Amostra má no ponto 1 (2000x)

Em relação ao ponto 2, visualiza-se o mesmo tipo de microestrutura, mas com algumas irregularidades. Surgem várias porosidades como pode ser observado nas Figuras 82.

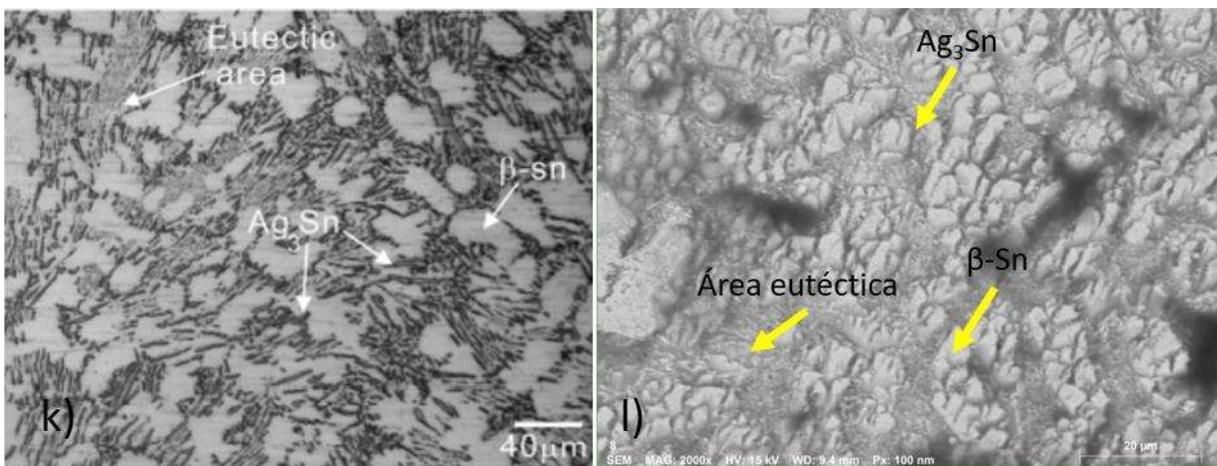


Figura 82 - Comparação das microestruturas: k) Liga SAC305; l) Amostra má no ponto 2 (2000x)

Num estudo sobre as reações interfaciais entre as soldas á base de Sn e *pads* de Cu foi demonstrada a formação de compostos intermetálicos a temperaturas inferiores a 350°C [44]. Foram identificadas as fases  $Cu_3Sn$  ( $\epsilon$ ) e  $Cu_6Sn_5$  ( $\eta$ ). Este estudo foi realizado devido a esses intermetálicos serem bastantes frágeis, e a espessura excessiva poder levar a uma diminuição da ductilidade e resistência da junta de soldadura. Recentemente, as soldas compostas foram

identificadas como materiais potenciais que podem fornecer maior resistência em comparação com as soldas convencionais [44].

Relativamente a este estudo, a formação das IMCs junto ao Cu, poderá vir a comprometer a fiabilidade da solda.

Para resolver este problema de acordo com Tsao e Chang [44], a adição de nano pó de  $TiO_2$  entre a liga SAC 305 e substrato cobre, irá refinar as fases  $Ag_3Sn$  e  $\beta$ -Sn, resultando na formação de um grande número de precipitados submicrométricos- $Ag_3Sn$  em forma de ponto, na matriz Sn3.5Ag0.5Cu, após solidificação. A taxa de crescimento linear com a raiz quadrada do tempo de reação indica que na interface as reações são controladas por difusão [44].



# CAPÍTULO 6

---

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO



## 6 Conclusões

A realização deste projeto permitiu compreender melhor os fenômenos envolvidos nos processos de soldadura de componentes eletrônicos numa PCI. O foco principal do trabalho foi a caracterização das juntas de soldadura e cravação em cabos, mais concretamente na realização e comparação de duas instruções de trabalho do procedimento integral de cortes metalográficos. Também se realizou o estudo comparativo entre uma junta soldada boa e má, observando-se as microestruturas das camadas intermetálicas através do microscópio ótico.

Neste sentido podem ser retiradas algumas conclusões finais acerca do procedimento de cortes metalográficos e do estudo microestrutural das camadas intermetálicas.

Em termos do procedimento dos cortes metalográfico pode-se concluir que:

- Relativamente á execução de corte da amostra, a utilização de uma máquina de corte de precisão é o ideal, visto que consegue aproximar o corte o mais perto possível do local a ser analisado (em alguns casos se necessária uma análise imediata um corte na secção basta, evitando o resto do procedimento), evita rebarbas na amostra, corte mais limpo e seguro
- Na preparação das amostras, como a mistura química é realizada sem a utilização de uma câmara de pressão, vão se formar bolhas de ar nas amostras
- No desbaste a utilização da máquina de desbaste/polimento automática, a sequência correta das lixas de Carbonato de Silício e aplicação de forças moderadas, permite o acabamento final da amostra de melhor qualidade (remoção dos traços abrasivos) e perceção para a análise posterior

Por último, sobre o estudo microestrutural das camadas intermetálicas pode-se concluir que:

- Os compostos intermetálicos (fases  $Cu_3Sn$  ( $\epsilon$ ) e  $Cu_6Sn_5$  ( $\eta$ )) com espessura excessiva poder levar a uma diminuição da ductilidade e resistência da junta de soldadura.
- As camadas intermetálicas, nomeadamente grandes precipitados de  $\beta$ -Sn junto ao Cu podem influenciar o comportamento das juntas soldadas.

- A adição de nano pó de  $TiO_2$  entre a liga SAC 305 e substrato cobre, irá refinar as fases  $Ag_3Sn$  e  $\beta$ -Sn

### 6.1 Trabalho Futuro

A complexidade e a importância dos cortes metalográficos, para validar os processos de soldadura mostram-se essenciais para a indústria automotiva, mais concretamente na produção de antenas inteligentes. Desta forma, sugere-se que no futuro sejam implementadas as seguintes melhorias:

- A aquisição de uma máquina de corte de precisão automática com várias funcionalidades e de fácil manuseamento
- Uso do produto de resina ViaFix da “Struers” (indicados para PCBs), para melhor transparência e enchimento das cavidades microscópicas.
- Argolas de fixação para melhorar o posicionamento da amostra no copo
- Utilização de uma câmara de pressão na cura das amostras para total transparência das amostras
- Para a análise microestrutural das soldas, o investimento do StructureExpert Weld da “Struers”

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Coombs F. C., Jr.. (2008). Printed Circuits Handbook. Sixth Edition. McGraw-Hill Companies. USA.
- [2] Khandpur , R. S. (2006). Printed Circuit Boards – Design, Fabrication, Assembly and Testing. McGraw-Hill Electronic Engineering. USA.
- [3] Judd, M., Brindley, K. (1999). Soldering on Electronics Assembly. Second edition. Newnes Publications. London, England.
- [4] Single-sided PCB circuit board, FAST PCBA, 2020. Disponível em: <http://www.pcb-manufacturer.net/single-sided-pcb/>. Acesso em: 2 dez. 2020.
- [5] Fjelstad, J. (2006). Flexible Circuit Technology. Third edition. BR Publishing, Inc. EUA.
- [6] Pan, J., & Ph, D. (2006). Lead-free Solder Joint Reliability – State of the Art and Perspectives, Volume 2. 72–83. International Microelectronics and Packaging Society.
- [7] Schueller, R., Ph, D., Ables, W., Fitch, J., & Ph, D. (2005). A Case Study for Transitioning Class a Server Motherboards to Lead-free. USA.
- [8] Sheperd, J., Bath, J. (2007). Lead-Free Soldering. Solectron Corporation. Springer Science+Business Media, LLC. New York, USA.
- [9] Zheng Y. (2005). Effect of surface finishes and intermetallics on the reliability of SnAgCu interconnects. Dissertation for Doctor Degree. University of Maryland.
- [10] Laurila, T., Vuorinen, V., & Kivilahti, J. K. (2005). Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials. Materials Science and Engineering: R: Reports, 49(1-2), 1–60.
- [11] MEP EP#59: Grass Fed PCBs, MACROFAB, 2020. Disponível em: <https://macrofab.com/blog/mep-ep59-grass-fed-pcbs/>. Acesso em: 2 dez. 2020
- [12] Puttlitz J. K., Stalter A. K. (2004). Handbook of Lead-free Solder Technology for Microelectronic Assemblies. Marcel Dekker, Inc. New York.
- [13] IPC-A-610D. (2005). Acceptability of Electronic Assemblies. IPC Association Connecting Electronics Industries.
- [14] “Soldering and Mounting Techniques” – Reference Manual. ON Semiconductor. SOLDERRM/D, Rev. 6, Setembro-2008.

- [15] Hoffmann, R., Alves, A. (2018). MELHORIAS DE UMA PCI COM FOCO EM PROJETO PARA MANUFATURA. Revista Ilha Digital. Disponível em: <http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/113/84>
- [16] Generic CT-5V500MA 220V Ac To 12V Dc 500Ma Circuit Board Smpls Power Supply Ac Dc Stepdown Buck Converter Module, Amazon, 2020. Disponível em: <https://www.amazon.in/PACK-Power-Supply-Board-Circuit/dp/B07S2YLZWZ>. Acesso em: 2 dez. 2020.
- [17] Soldadura, Eletrónica Fundamental Módulo 9. Disponível em: <https://sites.google.com/site/electronicafundamentalmodulo9/tecnicas-de-soldadura-de-componentes-eletronicos>. Acesso em: 2 dez. 2020.
- [18] Soldadura por refluxo - Reflow soldering, Qaz Wiki, 2020. Disponível em: [https://pt.qaz.wiki/wiki/Reflow\\_soldering](https://pt.qaz.wiki/wiki/Reflow_soldering). Acesso em 2 dez. 2020.
- [19] REFLOW SOLDERING PROCESS, SURFACE MOUNT PROCESS, 2015. Disponível em: <https://www.surfacemountprocess.com/reflow-soldering-process.html>. Acesso em: 2 dez. 2020.
- [20] Reflow Process (Heat Process, Profile, Thermocouples), Academia, 2020. Disponível em: [https://www.academia.edu/36267728/Reflow\\_Process\\_Heat\\_Process\\_Profile\\_Thermocouples](https://www.academia.edu/36267728/Reflow_Process_Heat_Process_Profile_Thermocouples). Acesso em: 2 dez. 2020.
- [21] WAVE SOLDERING DEFECTS, epec, 2020. Disponível em: <https://www.epectec.com/pcb/wave-soldering-defects/>. Acesso em: 4 dez. 2020.
- [22] Soldagem por Onda, SMDONLINE, 2020. Disponível em <https://smdonline.com.br/soldagem-por-onda/>. Acesso em 4 dez. 2020.
- [23] 5 Important Steps Of A Wave Soldering Process, Accelerated Assemblies, Inc., 2020. Disponível em: <https://www.acceleratedassemblies.com/blog/5-important-steps-of-a-wave-soldering-process>. Acesso em 4 dez. 2020.
- [24] Strauss R., Dr. Ing., FIM. (1998). SMT Soldering Handbook. Second edition. Newnes Publications. London, England.
- [25] Barra de solda de onda de prata livre de chumbo SAC305, BBIEN SOLDERS. Disponível em: <http://m.pt.bbiansolders.com/bar-solder/lead-free-alloy-wave-soldering-bar/sac305-lead-free-wave-silver-soldering-bar.html>. Acesso em 15 dez. 2020.
- [26] Soldertec, “European Lead-free Technology Roadmap,” 2002.

- [27] H. M. e. J. C. Suhling, “A review of mechanical properties of lead-free solders for electronic packaging,” *Journal of Materials Science*, 2009.
- [28] P. Tu, Y. Chan e K. H. a. J. Lai, “Growth kinetics of intermetallic compounds in chip scale package solder joint,” *Scripta materialia*, 2001.
- [29] Satyanarayan, & Prabhu, K. N. (2011). Reactive wetting, evolution of interfacial and bulk IMCs and their effect on mechanical properties of eutectic Sn-Cu solder alloy. *Advances in colloid and interface science*, 166(1-2), 87–118.
- [30] Fellman J., Lee S.. (2005). No Hassle Lead-Free HASL. *Printed Circuit Design & Manufacture*.
- [31] Siewert, T. A., Madeni, J. C., & Liu, S. Formation and Growth of Intermetallics at the Interface Between Lead-free Solders and Copper Substrates. Boulder, Colorado, (1), 2–8.
- [32] Wu, C. M. L., Yu, D. Q., Law, C. M. T., Wang, L. (2004). Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions. *Materials Science and Engineering:R: Reports*, 44 (1), 1–44.
- [33] Pang, J. H. L., Xu, L., Shi, X. Q., Zhou, W., & Ngoh, S. L. (2004). Intermetallic growth studies on Sn-Ag-Cu lead-free solder joints. *Journal of Electronic Materials*, 33(10), 1219–1226.
- [34] P. Tu, Y. Chan e K. H. a. J. Lai, “Growth kinetics of intermetallic compounds in chip scale package solder joint,” *Scripta materialia*, 2001.
- [35] J. Liang<sup>1</sup>, N. Dariavach e P. C. e. D. Shangguan, “Metallurgy and Kinetics of Liquid– Solid Interfacial Reaction during Lead-Free Soldering,” *Materials Transactions*, vol. 47, 2006.
- [36] L. C. Tsao, “Suppressing effect of 0.5 wt.% nano-TiO<sub>2</sub> addition into Sn<sub>3.5</sub>Ag-0.5Cu solder alloy on the intermetallic growth with Cu substrate during isothermal aging,” *Journal of Alloys and Compounds*, 2011.
- [37] Mazda, FF, “Livro de referência do engenheiro eletrônico”, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [38] IsoMet 5000 Linear Precision Saw, indiamart, 2021. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/isomet-5000-linear-precision-saw-10723679555.html>. Acesso em 2 de mar. 2021.

- [39] Grupo Continental, Continental, 2021. Disponível em: <https://www.continental-pneus.pt/ligeiros/empresa/sobre-n%C3%B3s/corporativo>. Acesso em 2 fev. 2021.
- [40] Continental Advanced Antenna Portugal, COTEC Portugal, 2020. Disponível em: <https://cotecportugal.pt/associates/continental-advanced-antenna-portugal/>. Acesso em 2 fev. 2021.
- [41] Vehicle Networking and Information, Continental, 2021. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Company/Vehicle-Networking-and-Information>. Acesso em 2 fev. 2021.
- [42] Rohde R., “METALOGRAFIA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS”, Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, 2010.
- [43] K.S. Kim, S.H. Huh, K. Suganuma, “Effects of intermetallic compounds on properties of Sn–Ag–Cu lead-free soldered joints”, 2002.
- [44] A. J. G.-R. e. D. Bell, Energy-Dispersive X-Ray Analysis in the Electron Microscope, Taylor & Francis e-Library, 2005.
- [45] L. Tsao, C. Chu e S. Peng, “Study of interfacial reactions between Sn<sub>3.5</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu composite alloys and Cu substrate”, 2011.