



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Lais Pinto de Oliveira

Efeito da dissipação térmica nas juntas de  
soldagem de componentes through hole

Lais Pinto de Oliveira      Efeito da dissipação térmica nas juntas de  
soldagem de componentes through hole





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Lais Pinto de Oliveira

Efeito da dissipação térmica nas juntas de  
soldagem de componentes through hole

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia de Materiais

Trabalho efectuado sob a orientação de  
Professora Doutora Ana Maria Pinto  
Engenheiro Jose Luis Ribas

---

## DECLARAÇÃO

Nome: Lais Pinto de Oliveira

Endereço eletrónico: [laisoliveira.p@gmail.com](mailto:laisoliveira.p@gmail.com)

Telefone: 914413000

Número do Bilhete de Identidade: 13857418

Título da dissertação: Efeito da dissipação térmica nas juntas de soldagem de componentes *through hole*

Orientador(es): Professora Doutora Ana Maria Pinto

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia de Materiais

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUERPARTE DESTA TESE/TRABALHO

Universidade do Minho, 31/10/2015

Assinatura:

---

## AGRADECIMENTOS

Apesar de este ser um trabalho individual, não posso deixar de agradecer a todos os que contribuíram e me motivaram durante a sua realização.

Não posso deixar de agradecer à Professora Ana Pinto por toda a orientação, sugestões, disponibilidade e confiança que sempre dedicou ao longo deste trabalho. Agradeço também a sua paciência e a forma carinhosa com que sempre me aconselhou.

Ao Engenheiro Luís Ribas agradeço também toda a dedicação e sugestões que muito contribuíram para o meu desenvolvimento profissional.

Ao Sr. Gonçalo Costa agradeço todo o seu apoio, sugestões, acompanhamento e recomendações. A sua ajuda foi crucial na realização deste trabalho.

Aos meus amigos e à minha família, por todo o carinho, paciência, pela motivação e por acreditarem que este trabalho seria bem sucedido.

Ao Projeto “HMIEXCEL - I&D crítica em torno do ciclo de desenvolvimento e produção de soluções multimédia avançadas para automóvel” pelo consórcio Bosch I UMinho, financiado através do Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico do QREN.



---

## RESUMO

Os produtos electrónicos são cada vez mais complexos, as placas de circuito impresso possuem cada vez mais componentes e são também necessárias mais ligações entre componentes.

Estas ligações são maioritariamente realizadas através de camadas de cobre no interior das placas de circuito impresso. O aumento do número de ligações de cobre tem impacto na dissipação térmica da placa de circuito impresso e consequentemente irá certamente ter influência nos processos de soldagem onde são soldados os componentes electrónicos às placas de circuito impresso.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto da utilização de diferentes camadas internas de cobre na soldagem seletiva de componentes TH (*through hole*). De forma a avaliar a influência do número de camadas de cobre foi concebida uma placa de circuito impresso de teste com diferentes versões com várias camadas de cobre. Foram testados dois tipos de componentes eletrónicos e por fim foram analisadas as juntas de soldagem formadas.

Este trabalho foi realizado em cooperação com a BOSCH Car Multimedia S.A.

Através de inspeção das juntas de soldagem por microscópio ótico a cortes seccionais realizados às amostras, bem como através de análise por raios-x, foi analisado o enchimento dos furos após a soldagem dos componentes. Verificou-se que o número de camadas de cobre bem como a sua distribuição na placa de circuito impresso possuem impacto na junta de soldagem obtida. Além do número e distribuição das camadas de cobre na placa de circuito impresso, o tipo de componente utilizado influencia também o enchimento dos furos.





---

## ABSTRACT

The electronic products are getting more and more complex. The printed circuit boards have more quantity and more complex electronic components. Besides the components complexity, the printed circuit boards are also more complex once more connections between components are needed.

The majority of the electronic connections are done by copper layers inside the printed circuit boards. The number of connections increase has a direct impact on the printed circuit board thermal dissipation and consequently on the soldering processes where the electronic components are soldered to the boards.

The main goal of the current investigation is to evaluate the impact of the usage of different number of copper inner layers on the quality of TH (through hole) components soldering. In order to evaluate the impact of the different number of copper layers usage, it was created a test board with different versions where were applied different number of copper layers. On the test were soldered by selective soldering two types of TH components and then the solder joints were analyzed.

This investigation was performed in a partnership with BOSCH Car Multimedia S.A.

The solder joints were analyzed by x-ray and optic microscope inspection was performed on the component cross sections in order to verify the hole filling. Based on the analysis performed to the formed solder joints it was possible to verify that the number of copper layers and also the copper layers distribution have impact on the solder joints. Besides the number and copper layers distribution, the component type which is used has also influence on the hole filling.



---

## ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras.....	xi
1. Capítulo 1 - Introdução.....	1
2. Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Indústria eletrônica.....	3
2.2 Placas de circuito impresso.....	4
2.2.1 Acabamento superficial das placas de circuito impresso.....	8
2.3 Componentes eletrônicos.....	9
2.3.1 Componentes SMD.....	9
2.3.2 Componentes TH.....	9
2.4 Métodos de acoplação de componentes eletrônicos à PCB.....	10
2.5 Soldagem.....	10
2.6 <i>Reflow soldering</i> .....	12
2.7 <i>Wave soldering</i> .....	13
2.8 <i>Selective soldering</i> .....	15
2.9 Soldagem de componentes <i>through hole</i> .....	16
3. Capítulo 3 - Materiais e procedimento experimental.....	19
3.1 Materiais utilizados.....	19
3.1.1 Placa de circuito impresso.....	19
3.1.2 Componentes.....	23
3.1.3 Procedimento experimental.....	25
3.1.4 Soldagem seletiva.....	26
4. Capítulo 4 – Apresentação e discussão de resultados.....	35
4.1 Perfis de temperatura.....	35
4.1.1 Conector.....	35
4.1.2 Condensador eletrolítico.....	44
4.2 Inspeção do enchimento dos furos.....	46

---

4.2.1	Inspeção através de microscópio ótico.....	46
4.2.2	Inspeção através de raios-x .....	52
4.2.3	Inspeção através de microscópio ótico a cortes seccionais .....	54
4.3	Caracterização microestrutural .....	59
5.	Conclusões .....	65
6.	Perspectivas para trabalhos futuros.....	67
7.	Referências Bibliográficas .....	69

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Placas de circuito impresso [30].....	4
Figura 2 - Esquema representativo da placa de circuito impresso. Adaptado de [9]. .....	5
Figura 3 - Esquema representativo da superfície da placa de circuito impresso [7].....	5
Figura 4 - Tipos de placas de circuito impresso [7]. .....	7
Figura 5 - Representação do interior de uma placa de circuito impresso [12].....	7
Figura 6 - Componentes SMD [7].....	9
Figura 7 - Componentes TH [7]. .....	9
Figura 8 - Sequência representativa do processo de <i>Reflow</i> [7].....	12
Figura 9 - Esquema de perfil de temperatura utilizado em <i>Reflow</i> . .....	13
Figura 10 -Representação do processo de soldagem <i>Wave</i> . Adaptado de [7].....	14
Figura 11 - Representação do processo de soldagem <i>Wave</i> . .....	14
Figura 12 - Multi-onda. ....	15
Figura 13 - Mini-onda [23].....	16
Figura 14 - Enchimento de 100% do furo [24]. .....	17
Figura 15 - Mínimo de enchimento aceitável para o furo [24]. .....	17
Figura 16 - Diagrama de fases Sn-Ag [25]. .....	18
Figura 17 - Placa de circuito impresso de teste. ....	19
Figura 18 - Furo.....	20
Figura 19 - Placa de circuito impresso com de 1mm de largura de pista.....	21
Figura 20 - Representação da camada La1.....	22
Figura 21 - Representação da camada Lu. ....	23
Figura 22 - Condensador eletrolítico.....	23
Figura 23 - Desenho mecânico do condensador eletrolítico. ....	24
Figura 24 - Conector. ....	24
Figura 25 - Desenho mecânico do conector. ....	24
Figura 26 - Forno de <i>reflow</i> .....	25
Figura 27 -Componentes inseridos nas placas de circuito impresso. ....	27
Figura 28 - Aplicação do fluxo. ....	27
Figura 29 - Placa de circuito impresso sobre a zona de pré-aquecimento. ....	28
Figura 30 - Banho de solda. ....	28
Figura 31 - Ferramenta utilizada na soldagem seletiva.....	29
Figura 32 - Solda a ser bombeada através dos <i>nozzles</i> .....	30

---

Figura 33 - Colocação do termopar na superfície superior da placa de circuito impresso. ....	31
Figura 34 - Termopar colocado na superfície inferior da placa de circuito impresso.....	31
Figura 35 - Colocação de termopares nas diferentes versões no conector.....	32
Figura 36 - Equipamento de aquisição de temperatura ( <i>Super M.O.L.E. Gold</i> ).....	32
Figura 37 - Perfil térmico obtido na placa de circuito impresso e na versão 9 e 10 do conector. .....	36
Figura 38 -Diferença de temperatura entre superfície inferior e superfície superior da placa.	39
Figura 39 - Diferença de temperatura entre superfície inferior e superfície superior nas diferentes placas. ....	43
Figura 40 -Perfil térmico obtido para placa com 0,5mm. ....	44
Figura 41 - Diferenças de temperatura obtidas nos dois tipos de placa. ....	46
Figura 42 - Menisco formado no condensador eletrolítico. ....	47
Figura 43 -Inspeção através de microscópio ótico realizada nos conectores. ....	48
Figura 44 - Pino de massa. ....	49
Figura 45 - Inspeção através de microscópio ótico realizada nos condensadores electrolíticos. .....	50
Figura 46 - Pino com maior espessura - versão 4. ....	51
Figura 47 - Inspeção por raios-x realizada ao conector na placa com 0,5 e 1 mm de largura de pista. ....	52
Figura 48 - Inspeção por raios-x realizada ao condensador eletrolítico na placa com 0,5 e 1 mm de largura de pista. ....	53
Figura 49 -Inspeção através de microscópio ótico realizada aos cortes seccionais do conector. .....	55
Figura 50 - Conector. ....	56
Figura 51 - Inspeção através de microscópio ótico realizada aos cortes seccionais do condensador eletrolítico. ....	57
Figura 52 – Microestrutura da junta de soldagem do pino de sinal. ....	59
Figura 53 – Microestrutura do pino de massa. ....	61
Figura 54 – Microestrutura do pino de massa. ....	62
Figura 55 - Condensador eletrolítico.....	63

---

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de materiais utilizados nas placas de circuito impresso [10].	6
Tabela 2 - Acabamentos superficiais e espessura típica.	8
Tabela 3 - Distribuição de camadas condutoras em cada versão.	21
Tabela 4 - Dimensões do componente.	24
Tabela 5 - Temperaturas nas zonas do forno de <i>reflow</i> .	26
Tabela 6 - Identificação dos termopares.	36
Tabela 7 - Temperaturas obtidas no conector em placa de circuito impresso de 1mm.	38
Tabela 8 - Condutividade térmica dos materiais [27].	40
Tabela 9 - Temperaturas obtidas no conector em placa de circuito impresso de 0,8 e 0,5 mm.	42
Tabela 10 - Identificação dos termopares presentes no perfil térmico da Figura 43.	44
Tabela 11 - Temperaturas obtidas no condensador em placa de circuito impresso de 0,5 e 1 mm.	45
Tabela 12 - Composição química da zona Z1, Z2 e Z3.	60
Tabela 13 – Composição química Z2, Z3 e Z4.	62
Tabela 14 - Composição química Z3.	64





---

## 1. CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Actualmente os produtos eletrónicos fazem parte do dia-a-dia da sociedade. Produtos deste tipo estão em constante desenvolvimento, tornando-se cada vez mais complexos a cada passo de evolução.

As exigências para as placas de circuito impresso aumentam continuamente. As placas de circuito impresso são utilizadas numa ampla gama de aplicações e estão sujeitas a diversos tipos de solicitações e cargas, tais como temperatura, impacto, vibrações, fadiga, entre outras. Devido às exigências dos clientes, as placas deverão tornar-se cada vez mais finas, de menores dimensões e além disso devem incluir circuitos mais complexos, possibilitando um maior número de ligações entre componentes eletrónicos [1].

As placas de circuito impresso estão presentes em qualquer produto que contenha componentes eletrónicos, e são estas placas que tornam realidade a tecnologia de ponta e todas as funcionalidades que estamos habituados. As placas de circuito impresso desempenham então um papel fundamental no funcionamento dos produtos eletrónicos. A sua qualidade bem como dos circuitos que estas são capazes de sustentar influencia directamente a fiabilidade, qualidade e desempenho dos produtos eletrónicos. O desenvolvimento da tecnologia das placas de circuito impresso acompanha o desenvolvimento dos produtos eletrónicos, em que o desenvolvimento das placas de circuito impresso e toda a tecnologia associada tem sempre associado aspectos muito importantes, tais como a produção, produtividade, a qualidade e custos [2].

Actualmente torna-se importante, e também seguindo a missão da Bosch Car Multimedia e o Sistema de Produção Bosch (BPS – *Bosch Production System*), a obtenção de produtos com elevada qualidade, redução de defeitos e satisfação dos clientes. Para isso investigam-se continuamente os processos de soldagem de componentes eletrónicos, a fim de se evitarem defeitos de produção, que provocam maiores tempos de produção e conseqüentemente custos relativos ao desperdício. Para além disso, actualmente a complexidade dos sistemas eletrónicos aumenta de dia para dia e de forma cada vez mais rápida, conseqüentemente é exigida uma evolução da tecnologia associada à produção destes produtos. Com a miniaturização dos componentes eletrónicos, existem mais pinos por componente eletrónico, as distâncias entre furos são cada vez menores e atinge-se um número de camadas condutoras numa placa muito superior ao que está a ser utilizado. Estes desafios tornam necessário desenvolver novas técnicas de projeto e design, novas ferramentas para a soldagem dos componentes e para a sua inspeção bem como efectuar alterações nos processos de soldagem já existentes na indústria e investigar novas alternativas.

---

Em 2006, com a entrada em vigor da directiva ROHS (*Restriction of the use of certain hazardous substances*), foi proibido o uso de algumas substâncias perigosas na indústria eletrónica. Um dos materiais mais utilizados e com grande importância nesta indústria, o chumbo, foi proibido, o que levou a um aumento da utilização de ligas sem chumbo nas montagens eletrónicas, havendo por isso a necessidade de desenvolver novos tipos de placas de circuito impresso, componentes e a grandes alterações nos diferentes processos de soldagem[3]. A Bosch de modo a acompanhar os avanços tecnológicos, tem desenvolvido várias investigações com o objetivo de melhorar os processos de soldagem e torná-los cada vez mais eficientes, nunca colocando em causa a qualidade dos produtos. No entanto, ainda existem alguns desafios nalguns processos de soldagem.

Devido a todas as mudanças associadas à evolução da tecnologia e dos produtos eletrónicos, os processos de soldagem de componentes eletrónicos às placas de circuito impresso são consequentemente afectados, como é o caso do processo de soldagem seletiva. Este é um processo de soldagem complexo onde o número de parâmetros que controlam e influenciam o processo é muito elevado, tais como o tipo de componentes eletrónicos, a forma dos pinos bem como todas as características associadas às placas de circuito impresso. A utilização de soldas sem chumbo afectou também os parâmetros dos processos de soldagem. As soldas de ligas sem chumbo possuem uma viscosidade mais elevada que as soldas com chumbo, dificultando o preenchimento de furos através do fenómeno de capilaridade, afetando posteriormente a qualidade das juntas de soldagem. As placas de circuito impresso possuem no seu interior camadas de cobre responsáveis pela ligação elétrica entre componentes eletrónicos. Com o aumento da complexidade dos produtos eletrónicos, estas ligações são mais numerosas e complexas, havendo necessidade de serem introduzidas mais camadas de cobre. A presença de um maior número de camadas de cobre faz com que a condução de calor varie ao longo da placa de circuito impresso, mesmo durante o processo de soldagem. A temperatura do furo onde será soldado o pino de um componente através de soldagem seletiva está directamente relacionada com a condutividade dos materiais presentes nessa zona. A condutibilidade térmica dos materiais presentes na zona do furo pode afetar o enchimento do furo [4].

Nesta dissertação pretende-se estudar a influência do número de camadas de cobre presentes numa placa de circuito impresso na qualidade da junta de soldagem, nomeadamente no enchimento de furos durante a soldagem de componentes eletrónicos através de soldagem seletiva.

---

## 2. CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Indústria eletrônica

A indústria eletrônica possui elevada importância na produção de bens e serviços indispensáveis à sociedade contemporânea. Nos últimos anos tem sido visível a grande evolução e desenvolvimento deste setor industrial.

O mercado de produtos elétricos e eletrônicos tem sofrido um aumento constante. No ano de 2000, o volume deste mercado foi de um trilhão de dólares e deverá chegar a dois trilhões de dólares até 2020 [5].

A Bosch Car Multimedia produz auto rádios e sistemas de navegação. A produção destes produtos inicia-se com os processos de soldagem dos componentes eletrônicos às placas de circuito impresso e termina na montagem final do produto, sendo este posteriormente aplicado nos automóveis.

Tal como os restantes produtos eletrônicos evoluíram e foram desenvolvidos ao longo dos anos, no caso dos auto rádios esta situação também se verificou.

Ao longo dos anos, o sistema de som utilizado nos automóveis foi evoluindo, passando de um simples rádio FM para sistemas de leitura de cassetes. Além disso os auto rádios passaram também a ser mais compactos. Posteriormente surgiram também os leitores de CD e mais tarde a introdução dos leitores de mp3.

A inovação da década de 2000 consistiu na integração de *players* de música (iPod) e *smartphones* com o sistema multimédia. Atualmente o sistema multimédia presente nos automóveis possui outras funções para além da reprodução de música, tais como sistemas *Bluetooth*, GPS, etc. A evolução deste tipo de sistemas foi notória, havendo a transição de um simples rádio para um complexo sistema de navegação, com várias funções incorporadas.

Toda a evolução e inovação nestes produtos eletrônicos acarretam um desenvolvimento da indústria eletrônica, sendo necessário investigar e melhorar materiais e processos.

---

## 2.2 Placas de circuito impresso

As placas de circuito impresso são um componente comum em todos os sistemas eletrônicos utilizados em várias aplicações (uso comercial, doméstico, automóvel, militar, entre outras) [6].

Como parte integrante dos produtos eletrônicos, as placas de circuito impresso bem com os seus processos de produção também passaram por uma fase de desenvolvimento.

O rápido desenvolvimento e expansão da indústria de produtos eletrônicos ao longo das últimas décadas conduziram a um drástico aumento da produção de placas de circuito impresso [6].

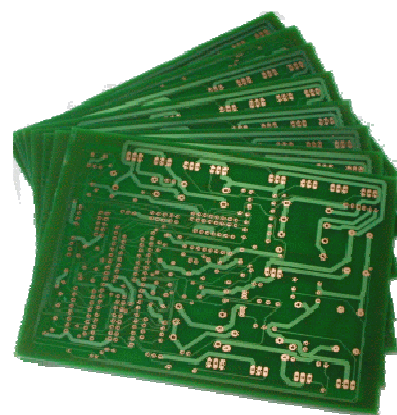
Os circuitos integrados constituem o coração de um sistema eletrônico, mas o sistema eletrônico completo é composto por muito mais que circuitos integrados. Os circuitos integrados (IC) e outros componentes eletrônicos são montados e interligados em placas de circuito impresso que por sua vez estão contidas num chassis (uma caixa) que dá rosto ao produto eletrônico que utilizamos [7].

A placa de circuito impresso (*PCB – Printed Circuit Board*) (ver Figura 1) foi inventada em 1936 pelo Dr. Paul Eisner. Desde a sua invenção foram desenvolvidos novos métodos de produção, novos materiais, e novas tecnologias para as placas de circuito impresso [8].

As placas de circuito impresso são amplamente utilizadas pois funcionam como uma plataforma estrutural para a soldagem de componentes eletrônicos, possibilitam ligações elétricas entre componentes eletrônicos e devido à sua facilidade de produção pois podem ser produzidas em massa e sem grandes variações, quase todas as ligações de soldagem entre os componentes eletrônicos e o circuito impresso podem ser realizadas numa operação mecanizada e de poucos passos (dependendo da complexidade do produto final) [7].

A placa de circuito impresso é uma placa plana constituída maioritariamente por um material eletricamente isolante. Além deste, é também constituída por um material eletricamente condutor uma vez que esta placa é projetada para fornecer ligações elétricas entre componentes eletrônicos que a ela estão ligados e acoplados.

Um esquema representativo das placas de circuito impresso encontra-se na Figura 2.



**Figura 1 - Placas de circuito impresso [30].**

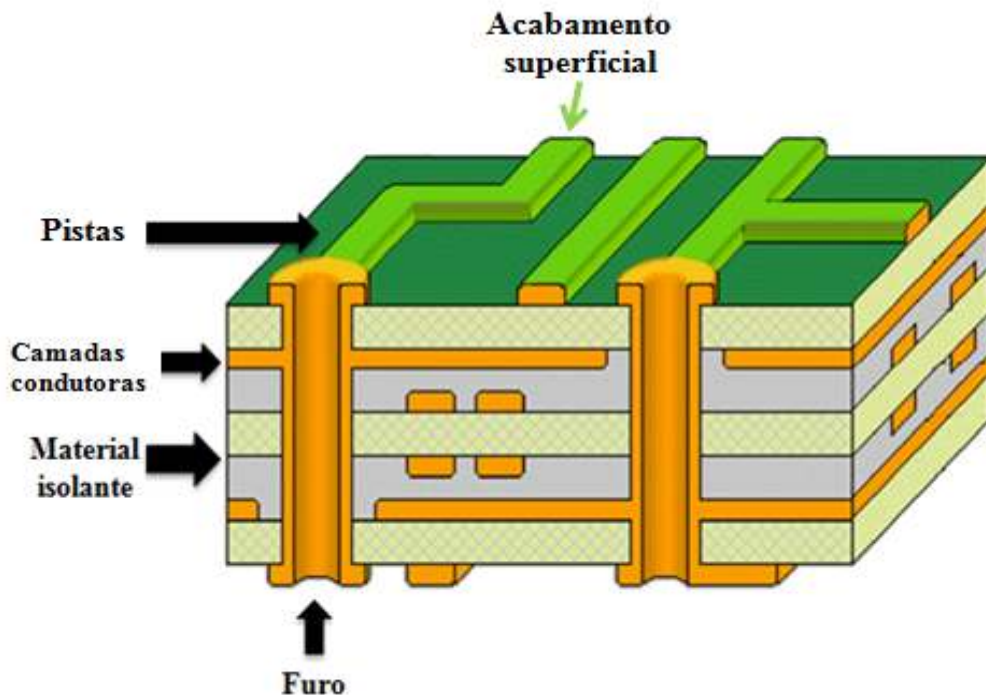


Figura 2 - Esquema representativo da placa de circuito impresso. Adaptado de [9].

As ligações elétricas são realizadas através de linhas condutoras de reduzida espessura (pistas) presentes na superfície da placa ou através de ligações realizadas em camadas condutoras presentes entre as camadas internas no material isolante que dá corpo à placa. A ligação e fixação dos componentes ocorre à superfície da placa em determinadas áreas (constituídas por cobre) específicas para cada componente (*lands*) ou através de furos presentes na placa de circuito impresso onde os terminais dos componentes podem ser inseridos. Na Figura 3 encontram-se representadas *tracks* (pistas) e *lands* na superfície de uma placa de circuito impresso.

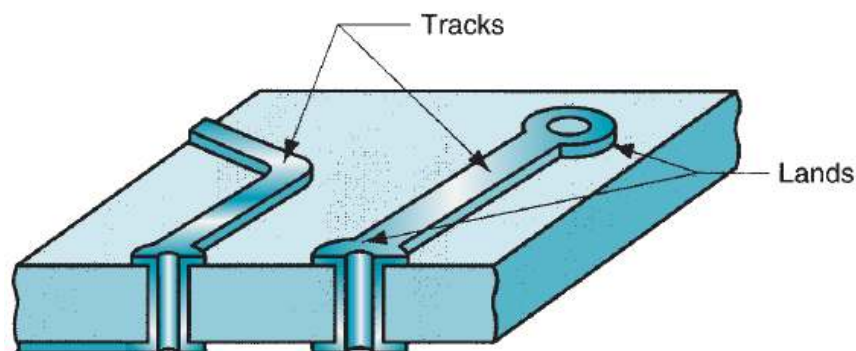


Figura 3 - Esquema representativo da superfície da placa de circuito impresso [7].

As placas de circuito impresso são essencialmente constituídas por um material base (compósito) e um material condutor. No entanto, estes materiais podem ter várias combinações, sendo possível ter vários materiais base (diferentes tipos de matriz e reforço). Uma das principais razões para a complexidade de materiais utilizados numa placa de circuito impresso é o facto de

estas placas serem utilizadas em diversos tipos de aplicações. Produtos diferentes requerem diferentes conjuntos de requisitos, quer em termos de desempenho e qualidade quer em termos de custo, havendo então a necessidade de se aplicarem diferentes materiais nas placas de circuito impresso dependendo da exigência do produto [10].

Os materiais base podem ser classificados pelo tipo de reforço, pela resina, bem como por outras propriedades do material. As especificações mais utilizadas para os materiais das placas de circuito impresso são definidas pela norma IPC-4101 “Especificação de Materiais de base para placas de circuito impresso rígidas e multicamada” como também pela *National Electrical Manufacturers Association*, NEMA.

Alguns dos principais tipos de reforço utilizados nas placas de circuito impresso encontram-se na Tabela 1, bem como a resina utilizada e ainda se o material compósito formado pela resina e reforço é retardador de chama.

**Tabela 1 - Tipos de materiais utilizados nas placas de circuito impresso [10].**

<b>Designação</b>	<b>Resina</b>	<b>Reforço</b>	<b>Retardador de chama</b>
<b>XXXPC</b>	Fenólica	Papel	Não
<b>FR-2</b>	Fenólica	Papel	Sim
<b>FR-3</b>	Epóxi	Papel	Sim
<b>FR-4</b>	Epóxi	Fibra de vidro	Sim
<b>FR-6</b>	Poliéster	Fibra de vidro	Sim
<b>G-10</b>	Epóxi	Fibra de vidro	Não

O FR-4 é o tipo de compósito mais utilizado nas placas de circuito impresso. Este material é constituído por fibras de vidro impregnadas em resina epóxi. O FR-4 apresenta excelentes propriedades elétricas, mecânicas e térmicas, sendo por isso muito utilizado em diferentes gamas de aplicação, sendo de destacar os computadores, telecomunicações, indústria aeroespacial e indústria automóvel.

O cobre é o material mais utilizado como material condutor para realizar as ligações entre componentes e permitir a formação do circuito elétrico.

Existem três tipos de placas de circuito impresso (Figura 4). Placas com apenas uma camada condutora, placas com duas camadas condutoras (uma camada em cada superfície da placa) e as placas multicamadas. As placas multicamadas além de possuírem camadas condutoras nas duas superfícies, possuem ainda camadas condutoras no seu interior [7].

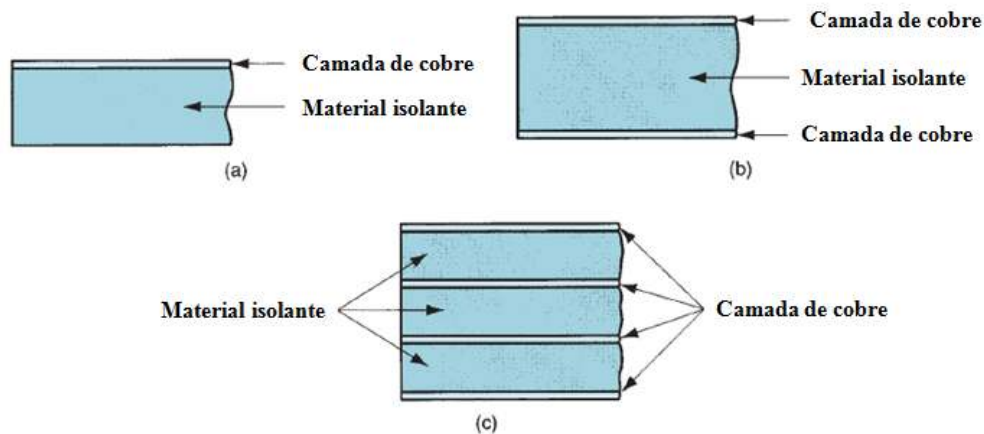


Figura 4 - Tipos de placas de circuito impresso [7].

As placas de circuito impresso com multicamadas são utilizadas de forma exaustiva na montagem de produtos eletrônicos. A estrutura das placas é composta por multicamadas de compósito, prensadas entre folhas de cobre. O processo de fabrico de placas de circuito impresso é composto por várias etapas [11].

Para se realizarem ligações entre camadas condutoras internas e as camadas superficiais condutoras das placas de circuito impresso, são utilizadas *vias* (furos). Existem vários tipos de vias, como *micro vias*, *blind vias* e *buried vias*. Este tipo de canais presentes nas placas de circuito impresso possibilita para além da ligação eletrónica, a dissipação térmica gerada por alguns componentes durante o seu funcionamento (Figura 5).

Existem ainda furos que atravessam a placa na vertical (de uma superfície à outra), estes furos são normalmente destinados à colocação dos pinos de determinados componentes eletrónicos. Estes furos têm a designação de *Plated Through Hole* (PTH) e encontram-se representados na Figura 5.

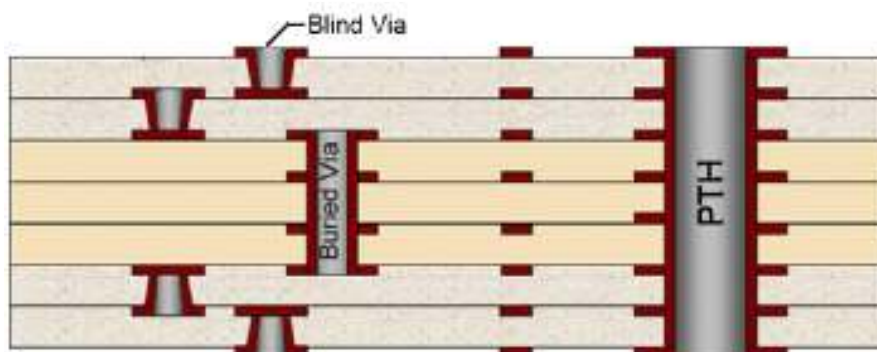


Figura 5 - Representação do interior de uma placa de circuito impresso [12].

---

### 2.2.1 Acabamento superficial das placas de circuito impresso

Após a produção da placa de circuito impresso, é necessário realizar um acabamento superficial de forma a proteger o cobre que se encontra exposto.

A superfície condutora (*land*) onde será realizada a ligação entre o componente eletrônico e placa de circuito impresso é uma zona crítica e de grande importância para a qualidade da junta de soldagem aí formada.

São várias as funções do acabamento superficial das placas de circuito impresso. No entanto, o seu papel fundamental é garantir a soldabilidade (capacidade de soldagem), protegendo o cobre da oxidação e preservando as suas propriedades de modo a não afetar a qualidade da interface formada entre a placa de circuito impresso e o componente eletrônico [10], [13].

Os tipos de acabamento superficial mais utilizados nas placas de circuito impresso são:

- **Immersion Tin** (imersão de estanho) - é depositada uma camada de estanho puro sobre o cobre exposto. O estanho proporciona a proteção do cobre contra a oxidação. Além disso, o estanho possui boa soldabilidade. O estanho forma facilmente compostos intermetálicos com o cobre, o que representa alguns desafios em alguns processos;
- **OSP** (*Organic Solderability Preservative*) - Revestimento orgânico muito fino, utilizado para preservar a soldabilidade do cobre presente na superfície da placa de circuito impresso;
- **NiAu** (*Electroless Nickel/Immersion Gold*) - quimicamente o ouro é o elemento ideal para o acabamento superficial de uma placa de circuito impresso. O ouro não forma óxido, sendo por isso praticamente independente das condições de temperatura que lhe são impostas. Além disso a molhabilidade da solda no ouro é bastante elevada promovendo a soldabilidade deste acabamento superficial. No entanto, o ouro também se dissolve muito rapidamente no cobre, por isso para evitar a mistura dos dois materiais, é depositada uma camada de níquel entre o cobre e o ouro.

Na Tabela 2, encontram-se as espessuras tipicamente utilizadas em cada acabamento superficial.

Tabela 2 - Acabamentos superficiais e espessura típica.

Acabamento superficial	Espessura típica
Immersion Tin	0,6 – 1,2 $\mu\text{m}$
OSP	0,1 – 0,6 $\mu\text{m}$
Electroless Nickel/Immersion Gold	Nickel: 3 - 5 $\mu\text{m}$
	Ouro: 0,05 – 0,15 $\mu\text{m}$



---

## 2.3 Componentes eletrônicos

Na indústria eletrônica, os componentes eletrônicos estão divididos em dois grandes grupos: componentes SMD (*Surface Mount Device*) e componentes TH (*Through Hole*).

### 2.3.1 Componentes SMD

Os componentes SMD são soldados sobre a superfície placa de circuito impresso, após a aplicação da pasta de solda. Estes componentes podem ter várias dimensões, desde componentes muito pequenos (chip 0201 0,3x0,6 mm) até componentes de maiores dimensões (com 30mm de altura).

Na Figura 6 encontram-se representados componentes SMD soldados numa placa de circuito impresso.

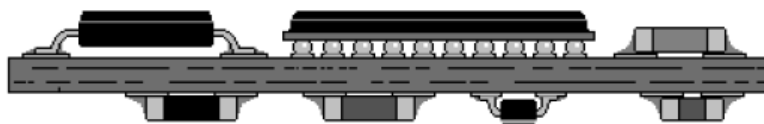


Figura 6 - Componentes SMD [7].

### 2.3.2 Componentes TH

Nos componentes TH, a soldagem não ocorre à superfície da placa de circuito impresso tal como nos componentes SMD. Os componentes TH possuem pinos (normalmente terminais longos) que são inseridos em furos da placa de circuito impresso.

Este tipo de componentes proporciona uma ligação mecânica mais resistente comparada com a estabelecida em componentes SMD, sendo por isso os componentes com maior massa como por exemplo conectores e condensadores.

Uma representação de componentes TH soldados numa placa de circuito impresso pode ser visualizada na Figura 7.

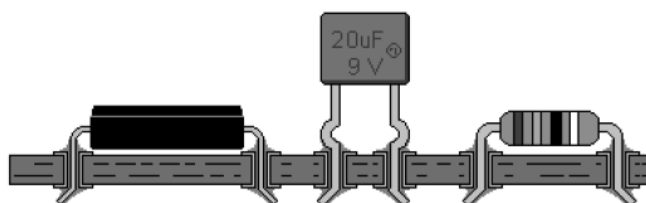


Figura 7 - Componentes TH [7].

---

## 2.4 Métodos de acoplação de componentes eletrónicos à PCB

Os métodos de acoplação de componentes eletrónicos às placas de circuito impresso estão divididos em dois grandes grupos: tecnologia SMD ou tecnologia TH. A tecnologia SMD lida com os componentes SMD, sendo estes soldados nas superfícies das placas de circuito impresso. A tecnologia TH, é dedicada à soldagem de componentes TH, onde ocorre a soldagem em furos existentes na placa de circuito impresso. Existe uma grande variedade de sequências para a acoplação de componentes eletrónicos à placa de circuito impresso. Os métodos, ou a combinação de métodos, escolhidos para um produto dependem dos componentes eletrónicos a serem soldados. Esta escolha tem um impacto substancial no custo final, na facilidade de montagem, na disponibilidade de componentes e a facilidade de processamento posterior como também da inspeção a realizar [10].

As 5 combinações utilizadas são as seguintes:

- *Through-hole*;
- *Through-hole* com *Surface-mount* em um dos lados;
- *Surface-mount* num dos lados da placa;
- *Surface-mount* em ambos os lados da placa;
- *Surface-mount* em ambos os lados da placa e com *through-hole*.

## 2.5 Soldagem

Com o aumento do consumo e desenvolvimento de produtos eletrónicos, o processo de soldagem de componentes à placa de circuito impresso evoluiu a partir do método convencional para métodos com melhor qualidade, fiabilidade, velocidade de processamento e também mais amigos do ambiente, surgindo os métodos de soldagem sem chumbo [14]. O processo de soldagem representa um aspecto fundamental na construção de todos os produtos eletrónicos [15].

A durabilidade e confiabilidade das juntas de solda são cruciais para a funcionalidade e vida útil de um produto eletrónico, tornando-se fundamental que as soldas utilizadas sejam constantemente otimizadas em termos de características físicas e propriedades químicas de modo a fornecer ligações robustas [15].

É reconhecido que as juntas de soldagem representam um potencial ponto de fraqueza em todos os produtos eletrónicos, independente do crescente grau de sofisticação dos sistemas eletrónicos modernos, estes só irão funcionar correctamente se a qualidade das suas interconexões não estiver em causa [15].

---

A soldagem é um processo de união que utiliza um metal de enchimento, a solda, no qual este material irá fundir abaixo dos 425°C. Este é um dos processos mais importantes na indústria eletrónica. Esta tecnologia é utilizada a vários níveis, desde a produção de componentes, onde é feita a soldagem das pastilhas de silício, até à montagem de um produto electrónico, onde é realizada a ligação dos componentes electrónicos à placa de circuito impresso [16].

A soldagem utilizada na indústria eletrónica permite a criação de ligações eléctricas e mecânicas permanentes entre materiais metálicos. O desempenho e qualidade da solda são essenciais para a fiabilidade de uma junta de solda, o que por sua vez é fundamental para garantir o funcionamento do produto [16].

Apesar de existirem vários métodos de soldagem, há quatro pontos comuns a todos eles: metais, solda, fluxo e calor. O objetivo da soldagem é criar uma camada de reacção que confira uma boa ligação entre materiais, resultante da difusão e reacção do metal base com a solda fundida [17].

Relativamente a outros métodos de ligação entre materiais metálicos, a soldagem apresenta a vantagem de necessitar de menos energia em comparação com a brasagem, permite obter uma junta de solda com boa condutividade eléctrica e térmica e possui ainda facilidade de retrabalho e reparação [18].

Os materiais utilizados na soldagem e que afetam de forma crucial o processo de ligação e a qualidade da junta de solda são a solda e o fluxo. A maioria das soldas são ligas à base de estanho por ser um metal com baixo ponto de fusão, além disso as ligas possuem um intervalo de que permite obter um bom controlo do processo para variadas aplicações. Por seu turno, o fluxo também desempenha um papel importante durante a soldagem: o fluxo deve activar-se antes da fusão da solda temperatura de fusão da solda, e tem como função remover os óxidos formados e evitar a oxidação dos materiais metálicos durante o aquecimento bem como promover a molhabilidade das superfícies que se pretendem soldar [18].

Durante o processo de soldagem ocorre a reacção da solda fundida com o substrato, dando origem à formação de compostos intermetálicos na interface. Estes compostos desempenham um papel muito importante na fiabilidade das juntas de solda quando em serviço. As propriedades mecânicas das fases intermetálicas condicionam a qualidade da junta de solda, afetando directamente a resistência à fadiga, resistência à tração e ao corte da junta de solda [19].

Os métodos de soldagem mais comuns na indústria eletrónica são a soldagem por *Reflow*, *Wave soldering* (soldagem por onda) e *Selective soldering* (soldagem seletiva) [17].

## 2.6 Reflow soldering

O processo de soldagem *Reflow* é utilizado para soldar componentes eletrônicos à superfície da placa de circuito impresso. Nesta técnica é utilizada uma pasta de solda, que é constituída pela liga de solda e pelo fluxo [7].

Na Figura 8, encontram-se representadas as várias etapas da soldagem *Reflow*.

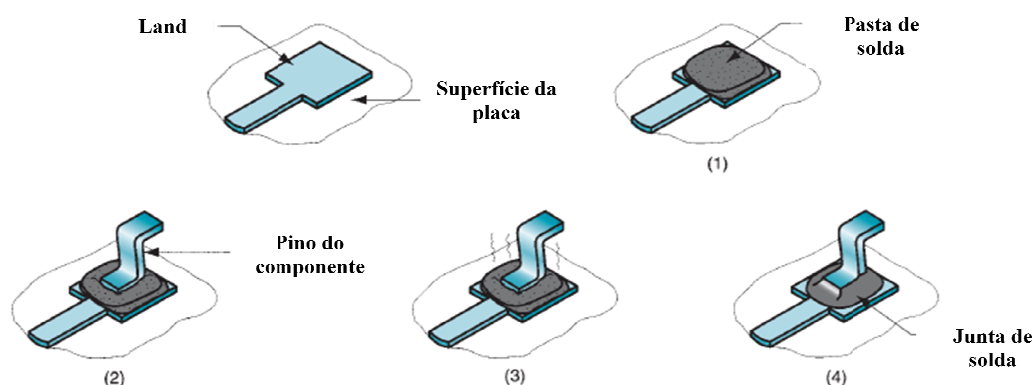


Figura 8 - Sequência representativa do processo de *Reflow* [7].

O processo de soldagem por *reflow* inicia-se com a aplicação da pasta de solda nos pontos onde serão estabelecidos os contatos elétricos entre os componentes e a placa de circuito impresso (Figura 8 (1)).

Após a impressão da pasta, são colocados os componentes eletrônicos recorrendo a máquinas de inserção automática (Figura 8 (2)).

Posteriormente à inserção dos componentes, o conjunto (placa + pasta de solda + componentes) é transportado através do forno de *reflow* (com várias zonas de aquecimento), o processo de soldagem dura cerca de três minutos (Figura 8 (3)). Na primeira fase há o pré-aquecimento do conjunto em que ocorre a ativação do fluxo. Segue-se a fase de *reflow*, onde a temperatura é mantida 30 a 40°C acima da temperatura de fusão da liga durante 30 a 90 segundos. Segue-se depois o arrefecimento e saída do forno (Figura 8 (4)).

Um esquema de um perfil típico de *reflow* é apresentado na Figura 9, embora o perfil exacto de cada produto dependa de produto para produto e da sua complexidade.

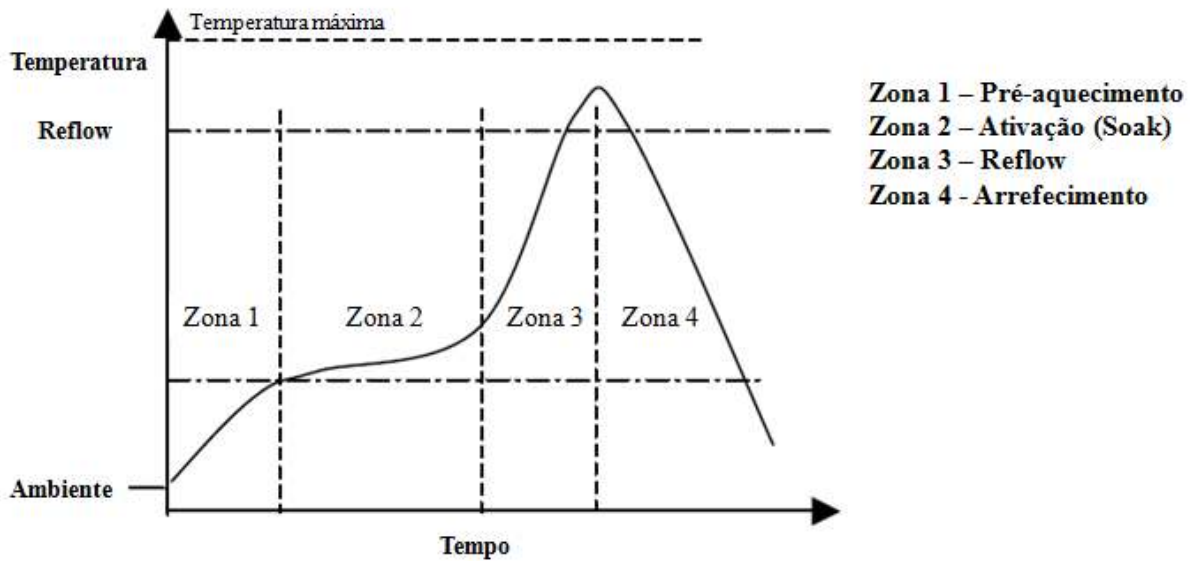


Figura 9 - Esquema de perfil de temperatura utilizado em *Reflow*.

O tempo de permanência no *reflow* depende do número de componentes. Se o tempo de permanência for demasiado curto pode não ocorrer o espalhamento da solda de forma a assegurar uma boa qualidade da junta. Por outro lado, se o tempo de permanência for demasiado longo ou se o período de arrefecimento for alargado, existe a probabilidade da formação de uma camada intermetálica com espessura superior à desejada, conduzindo a uma fragilidade da junta de soldagem [17].

## 2.7 *Wave soldering*

O processo de soldagem por onda (*Wave*) é uma das técnicas utilizadas na soldagem de componentes eletrónicos nas placas de circuito impresso. Este processo envolve bastantes parâmetros ajustáveis que influenciam a qualidade do produto [20].

A soldagem *Wave* é um processo de soldagem automatizado muito utilizado na soldagem de componentes com pinos que atravessem a placa de circuito impresso (componentes do tipo TH) [21].

Neste processo a placa de circuito impresso com os componentes nela inseridos são transportados através de uma “onda” de solda fundida. A soldagem dos componentes eletrónicos à placa de circuito impresso é realizada através do contacto da onda de solda fundida com o conjunto que se pretende soldar (Figura 10).

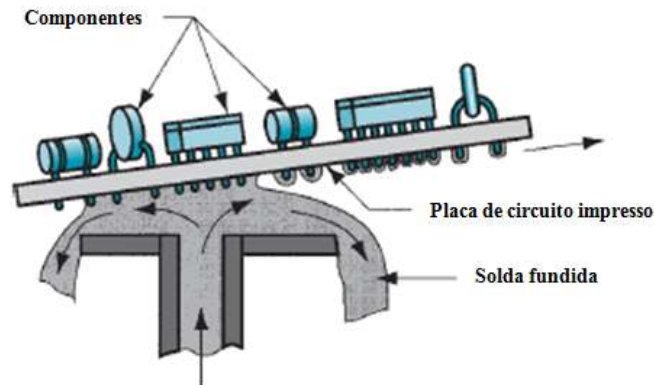


Figura 10 - Representação do processo de soldagem *Wave*. Adaptado de [7].

Os componentes são então inseridos na placa de circuito impresso sendo depois este conjunto transportado através de uma máquina de soldagem *Wave* utilizando um transportador automático (*conveyor*). A placa é suportada pelas suas bordas laterais, para que a superfície inferior da placa esteja exposta para as etapas de processamento seguintes. O processo de soldagem *Wave* pode ser dividido em três etapas principais, representadas na Figura 11.

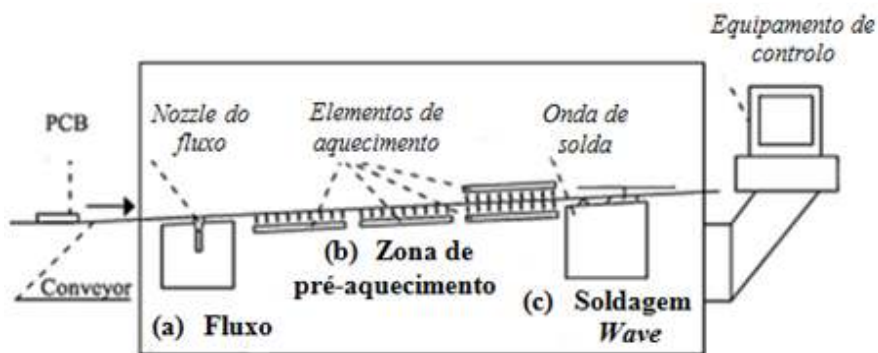


Figura 11 - Representação do processo de soldagem *Wave*.

Na primeira fase de processamento (Figura 11 - fase (a)) a placa a de circuito impresso com os componentes eletrônicos acoplados é transportada pelo *conveyor* através do sistema de fluxo, que é composto pelos dispositivos necessários para fornecer o fluxo como por exemplo a bomba de fluxo onde o fluxo é injectado na superfície inferior da placa de circuito impresso.

Na etapa seguinte (fase b) é realizado um pré aquecimento que normalmente inclui várias zonas de aquecimento. Podem também ser utilizados diferentes tipos de aquecimento tais como, convecção, lâmpadas de infravermelhos e resistências. A finalidade do pré aquecimento é promover a activação do fluxo, remover possível humidade e substâncias indesejadas na placa de circuito impresso, além disso, o pré-aquecimento evita a ocorrência de choques térmicos na realização da fase seguinte.

---

Na terceira e última etapa do processo (fase c) ocorre a soldagem dos componentes à placa de circuito impresso. A soldagem é realizada através do contacto da “onda” de solda fundida com o componente a soldar e a placa de circuito impresso. A solda fundida é bombeada na vertical, formando uma onda que entra em contacto com a superfície inferior da placa de circuito impresso e os componentes inseridos, por capilaridade a solda fundida preenche o furo onde está inserido o pino do componente eletrónico. Depois do furo estar cheio de solda, esta solidifica na zona de arrefecimento, promovendo assim a soldagem do componente eletrónico [20], [7], [14].

## 2.8 *Selective soldering*

O processo de soldagem seletiva é muito semelhante ao processo de soldagem *Wave*. A principal diferença é o facto de a soldagem ocorrer de forma localizada, sendo realizada a soldagem em pontos específicos da placa de circuito impresso.

Tal como no processo de soldagem *Wave*, o processo inicia-se com a colocação do fluxo, seguindo-se o pré-aquecimento e posteriormente a soldagem dos componentes eletrónicos, através de um *nozzle* (bocal) que bombeia a solda fundida presente no reservatório de solda. No entanto, no caso da soldagem seletiva, tanto a aplicação do fluxo como a soldagem são realizadas em locais específicos da placa de circuito impresso.

Existem duas principais tecnologias de soldagem seletiva: a soldagem seletiva multi-onda e mini-onda.

No caso do processo multi-onda há um *nozzle* (bocal) dedicado para cada produto, com as várias aberturas que coincidem com as posições dos componentes TH que se pretendem soldar. A solda líquida é bombeada na vertical através dos *nozzles*, a placa de circuito impresso é colocada em contacto com a solda no estado líquido (Figura 12), ocorrendo a soldagem dos componentes pretendidos.



Figura 12 - Multi-onda.

---

No caso do processo de mini-onda, o reservatório com a solda no estado líquido é movimentado nos três eixos, deslocando-se um mesmo bocal nas diferentes localizações da placa onde estão situados os componentes TH (Figura 13) [22].

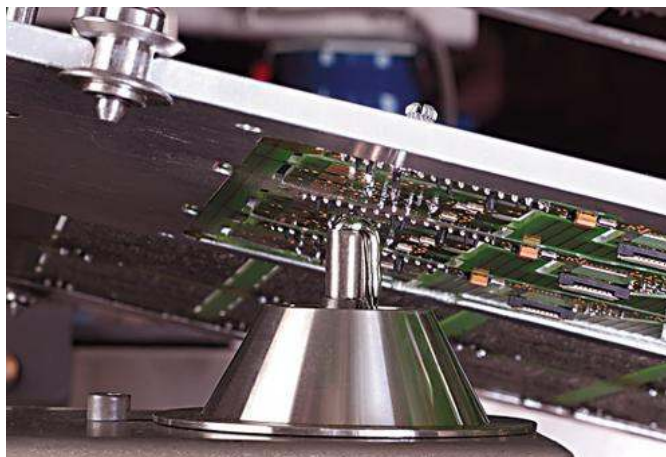


Figura 13 - Mini-onda [23].

## 2.9 Soldagem de componentes *through hole*

As placas de circuito impresso estão divididas em três classes. Estas classes diferenciam-se nos requisitos exigidos para a qualidade das juntas de soldagem dos componentes.

Esta classificação é realizada com base no desempenho que a placa deve ter durante o funcionamento do produto no qual se encontram incorporadas.

As classes estão identificadas como Classe 1, Classe 2 e Classe 3. Quanto mais elevado o número da Classe, maior é a exigência requerida para as juntas de solda, a qualidade das juntas de solda deve ser maior devido às funções mais exigentes/críticas que os produtos em que as placas estão inseridas desempenham.

As 3 classes são descritas da seguinte forma [24]:

- **Classe 1 – Produtos eletrônicos gerais**

Abrange produtos para o consumidor comum. Produtos em que o requisito é o funcionamento completo da placa de circuito impresso.

- **Classe 2 – Produtos eletrônicos para serviços dedicados**

Estão incluídos produtos que requerem um alto desempenho e vida útil prolongada e para os quais é desejado um funcionamento sem interrupções, mas não é crítico.



---

- **Classe 3 – Produtos eletrônicos de alto desempenho**

Inclui produtos em que é exigida um alto desempenho sem interrupções. A performance ininterrupta é um requisito. A falha do equipamento não é tolerada.

De acordo com a classe da placa de circuito impresso, a IPC (*Association Connecting Electronics Industries*) especifica limites para o enchimento de furos na soldagem de componentes TH.

Existem então diferentes limites para o enchimento dos furos para as 3 classes.

O objetivo de enchimento do furo para as Classes 1,2 e 3 é obter após a soldagem do componente um enchimento de 100% (Figura 14) [24].

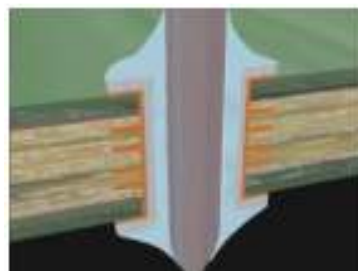


Figura 14 - Enchimento de 100% do furo [24].

O volume mínimo aceitável para o preenchimento do furo após a soldagem dos pinos (terminais) está representado na Figura 15.

O volume de solda aceitável deve ser no mínimo de 75% do preenchimento do furo. É aceitável um total máximo de 25% de depressão [24].

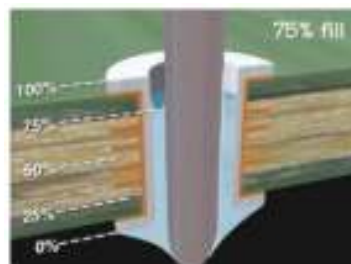


Figura 15 - Mínimo de enchimento aceitável para o furo [24].

Para as Classes 2 e 3, é considerado defeito quando o preenchimento vertical do furo é menor que 75%. Para a Classe 1 não há definição de defeito relativamente ao volume de solda no furo [24].

Estes valores de preenchimento de furo são aqueles que conferem uma boa qualidade à junta de soldagem e asseguram a sua fiabilidade durante o ciclo de vida do produto em que a placa de circuito está integrada.

São vários os factores que podem influenciar a junta de soldagem obtida, mas estes podem dividir-se em dois grupos principais: materiais e processo.

Uma junta de soldagem é o resultado da reacção entre a solda fundida e superfícies sólidas de metal (dos componentes e da placa de circuito impresso). Esta reacção só acontece se a solda líquida atingir directamente os metais das superfícies a soldar, sem intervenções de obstáculos (tais como óxidos). A presença de óxidos nas superfícies a soldar, promovem a diminuição da molhabilidade das superfícies, afectando negativamente a soldabilidade. É importante então garantir que não ocorre a formação de óxidos entre a solda fundida e as superfícies metálicas que se pretende soldar.

Os produtos da reacção entre a solda no estado líquido e os metais presentes nos substratos são conhecidos com compostos intermetálicos. Estes aparecem como uma camada sólida na interface entre os elementos a soldar. Esta camada intermetálica pode ter diferentes características, dependendo das condições de soldagem utilizadas. Esta camada possui influência na qualidade da junta de soldagem formada [13].

As ligas de solda mais utilizadas actualmente na indústria electrónica são constituídas por Sn, Ag e Cu, no entanto a percentagem de cobre é bastante reduzida (cerca de 0,5 % ponderal). Na Figura 16 encontra-se um diagrama de fases da liga Sn-Ag.

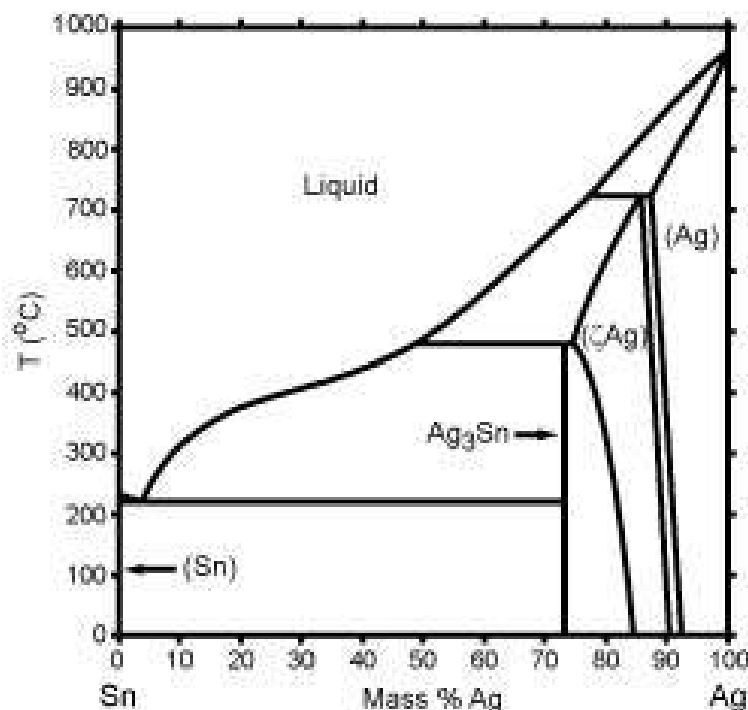


Figura 16 - Diagrama de fases Sn-Ag [25].

A temperatura de *liquidus* das principais soldas utilizadas na indústria electrónica (SAC305 e SAC405) é de 217°C.

Com base na quantidade de prata presente nas ligas de solda e nas temperaturas utilizadas,  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  é um dos compostos intermetálicos que pode ser formado nas juntas de soldagem.

---

### 3. CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A parte experimental deste trabalho iniciou-se com a determinação dos parâmetros a serem avaliados nos ensaios experimentais. Para isso, e com base nos objetivos deste trabalho, foram selecionados os componentes eletrônicos a serem soldados e foi desenhada uma placa de circuito impresso para o teste. Posteriormente, a placa de circuito impresso e os componentes eletrônicos foram soldados numa das linhas de produção da *Bosch Car Multimedia*, sendo depois analisadas as juntas de soldagem.

#### 3.1 Materiais utilizados

##### 3.1.1 Placa de circuito impresso

A placa de circuito impresso de teste tem como material dielétrico FR4 (compósito de resina epóxi com fibra de vidro), camadas condutoras de cobre e como acabamento superficial OSP (*Organic Solderability Preservatives*). A espessura das camadas internas de cobre é de 18 $\mu$ m. A parte interna da placa de circuito impresso de teste encontra-se representada em detalhe na Figura 17.

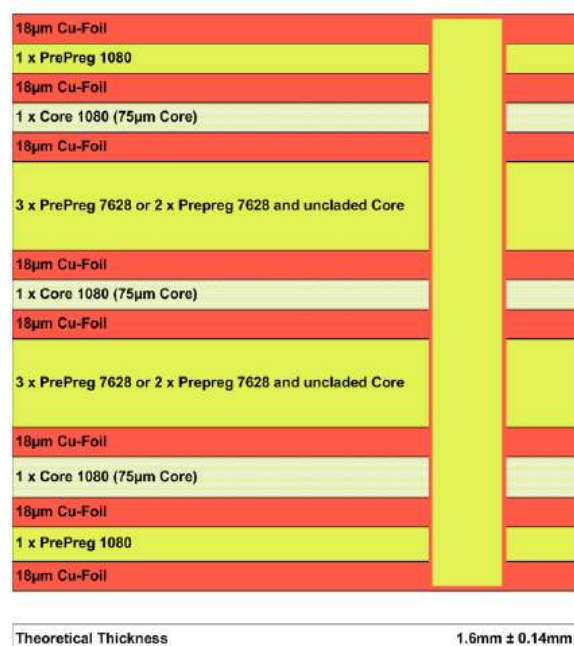


Figura 17 - Placa de circuito impresso de teste.

A placa de circuito impresso foi concebida para soldar dois tipos de componentes selecionados para a realização do teste experimental: conector e condensador eletrolítico. Estes dois componentes são distintos, quer em dimensões, quer nos materiais que os constituem. São componentes muito utilizados no processo de soldagem seletiva e representam alguns dos os

---

componentes que apresentam maior desafio no processo de soldagem. Assim, utilizando-se estes componentes e se estes conseguirem cumprir os requisitos de soldagem, os outros componentes que apresentam menor dificuldade na sua soldagem também conseguirão ser soldados utilizando-se os parâmetros testados.

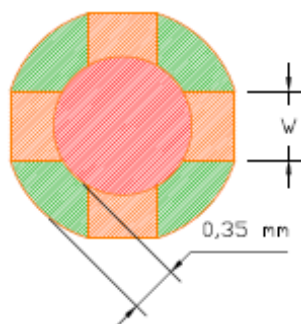
Com a realização deste teste experimental pretende-se compreender a influência da dissipação térmica da placa de circuito impresso nas características das juntas de soldagem, principalmente qual o efeito no enchimento dos furos onde são inseridos os componentes eletrônicos que se pretendem soldar.

Foram consideradas duas variáveis das placas de circuito impresso que têm influência na dissipação térmica da placa durante o processo de soldagem seletiva: largura das pistas de cobre (*track width*) e o número de camadas condutoras (*layers*) ligadas a um furo e a forma com estão ligadas.

- **Largura das pistas de cobre**

Com o intuito de se avaliar o efeito da largura das pistas de cobre na dissipação térmica da placa foram produzidos 3 tipos de placas com diferentes larguras de pista de cobre.

As larguras utilizadas foram de 0,5; 0,8 mm e 1 mm. Para cada uma das condições foram produzidas 50 placas. Na Figura 18 encontra-se representado um furo utilizado nas placas de circuito impresso onde é inserido um terminal (pino) dos componentes TH.



**Figura 18 - Furo.**

Na Figura 19, está representada a placa de circuito impresso com largura de pista de 1 mm.

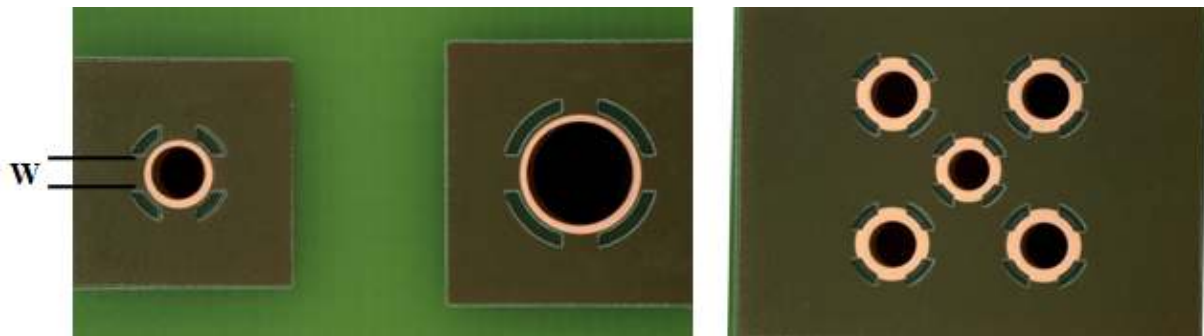


Figura 19 - Placa de circuito impresso com de 1mm de largura de pista.

- **Número de camadas condutoras**

De modo a ser estudada a influência do número de camadas condutoras na dissipação térmica bem como o seu efeito no enchimento do furo, realizaram-se dez versões diferentes para cada componente. A distribuição de camadas por cada versão encontra-se na Tabela 3.

Em cada uma das versões ou foi alterado o número de camadas ligadas ao furo, ou manteve-se o número de camadas mas a forma como estas estão ligadas foi modificada, como pode ser visualizado na versão 4, versão 5 e versão 6: o número de camadas é o mesmo mas a sua ligação é diferente. Assim pretende-se estudar se existe influência da posição de ligação das camadas no enchimento dos furos.

Tabela 3 - Distribuição de camadas condutoras em cada versão.

	Versões									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Layer La1</b>				X				X		X
<b>Layer 2</b>					X		X	X	X	X
<b>Layer 3</b>						X	X		X	X
<b>Layer 4</b>									X	
<b>Layer 5</b>									X	
<b>Layer 6</b>			X			X	X		X	X
<b>Layer 7</b>		X	X		X		X	X	X	X
<b>LayerLu</b>	X	X	X	X				X		X

A camada La1 é a camada condutora presente na superfície superior da placa de circuito impresso e a camada Lu, é a camada condutora presente na superfície inferior da placa de circuito impresso. As camadas de 2 a 7 são camadas internas presentes na placa.

Na Figura 20, encontra-se representada a camada superior da placa (La1 ou camada *top*). As versões representadas na Figura 20 correspondem aos dados apresentados na Tabela 3.

Nesta figura, pode ainda observar-se que as versões que possuem cobre (ligação a esta camada), são as versões 4, 8 e 10 de ambos componentes.

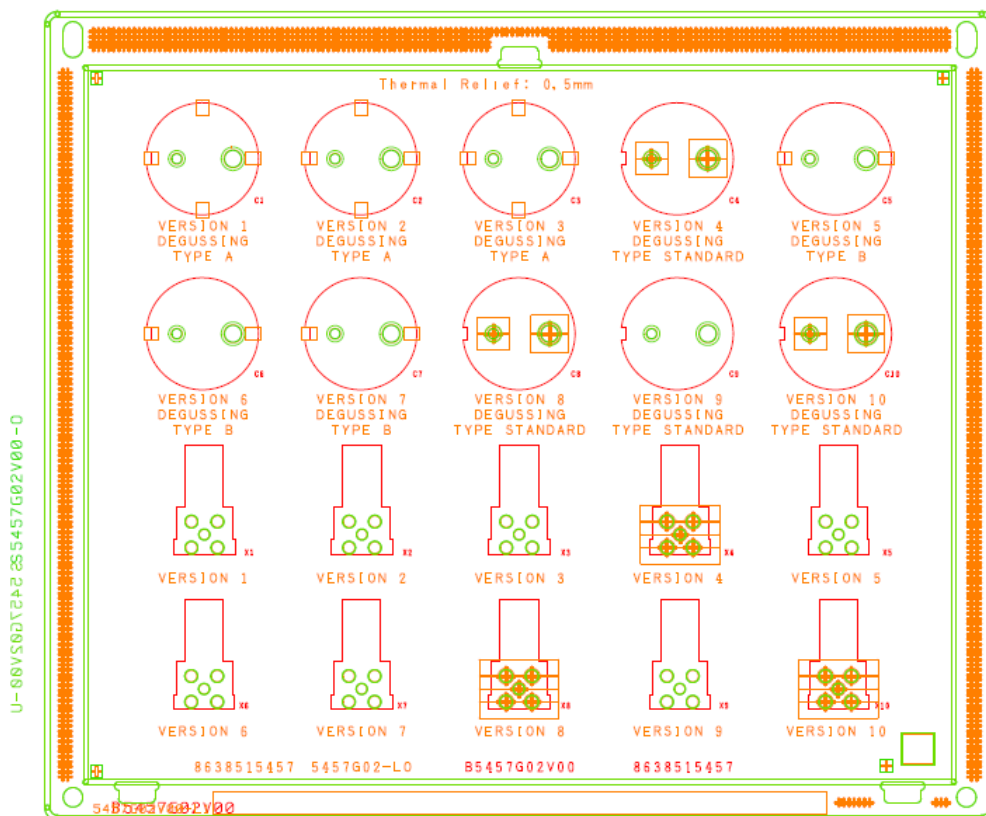


Figura 20 - Representação da camada La1.

Na Figura 21, está representada a parte inferior da placa (*camada bottom*). É possível verificar-se quais as versões dos componentes que possuem ligação a esta camada (nas versões com ligação a esta camada pode ser observado na figura um quadrado cor de laranja ao redor dos furos).

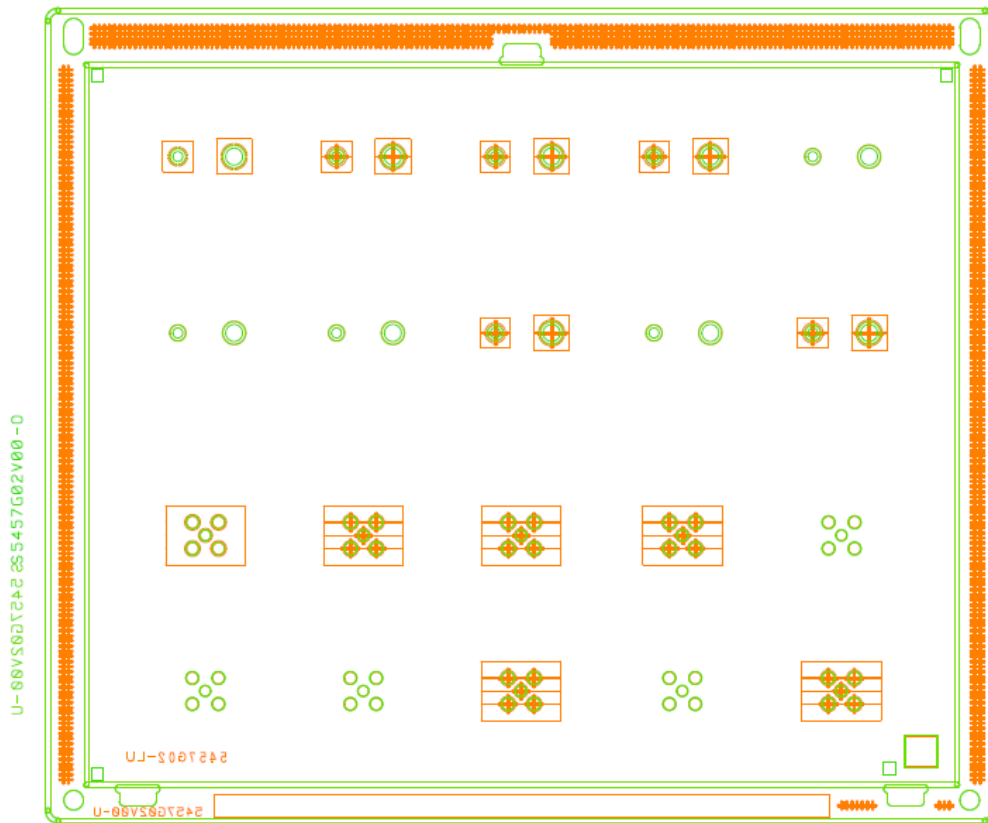


Figura 21 - Representação da camada Lu.

### 3.1.2 Componentes

Tal como mencionado anteriormente, neste teste foram utilizados dois componentes *through hole* diferentes. Um componente com dois pinos e outro com 5 pinos.

Foi utilizado um condensador eletrolítico (Figura 22), sendo este um dos componentes com maiores dimensões utilizados nos produtos produzidos na Bosch Car Multimedia. Devido ao seu tamanho e à sua composição, este componente provoca elevada dissipação térmica durante o processo de soldagem.



Figura 22 - Condensador eletrolítico.

Na Figura 23, apresenta-se o desenho técnico do condensador eletrolítico utilizado e as suas dimensões encontram-se na Tabela 4.

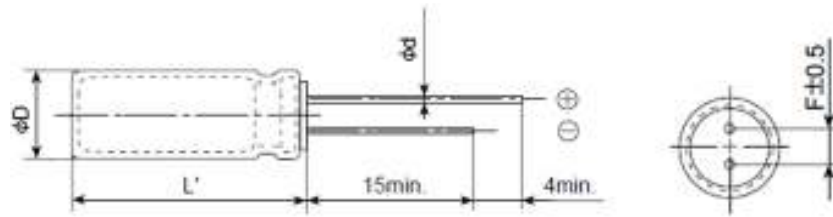


Figura 23 - Desenho mecânico do condensador eletrolítico.

Tabela 4 - Dimensões do componente.

Capacidade ( $\mu\text{F}$ )	$\varnothing D$ (mm)	L (mm)	$\varnothing d$ (mm)	F (mm)
22,000	22	40	1	10

Foi também utilizado um conector, uma vez que representa uma parte significativa dos componentes mais utilizados no processo de soldagem seletiva. Este componente é constituído por materiais diferentes dos que são utilizados no condensador eletrolítico, apresentando conseqüentemente propriedades térmicas distintas. O conector encontra-se representado na Figura 24. O desenho mecânico do componente encontra-se na Figura 25.



Figura 24 - Conector.

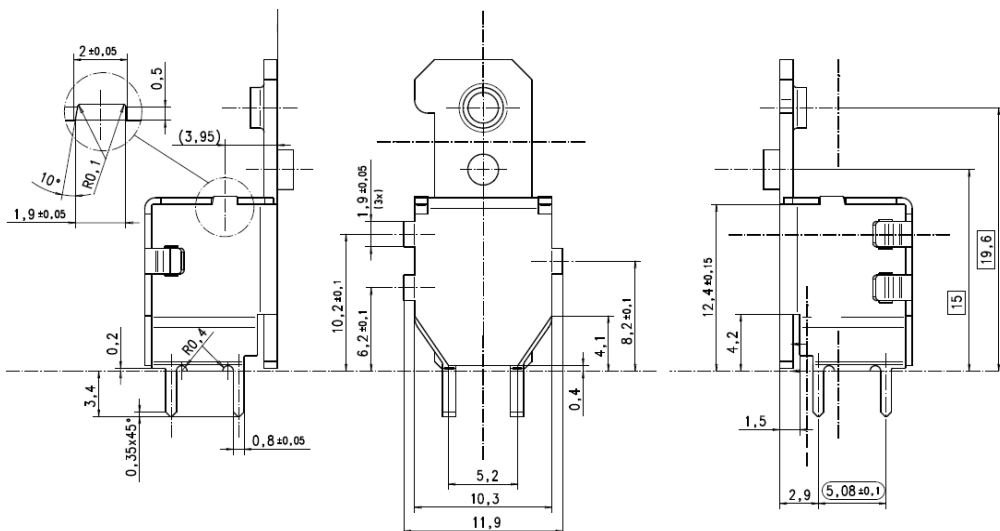


Figura 25 - Desenho mecânico do conector.



---

Este condensador possui 5 pinos, 4 pinos na periferia (pinos de massa), sem tratamento superficial e um pino central (pino de sinal) com acabamento superficial (metalização).

Com a utilização destes dois componentes pretende-se avaliar qual a influência do tipo de componente e dos materiais que os constituem na dissipação térmica durante o processo de soldagem seletiva e conseqüentemente a sua influência na junta de soldagem formada.

### 3.1.3 Procedimento experimental

Na maior parte dos produtos eletrônicos fabricados para Car Multimedia os componentes SMD são soldados através do processo de *reflow* e posteriormente os componentes do tipo TH são soldados pelo processo de soldagem *wave* ou soldagem seletiva.

É normalmente realizado um ciclo de *reflow* para a soldagem de componentes SMD na face superior da placa de circuito impresso. Posteriormente é realizado outro ciclo de *reflow* para a soldagem de componentes SMD na outra face da placa.

Para a colocação de componentes TH de grandes dimensões que não podem ser aplicados em *reflow*, utiliza-se o processo de soldagem *wave* ou soldagem seletiva.

De modo a serem obtidos resultados fiáveis e de forma a reproduzir o que acontece na produção dos produtos comercializados, as placas sofreram processo de *reflow*. Na Figura 26, encontra-se o forno de *reflow*.



Figura 26 - Forno de *reflow*.

Assim, as placas de teste passaram por dois ciclos de *reflow*, de forma a simular o ciclo térmico que ocorre durante a soldagem de componentes SMD nas superfícies *top* e *bottom* das placas.

Com a realização dos ciclos térmicos de *reflow*, os efeitos deverão ser idênticos aos que ocorrem na produção de um produto, provocando-se a oxidação do acabamento superficial da placa de circuito impresso que ocorre durante a exposição aos ciclos térmicos de *reflow*.

---

A velocidade do *conveyor* foi de 80 cm/min. O forno possui 7 zonas distintas, que se encontram a diferentes temperaturas. As temperaturas utilizadas em cada uma das zonas do forno de *reflow* encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Temperaturas nas zonas do forno de *reflow*.

Zona do forno	1	2	3	4	5	Pico 1	Pico 2
Temperatura (°C)	120	150	170	180	190	210	250

Com a temperatura imposta nos ciclos de *reflow*, as placas de circuito impresso oxidam, uma vez que a camada orgânica que protege o cobre é parcialmente destruída, perdendo parte das suas propriedades na protecção do cobre. Além disso, numa produção normal pode haver até 5 dias de intervalo entre os ciclos de *reflow* e a soldagem seletiva (devido a indisponibilidade das linhas de produção). Esta sequência de passos leva a uma replicação das condições menos favoráveis que podem decorrer durante a produção, uma vez que com a oxidação a molhabilidade da superfície da placa diminui. Assim, os resultados obtidos serão semelhantes às condições reais que se verificam no processo de fabrico de um produto, pois se as condições fossem distintas, os dados obtidos não poderiam ser transpostos para casos reais de produção.

#### 3.1.4 Soldagem seletiva

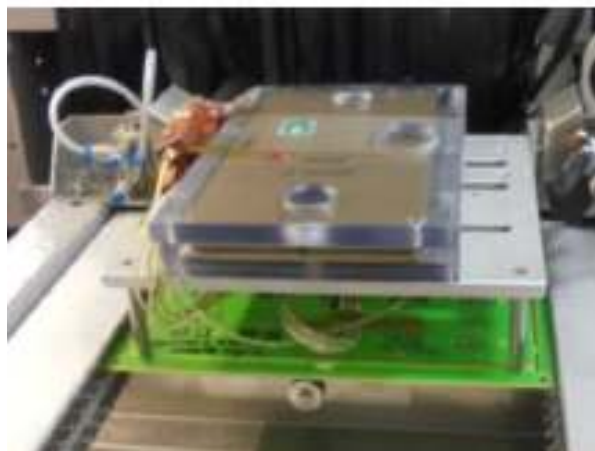
Após a realização dos ciclos de *reflow*, os componentes eletrónicos foram soldados através do processo de soldagem seletiva numa máquina específica para este processo. Esta máquina possui as diferentes zonas onde ocorrem as etapas do processo: colocação de fluxo, pré-aquecimento e soldagem.

Os componentes eletrónicos que se pretendem soldar foram inseridos manualmente na placa de teste. Na Figura 27 encontram-se duas placas de circuito impresso com os componentes inseridos.



**Figura 27 -Componentes inseridos nas placas de circuito impresso.**

O processo de soldagem seletiva inicia-se com a colocação do fluxo na superfície inferior das placas, nas zonas onde deve ocorrer a soldagem. O fluxo utilizado foi Cobar 94QMB (REL0), sendo aplicado no estado líquido. A Figura 28 mostra a placa de circuito impresso sob a estação onde ocorre a aplicação do fluxo.

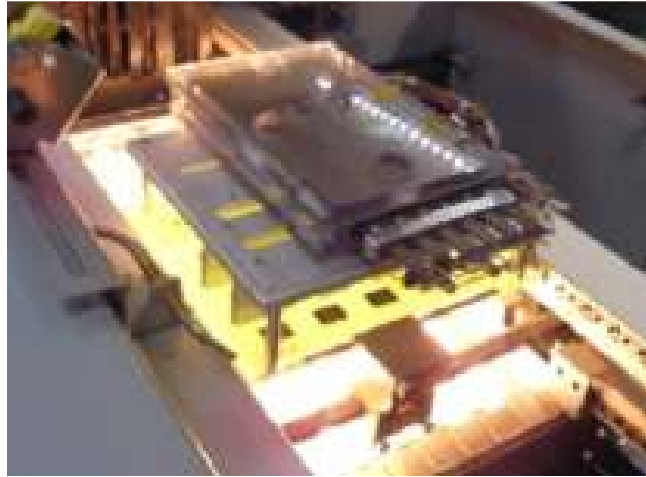


**Figura 28 - Aplicação do fluxo.**

Após a aplicação do fluxo, segue-se a fase de pré-aquecimento, em que o fluxo é ativado promovendo a remoção de filmes de óxidos formados.

O pré-aquecimento foi realizado através da convecção forçada de ar e de lâmpadas de infravermelhos e teve uma duração de 60 segundos. As placas permaneceram 20 segundos em cada uma das estações de pré-aquecimento, tendo sido utilizadas duas estações de convecção forçada e uma estação de lâmpadas de infravermelhos.

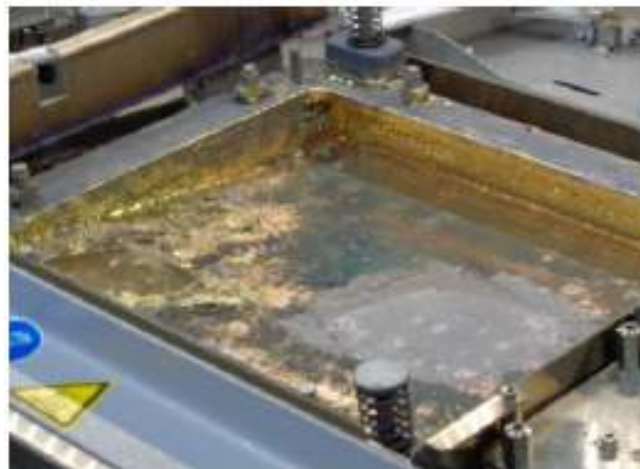
Na Figura 29 pode ver-se a placa de circuito impresso sob a zona onde ocorre o pré-aquecimento através de lâmpadas de infravermelhos.



**Figura 29 - Placa de circuito impresso sobre a zona de pré-aquecimento.**

Na terceira e última fase da soldagem seletiva ocorre efectivamente a soldagem dos componentes à placa de circuito impresso. Nesta fase ocorre o contacto da solda no estado líquido com os terminais dos componentes eletrónicos e através da capilaridade ocorre o preenchimento dos furos onde os terminais dos componentes se encontram e promovendo a sua soldagem.

A solda líquida encontra-se num reservatório com capacidade de 400 kg de solda líquida. Na Figura 33 pode ser visto o banho de solda contido no recipiente.



**Figura 30 - Banho de solda.**

A solda utilizada no teste foi a solda SAC305 96,5% Sn; 3% Ag; 0,5% Cu (%ponderal) sendo a sua temperatura de *liquidus* de 217°C [26]. A temperatura do banho de solda (Figura 30) é de 300°C.

O reservatório onde se encontra o banho de solda é coberto por uma placa de aço. Esta ferramenta possui aberturas (*nozzles*) apenas nas zonas correspondentes à placa de circuito impresso onde se irá realizar a soldagem (furos na placa onde são inseridos os terminais dos componentes a

---

soldar). Cada tipo de placa de circuito impresso possui uma ferramenta a ela associada, pois dependendo da placa que se pretende soldar, existem componentes TH diferentes e em diferentes posições. Assim, para a placa de teste concebida, foi criada uma ferramenta associada a esta placa.

Na Figura 31 encontra-se a ferramenta correspondente à placa de circuito impresso utilizada neste teste. Nesta figura podem ser visualizados os tipos de *nozzle*: *nozzle 1* e *nozzle 2*, cada tipo de componente tem um tipo de *nozzle* a ele associado sendo o *nozzle 1* utilizado nos condensadores eletrolíticos e o *nozzle 2* nos conectores.

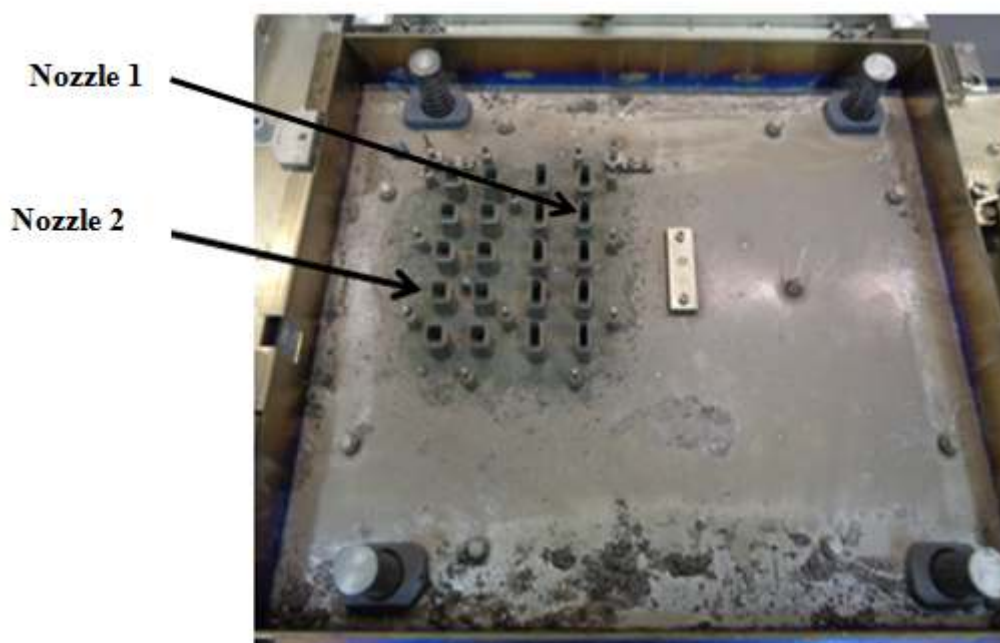


Figura 31 - Ferramenta utilizada na soldagem seletiva.

Durante o processo de soldagem seletiva, a placa de circuito impresso é encaixada na ferramenta através de pinos guia, ficando em contacto com os *nozzles*. Posteriormente a solda no estado líquido é bombeada na vertical (para cima), passando através dos *nozzles*.

Na Figura 32 é possível observar-se o banho de solda a ser bombeado através dos *nozzles*. É possível ainda visualizar-se uma placa metálica em redor dos *nozzles*. Existe ainda uma proteção plástica acima desta placa metálica. Entre a placa metálica a proteção plástica é a zona onde o banho de solda é bombeado. Nesta zona a atmosfera é controlada, sendo composta por um gás inerte (azoto) de forma a evitar formação de óxidos na solda e nas superfícies a soldar. Esta atmosfera de azoto evita a oxidação do banho de solda quando este é bombeado através dos *nozzles* e estabelece contacto com a placa de circuito impresso.



**Figura 32 - Solda a ser bombeada através dos *nozzles*.**

Na fase de soldagem o tempo de contacto entre o banho de solda e a placa de circuito impresso foi de cinco segundos.

De forma a compreender o impacto das variáveis (componentes e placa de circuito impresso) na dissipação térmica durante o processo de soldagem seletiva, procedeu-se à recolha de dados térmicos durante o processo de soldagem. Para isso foram utilizados termopares do tipo K.

Foram recolhidos dados térmicos nos diferentes componentes, nos diferentes tipos de placa de circuito impresso utilizada (largura de pista = 0,5; 0,8 e 1 mm) e ainda nas diferentes versões dos componentes com variação do número de camadas de cobre ligadas aos furos.

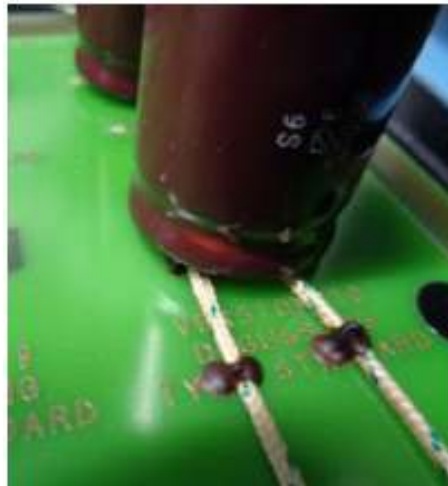
Os termopares foram colocados de modo a garantir que todos seriam colocados nas mesmas posições relativamente ao componente e à placa de circuito impresso. A posição dos termopares é importante para garantir que as medições realizadas são reprodutíveis e referem-se sempre à mesma localização, podendo efectuar-se comparações entre elas.

Para as medições térmicas foram colocados dois termopares em cada componente: na superfície inferior e outro na superfície superior da placa de circuito. Com esta disposição de termopares, o que se pretende é registar o intervalo de temperatura entre a superfície inferior e superior da placa de circuito impresso. A análise destes dados permite avaliar a influência das variáveis utilizadas neste teste (número de camadas condutoras, largura de pista e tipo de componente) na junta de soldagem.

Um dos termopares foi colocado junto a um dos pinos do componente (em contacto com o pino) e em contacto com a placa de circuito impresso na superfície inferior da placa de circuito impresso. O outro termopar foi colocado também junto do mesmo pino do componente, mas foi posto em contacto com a superfície superior da placa de circuito impresso. Os termopares foram fixados à placa de circuito impresso com cola.

---

Os termopares colocados num condensador eletrolítico na superfície superior da placa de circuito impresso podem ser visualizados na Figura 33. Teve de ser realizado um furo de 1,7 mm na placa de circuito impresso (por baixo do componente) para se poder passar um termopar para a superfície inferior da placa de circuito impresso, para se efectuarem as medições nesta superfície da placa.



**Figura 33 - Colocação do termopar na superfície superior da placa de circuito impresso.**

Na Figura 34 pode ser visualizado o termopar na superfície inferior da placa de circuito impresso.



**Figura 34 - Termopar colocado na superfície inferior da placa de circuito impresso.**

Na Figura 35 encontra-se uma placa de circuito impresso com termopares colocados em conectores.

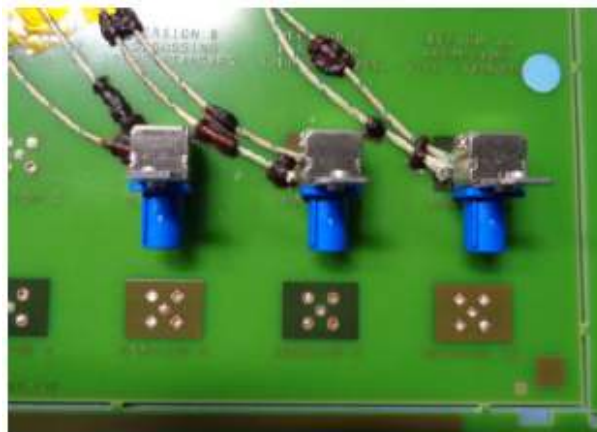


Figura 35 - Colocação de termopares nas diferentes versões no conector.

Os perfis térmicos foram avaliados em cada uma das dez versões do conector na placa de circuito impresso com 1 mm de largura de pista. Para os conectores foram ainda realizadas medições nas placas com 0,5 e 0,8 mm de largura de pista. Nestas versões de placas apenas foram realizados perfis térmicos nas versões 1, 5 e 10 do conector. No caso do condensador eletrolítico, os dados térmicos recolhidos referem-se às versões 1, 5 e 10 das placas com 0,5 e 1mm de largura de pista. Os termopares foram estrategicamente colocados nas placas de circuito impresso. Cada placa de circuito impresso pode ter no máximo 6 termopares pois é o número máximo de entradas do equipamento de aquisição dados usado neste trabalho - *Super M.O.L.E. Gold*, apresentado na Figura 36. Devido ao facto do equipamento de aquisição de dados necessitar de acompanhar a placa durante o processo (devido à ligação com os termopares), foi concebido um suporte em policarbonato e alumínio para colocação do equipamento. Este suporte pode ser visualizado na Figura 36.

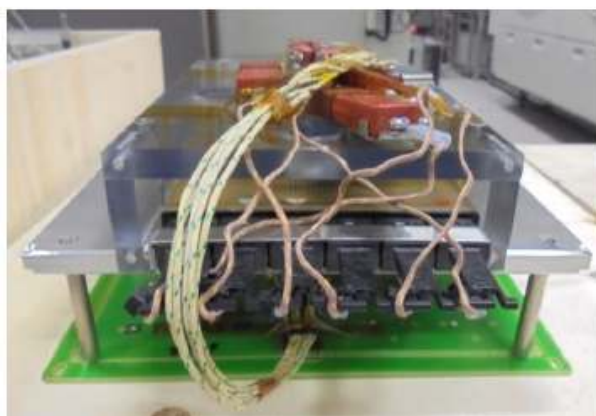


Figura 36 - Equipamento de aquisição de temperatura (*Super M.O.L.E. Gold*).

- **Controle do enchimento dos furos**

Com o objectivo de avaliar a influência dos diversos parâmetros do teste, as juntas de soldagem foram inspecionadas e analisadas.



---

A inspeção foi realizada de diferentes formas. Foi utilizado o microscópio ótico de forma a verificar o enchimento dos furos à superfície das placas de circuito impresso (nas extremidades dos furos). Recorreu-se também ao uso de raios-x para controlar o enchimento dos furos bem como para detectar defeitos nas juntas de soldagem (tais como poros). De forma a verificar o enchimento no interior dos furos foi realizada inspeção através de microscópio ótico a cortes seccionais realizados nas amostras.

- **Caracterização microestrutural**

Para realizar a caracterização microestrutural das juntas de soldagem formadas recorreu-se à Microscopia Eletrónica de Varrimento e micro análise por Espetroscopia de Dispersão de Energia. O equipamento utilizado foi um MEV de alta resolução equipado com um sistema de micro análise (NanoSEM – FEI Nova 200 (FEG/SEM) EDAX – Pegasus X4M (EDS/EBSD). Com estas técnicas pretende-se avaliar a junta de soldagem em termos de fases, compostos intermetálicos formados e composição química.

A caracterização microestrutural foi realizada no SEMAT/UM da Universidade do Minho.



---

## 4. CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos perfis térmicos recolhidos durante o teste experimental. Posteriormente são apresentadas as análises realizadas às juntas de soldagem, onde é avaliado o enchimento dos furos. Por fim é apresentada a caracterização estrutural realizada nas juntas de solda dos diferentes tipos de componentes utilizados.

### 4.1 Perfis de temperatura

Tal como referido no procedimento experimental, no teste realizado foram recolhidos dados térmicos durante o processo de soldagem seletiva nos dois componentes utilizados no teste.

#### 4.1.1 Conector

No caso do conector, os perfis de temperatura foram recolhidos em 10 placas de circuito impresso, de forma a serem registadas informações sobre os dois tipos de componentes e das versões com diferente de número de camadas condutoras.

A Figura 37 mostra um perfil térmico típico do processo de soldagem seletiva. Neste perfil, foram registados os dados térmicos em 6 termopares. Dois termopares encontram-se à superfície da placa de circuito impresso (um na superfície inferior e outro na superfície superior). Os restantes termopares encontram-se colocados nas versões 9 e 10 dos conectores. Em cada um dos componentes são utilizados dois termopares, um colocado junto ao pino na superfície inferior da placa e outro junto ao pino, mas na superfície superior da placa de circuito impresso. A placa de circuito impresso utilizada na medição deste perfil térmico foi possui 1 mm de largura de pista.

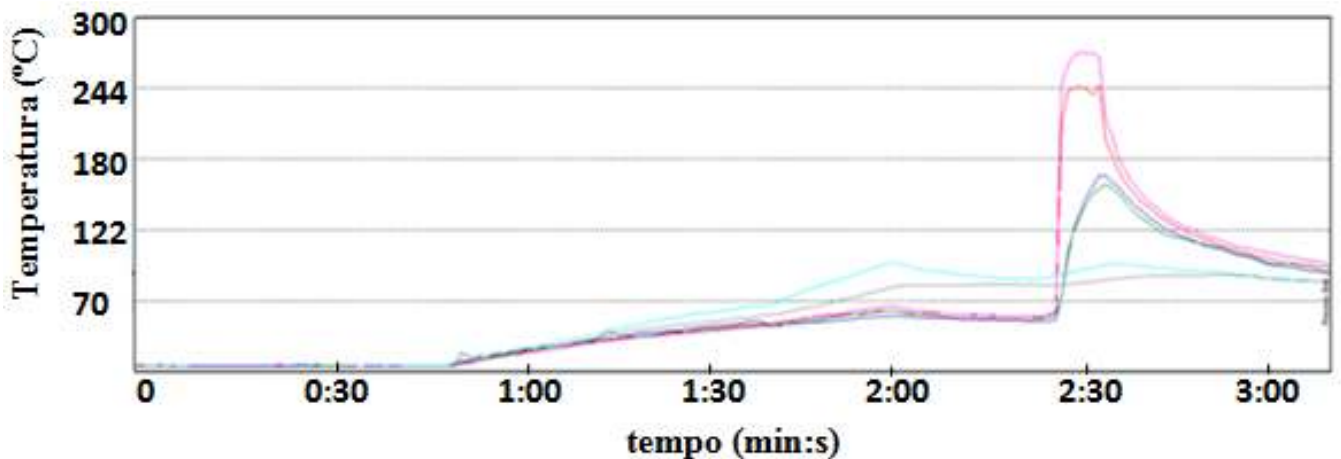


Figura 37 - Perfil térmico obtido na placa de circuito impresso e na versão 9 e 10 do conector.

A identificação dos termopares utilizados no perfil apresentado na figura encontra-se na Tabela 6, assim como o valor de temperatura máxima registado em cada um dos termopares.

Tabela 6 - Identificação dos termopares.

	Identificação do termopar	Temperatura máxima (°C)
	Conector V10 – parte inferior	246,7
	Conector V10 – parte superior	175,6
	Conector V9 – parte inferior	273,3
	Conector V9 – parte superior	168,3
	PCB – parte inferior	106,7
	PCB - parte superior	96,7

Através do perfil de temperatura é possível verificar-se que o processo se inicia à temperatura ambiente (20°C) e que a temperatura se mantém constante durante cerca de 50 segundos. Esta etapa corresponde à colocação de fluxo na placa de circuito impresso. Esta etapa não possui qualquer tipo de influência térmica na placa de circuito impresso.

Após a colocação do fluxo há um ligeiro aumento da temperatura, que está associado à fase de pré-aquecimento, que tem como principal objetivo promover a activação do fluxo bem como evitar choques térmicos durante a fase de soldagem. O pré-aquecimento é realizado através de convecção forçada de ar e de lâmpadas de infravermelhos. Na parte inicial do pré-aquecimento verifica-se que a taxa de aquecimento é muito semelhante tanto para os conectores como para a PCB, uma vez que nesta fase o pré-aquecimento este é realizado através de convecção forçada, sendo um método de distribuição homogénea de calor. Após cerca de 30 segundos de pré-aquecimento é

---

possível verificar-se que a taxa de aquecimento das superfícies da placa de circuito impresso é superior à registada nos pinos dos componentes. Verifica-se ainda que após o início do pré-aquecimento com lâmpadas de infravermelhos (40 segundos de pré-aquecimento), a temperatura da superfície inferior da placa de circuito impresso atinge temperaturas superiores às obtidas na superfície superior. Isto deve-se ao facto de as lâmpadas de infravermelhos estarem colocadas na parte inferior da placa de circuito impresso e assim sendo a superfície inferior da placa fica direccionada para as lâmpadas de infravermelhos, aquecendo mais rapidamente. A superfície superior da placa de circuito impresso aquece por condução de calor através da placa de circuito impresso.

Após a fase de pré-aquecimento, observa-se um significativo aumento de temperatura nos pinos dos componentes, atingindo-se a temperatura máxima. Nesta fase ocorre a soldagem dos componentes, onde a solda, a 300°C, entra em contacto com a placa de circuito impresso e com os terminais do componente a soldar e preenche os furos onde os pinos dos componentes se encontram inseridos. A solda a 300°C fica em contacto com a placa de circuito impresso e os terminais do componente durante 5 segundos. Nesta fase verifica-se que nos terminais dos componentes na superfície inferior da PCB a temperatura é superior à registada nos terminais dos componentes na superfície superior da placa de circuito impresso. Relativamente às placas de circuito impresso a temperatura mantém-se muito semelhante à da fase de pré-aquecimento. Uma vez que a solda em estado líquido só entra em contacto com as zonas que se pretendem soldar, através dos *nozzles*, a placa de circuito impresso não possui qualquer variação térmica. Após a soldagem, a placa de circuito impresso deixa de estar em contacto com a solda no estado líquido e ocorre o arrefecimento do conjunto até à temperatura ambiente.

Os resultados mostram que na placa de circuito impresso há uma diferença de aproximadamente 10°C entre a temperatura máxima obtida na superfície inferior e a superfície superior. A temperatura máxima da placa de circuito impresso foi obtida na fase de pré-aquecimento. Quanto aos componentes, a versão 10 do conector atinge na superfície inferior uma temperatura inferior à atingida na versão 9, no entanto, na superfície superior foi alcançada uma temperatura mais elevada que na versão 9. Este fenómeno poderá estar relacionado com o nozzle da versão 10, podendo este encontrar-se ligeiramente mais afastado da placa de circuito impresso, pois na superfície inferior, as temperaturas máximas atingidas devem ser próximas uma vez que esta temperatura corresponde a uma temperatura muito semelhante à temperatura do banho de solda.

Para todas as versões de diferentes camadas condutoras do conector (de V1 a V10) foram recolhidos perfis térmicos na placa de circuito impresso de 1mm de largura de pista.

Na Tabela 7 encontram-se os dados obtidos em todas as versões do conector na placa com 1mm de largura de pista. Na tabela encontram-se presentes as temperaturas máximas obtidas na parte superior e inferior de cada uma das versões. Além disso encontra-se também para cada versão a diferença (*gap*) de temperatura entre a parte inferior e superior da placa de circuito impresso para cada um dos componentes. Nas versões em que foi realizada mais que uma medição, pode visualizar-se o valor médio obtido bem como o desvio padrão.

**Tabela 7 - Temperaturas obtidas no conector em placa de circuito impresso de 1mm.**

<b>Conector – placa de circuito impresso com 1 mm de largura de pista</b>					
<b>Versão</b>	<b>Parte inferior (°C)</b>		<b>Parte superior (°C)</b>		<b>Gap de temperatura (°C)</b>
	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desvio padrão (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desvio padrão (°C)</b>	
1	280,60	-	150,00	-	<b>130,60</b>
2	281,10	-	196,10	-	<b>85,00</b>
3	281,65	0,78	185,85	1,20	<b>95,80</b>
4	282,80	1,56	192,50	1,98	<b>90,30</b>
5	271,70	-	150,00	-	<b>121,70</b>
6	281,65	7,85	173,60	1,13	<b>108,05</b>
7	243,05	5,16	165,55	3,89	<b>77,50</b>
8	276,65	6,29	198,05	2,76	<b>78,60</b>
9	277,78	3,95	167,23	7,02	<b>110,55</b>
10	243,33	2,74	178,35	1,91	<b>64,98</b>

De um modo geral verifica-se que as temperaturas obtidas na superfície inferior da placa de circuito impresso são bastante próximas para a maior parte dos componentes, com a exceção dos componentes da versão 7 e 10 que possuem temperaturas significativamente mais baixas. Relativamente à temperatura máxima atingida na parte superior da placa verifica-se que há uma maior variação de temperatura. O valor mínimo obtido é de 150°C e é atingido nas versões 1 e 5 enquanto os valores mais elevados são atingidos nas versões 2 e 8. Quanto aos *gap* de temperatura a versão 1 obteve o *gap* de temperatura mais elevado com 130,60°C entre as duas superfícies da placa. O *gap* mais baixo foi alcançado na versão 10 com 64,98°C.

Na versão 1, com apenas uma camada de cobre, a temperatura atingida é inferior à temperatura atingida na parte superior da versão 2 (com duas camadas de cobre). Este pode ser um indicador que as camadas de cobre promovem a transferência de calor no sentido vertical do furo onde o terminal do componente se encontra inserido. Quanto à superfície superior, existe uma ligeira diferença no valor da temperatura máxima alcançada (150°C na versão 1 e 196,10°C na versão 2). A versão 3 tem tendência para atingir tanto na parte superior com na inferior valores de temperatura mais baixos que a versão 4. Na superfície superior da placa de circuito impresso a versão 6 e 7 possuem uma temperatura máxima de 174,4 e 168,3°C respetivamente, enquanto a versão 8 possui uma temperatura de 200°C. Esta diferença nos valores de temperatura pode estar relacionado com o facto de a versão 6 e 7 possuírem camadas condutoras no interior da placa de circuito impresso, embora em diferente número e na versão 8 as camadas condutoras existentes serem mais próximas das superfícies da placa de circuito impresso. Devido à presença de camadas condutoras nas superfícies da placa de circuito impresso, além do calor ser transferido por condução, é também transferido por convecção. Nestas 3 versões, a versão 7 apresenta as temperaturas mais baixas, tanto na superfície inferior como superior.

Na Figura 38 pode visualizar-se o gap de temperatura obtido em cada uma das versões do conector da placa de circuito impresso com largura de pista de 1 mm.

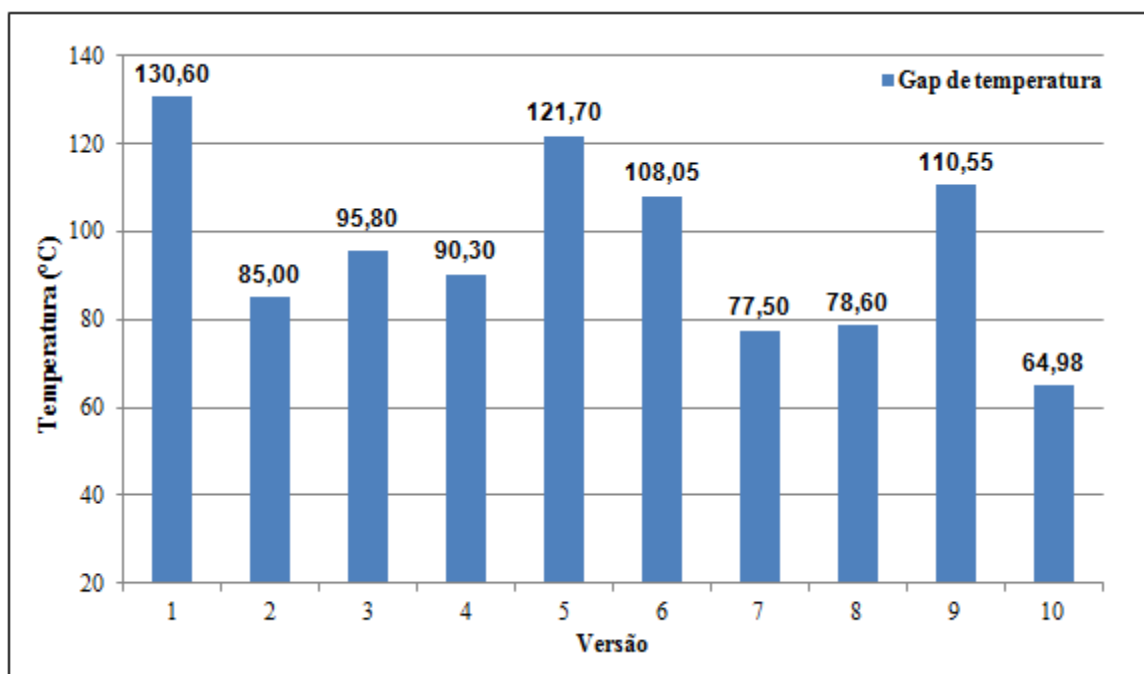


Figura 38 -Diferença de temperatura entre superfície inferior e superfície superior da placa.

Como é possível verificar-se na figura, a versão que atingiu a maior diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior da placa foi a versão 1. Nesta versão apenas existe uma camada

de cobre com 18 $\mu$ m de espessura. A versão onde foi verificado o menor valor de diferença de temperatura foi na versão 10, a qual possui o maior número de camadas de cobre usadas neste teste (6), estando estas ligadas às camadas mais externas da placa de circuito impresso. Este resultado pode indicar que a dissipação térmica na versão 10 é maior que na versão 1, pois a superfície superior alcança uma temperatura mais próxima da que é atingida na superfície inferior. Assim, as camadas de cobre presentes na versão 10 permitem uma maior condução de calor entre a superfície inferior e a superfície superior da placa de circuito impresso.

Na versão 1 apenas existe uma camada de cobre com 18 $\mu$ m de espessura. Na versão 10 existem 6 camadas de cobre que se traduz em 108 $\mu$ m de cobre o que representa seis vezes mais cobre do que na versão 1.

Na Tabela 8 encontram-se os valores de condutividade térmica ( $k$ ) dos materiais presentes na placa de circuito impresso e do ar.

**Tabela 8 - Condutividade térmica dos materiais [27].**

<b>Material</b>	<b><math>k</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b>
FR-4	0,25
Cobre	355
Ar	0,0275

O cobre possui uma condutividade térmica bastante superior à do FR-4 (material dielétrico presente nas placas de circuito impresso). Devido a esta característica dos materiais, o calor é conduzido mais facilmente ao longo do furo da versão 10 do que no furo da versão 1.

A versão 9, apesar de ter o mesmo número de camadas de cobre que a versão 10, possui um *gap* de temperaturas bastante superior. A diferença entre a versão 9 e versão 10 é a distribuição das camadas de cobre ligadas ao furo. Na versão 10 as camadas de cobre ligadas ao furo são as camadas externas da placa de circuito impresso, enquanto na versão 9, as camadas ligadas ao furo são as camadas no centro do interior da placa de circuito impresso, não havendo comunicação com as camadas externas da placa de circuito impresso. No caso da versão 10, além da transferência de calor através de condução o calor é também transferido através de convecção nas camadas condutoras presentes nas superfícies da placa. Verifica-se então que a dissipação térmica é influenciada pela distribuição das camadas de cobre na placa de circuito impresso e não só pelo número de camadas ligadas ao furo. Se as camadas de cobre que estão ligadas ao furo se encontram nas camadas externas da placa de circuito impresso, o seu impacto na dissipação térmica é mais significativo, devido à transferência de calor por convecção. Esta tendência pode também ser confirmada através dos



---

resultados da versão 4 e 5. A versão 4 e 5 possuem o mesmo número de camadas de cobre ligadas ao furo (duas) porém, na versão 4, estas camadas são as camadas à superfície da placa de circuito impresso (camada *top* e *bottom*) e na versão 5 estão ligadas nas camadas condutoras seguintes (camada 2 e 7). Verifica-se que na versão 4 a diferença entre a temperatura atingida na superfície superior e inferior é menor do que a atingida na versão 5, sendo 90,30°C e 121,70°C respectivamente.

Outro factor que poderá influenciar a dissipação térmica ao longo do furo é a separação entre as camadas de cobre. A versão 5 e 6 possuem o mesmo número de camadas condutoras e ambas as camadas se encontram no interior da placa de circuito impresso (nenhuma das camadas condutoras é superficial), no entanto o *gap* de temperatura registado para estas versões é ligeiramente diferente. Estas duas versões diferem na separação entre camadas condutoras, ou seja, na versão 5 as camadas condutoras encontram-se nas camadas 2 e 7, representando uma distância de 1384µm. Na versão 6 as camadas 3 e 6 são as que se encontram ligadas ao furo e a distância entre estas camadas é de 1198µm, sendo esta distância cerca de 15% menor que a separação existente na versão 5.

Nas placas de circuito impresso com 0,8 e 0,5 mm de largura de pista foram também recolhidos dados térmicos no conector. No entanto, neste tipo de placa as medições foram apenas realizadas na versão 1, 5 e 10, de modo a ter-se resultados de uma versão com o mínimo número de camadas conectadas ao furo, uma situação intermédia e com o máximo número de camadas condutoras.

Apesar da largura de pista da placa de circuito impresso ser diferente, o comportamento térmico apresentado neste tipo de placa é semelhante ao visualizado nas mesmas versões na placa de circuito impresso com 1mm de largura de pista. No entanto, os valores de temperatura alcançados na superfície superior são ligeiramente mais elevados.

Na Tabela 9 encontram-se os dados térmicos obtidos nas placas de circuito impresso com 0,8 e 0,5 mm de largura de pista.

Tabela 9 -Temperaturas obtidas no conector em placa de circuito impresso de 0,8 e 0,5 mm.

<b>Conector – placa de circuito impresso com 0,8 mm de largura de pista</b>					
<b>Versão</b>	<b>Parte inferior (°C)</b>		<b>Parte superior (°C)</b>		<b>Gap de temperatura (°C)</b>
	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desvio padrão (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desvio padrão (°C)</b>	
<b>1</b>	283,85	0,78	194,45	15,77	<b>89,40</b>
<b>5</b>	277,50	1,13	186,10	5,52	<b>91,40</b>
<b>10</b>	263,90	1,56	168,90	5,52	<b>95,00</b>
<b>Conector – placa de circuito impresso com 0,5 mm de largura de pista</b>					
<b>Versão</b>	<b>Parte inferior (°C)</b>		<b>Parte superior (°C)</b>		<b>Gap de temperatura (°C)</b>
	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desvio padrão (°C)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desvio padrão (°C)</b>	
<b>1</b>	275,55	0,78	195,00	0,85	<b>80,55</b>
<b>5</b>	266,70	1,56	190,00	3,96	<b>76,70</b>
<b>10</b>	277,50	0,42	170,55	0,78	<b>106,95</b>

É possível verificar-se que na placa com 0,8 mm de largura de pista, o gap de temperatura nas versões 1 e 5 é mais elevado que na placa com 0,5 mm de largura de pista. Porém, este comportamento não se verifica na versão 10.

Na Figura 39 podem ser visualizados os *gaps* de temperatura entre as duas superfícies da placa de circuito impresso nas versões 1, 5 e 10 nas placas de circuito impresso com 0,5; 0,8 e 1 mm de largura de pista. Nesta figura é possível realizar-se uma comparação entre os valores obtidos entre os diferentes tipos de placa.

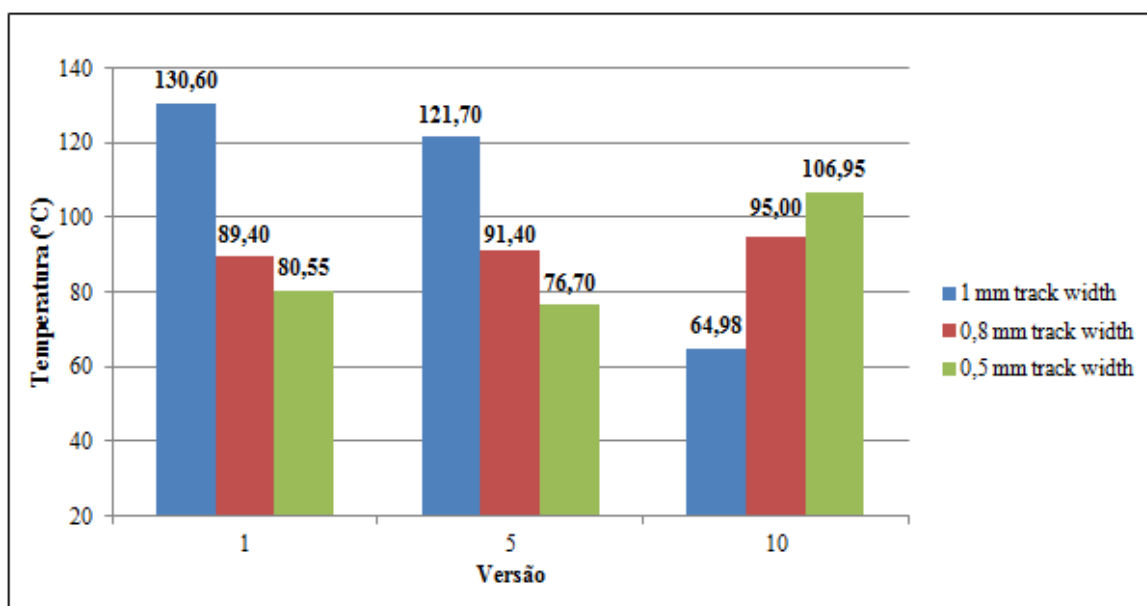


Figura 39 - Diferença de temperatura entre superfície inferior e superfície superior nas diferentes placas.

Através da figura é possível verificar-se que existe uma tendência no comportamento térmico entre os três tipos de placa, sendo possível observar-se que a placas com 0,5 mm e 1mm de largura de pista possuem os valores extremos e a placa com 0,8 mm possui valores intermédios entre os outros dois tipos de placa.

Na versão 1 e 5, a placa de circuito impresso com 0,5 mm de largura de pista possui o mesmo comportamento verificado na placa com 1 mm, onde corre uma diminuição do gap de temperatura da versão 1 para a versão 5. No entanto, esta diminuição é significativa apenas na placa de circuito impresso com largura de pista de 1 mm.

A placa de circuito impresso com 1 mm de largura de pista é a que possui valores de *gap* de temperatura mais elevados tanto na versão 1 como na 5.

Na versão 10, o comportamento térmico verificado até à versão 5 inverte-se. Nesta versão, a placa de circuito impresso com 1 mm de largura de pista é a que possui o menor *gap* de temperatura e a placa com 0,5 mm é a que possui o maior *gap* de temperatura.

#### 4.1.2 Condensador eletrolítico

Para as medições realizadas no condensador eletrolítico, foram utilizados dois tipos de placa de circuito impresso: 0,5 e 1 mm de largura de pista. Em cada um dos tipos de placa foram realizadas medições na versão 1, 5 e 10 do condensador.

A Figura 40 mostra o perfil térmico para as versões 1, 5 e 10 do condensador eletrolítico na placa de circuito impresso com 0,5 mm de largura de pista.

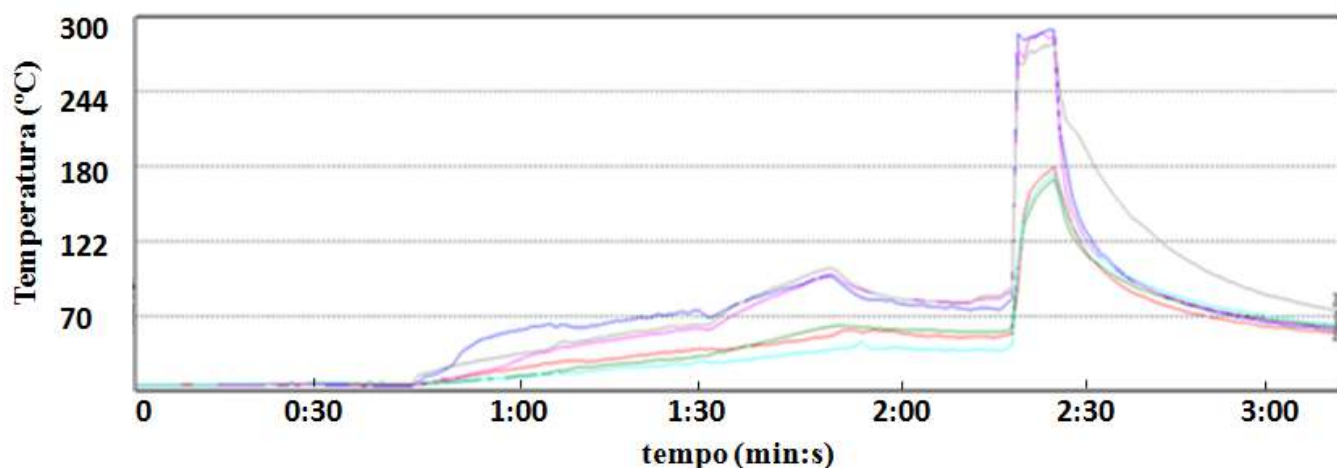


Figura 40 -Perfil térmico obtido para placa com 0,5mm.

As temperaturas máximas atingidas são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Identificação dos termopares presentes no perfil térmico da Figura 43.

	Identificação do termopar	Temperatura máxima (°C)
	Condensador V1 – <i>parte superior</i>	187,8
	Condensador V1- <i>parte inferior</i>	290,6
	Condensador V5 - <i>parte superior</i>	178,9
	Condensador V5 - <i>parte inferior</i>	288,9
	Condensador V10 - <i>parte superior</i>	182,8
	Condensador V10 – <i>parte inferior</i>	280,6

Com base nos dados da tabela é possível verificar-se que a versão 1 atinge temperaturas ligeiramente mais elevadas em ambas as superfícies da placa de circuito impresso.

Na Tabela 11 são indicadas as temperaturas máximas obtidas nas versões 1, 5 e 10 para as placas com 0,5 e 1 mm de largura de pista.

Tabela 11 - Temperaturas obtidas no condensador em placa de circuito impresso de 0,5 e 1 mm.

<b>Condensador – placa de circuito impresso com 0,5 mm de largura de pista</b>			
<b>Versão</b>	<b>Temperatura parte inferior (°C)</b>	<b>Temperatura parte superior (°C)</b>	<b>Gap de temperatura (°C)</b>
<b>1</b>	290,6	187,8	102,8
<b>5</b>	288,9	178,9	110,0
<b>10</b>	280,6	182,8	97,80
<b>Condensador – placa de circuito impresso com 1 mm de largura de pista</b>			
<b>Versão</b>	<b>Temperatura parte inferior (°C)</b>	<b>Temperatura parte superior (°C)</b>	<b>Gap de temperatura (°C)</b>
<b>1</b>	287,8	177,8	110,0
<b>5</b>	289,4	189,4	100,0
<b>10</b>	289,4	161,7	127,7

Através dos dados apresentados na tabela verifica-se que neste componente as diferenças de temperatura obtidas para diferentes versões no mesmo tipo de placa não são significativas. As temperaturas obtidas na superfície superior são relativamente próximas bem como os *gap* de temperatura.

Na versão 10 do componente, é possível visualizar-se uma ligeira diferença entre o *gap* de temperatura obtido na placa de circuito impresso com 0,5 mm e 1 mm de largura de pista. Este fenómeno pode ser indicador de ocorrência de maior dissipação térmica na placa com largura de pista de 1 mm.

Na Figura 41 encontram-se os valores de *gap* de temperatura obtidos nas três versões nos dois tipos de placa de circuito impresso.

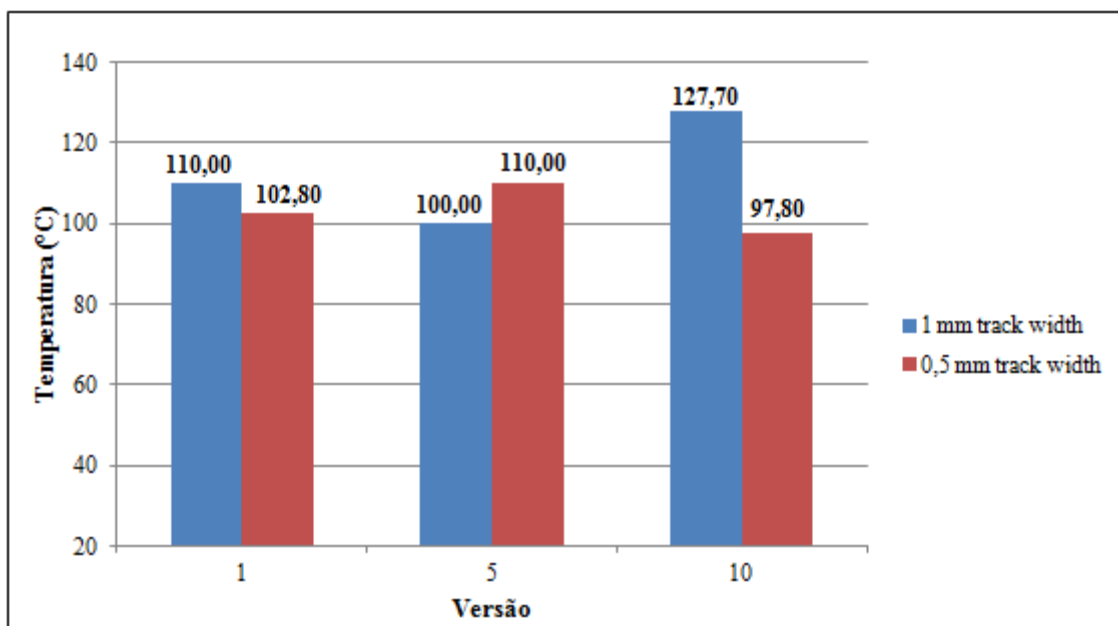


Figura 41 - Diferenças de temperatura obtidas nos dois tipos de placa.

Comparativamente aos dados obtidos no conector, de um modo geral, as temperaturas obtidas na parte inferior da placa de circuito impresso do condensador eletrolítico são mais elevadas que as obtidas no conector. No conector foram obtidas diferenças de temperatura mais significativas entre as versões testadas.

Na placa de circuito impresso com 0,5 mm de largura de pista, o gap de temperatura obtidos nas três versões do condensador eletrolítico é superior ao *gap* de temperatura obtido nas mesmas versões no conector. Quanto à placa de circuito impresso com 1 mm de largura de pista, na versão 1 e 5 do condensador eletrolítico foram obtidos gaps de temperatura inferiores aos obtidos nas mesmas versões do conector. Na versão 10 do condensador eletrolítico, o intervalo de temperatura entre as superfícies da placa de circuito impresso foi maior que no conector.

## 4.2 Inspeção do enchimento dos furos

De forma a inspecionar o enchimento obtido nos furos dos diferentes componentes foram utilizadas três técnicas diferentes: a inspeção através de microscópio ótico, raios-x e inspeção através de microscópio ótico em cortes seccionais realizados nas amostras.

### 4.2.1 Inspeção através de microscópio ótico

Para se realizar a inspeção do enchimento dos furos recorrendo ao microscópio ótico, o corpo dos componentes foi removido de modo a facilitar a inspeção do enchimento dos furos à superfície da placa. Este método permite avaliar de uma forma geral o enchimento do furo, no entanto é um

---

método um pouco limitado, uma vez que apenas permite visualizar superficialmente o preenchimento do furo de uma forma não muito precisa. Além disso este método não permite avaliar a junta de soldagem formada, nem a ocorrência de defeitos de soldagem como por exemplo a formação de vazios.

Este foi o primeiro método de análise utilizado para avaliar as juntas de solda. Foram analisados ambos os lados dos terminais dos componentes (superfície superior e inferior da placa de circuito impresso) com o intuito de avaliar a formação de meniscos positivos nos dois lados do pino e também o enchimento do furo. O enchimento do furo deve ser no mínimo 75% do volume (conforme critério de soldagem para placas Classe 2 apresentado na IPC-A 610D).

Na Figura 42 é possível visualizar-se o menisco formado no condensador eletrolítico.



**Figura 42 - Menisco formado no condensador eletrolítico.**

O menisco formado na parte inferior dos componentes soldados não apresentou defeitos na maioria dos componentes. No caso da soldagem seletiva, o menisco inferior não é tão crítico quanto o menisco formado na parte superior da placa de circuito impresso. O menisco superior depende da capacidade da solda preencher o furo.

Os resultados obtidos na inspeção visual contemplarão a superfície superior da placa de circuito impresso de forma a avaliar o enchimento do furo e a formação de menisco superior.

#### **a) Conector**

Na Figura 43 encontram-se as imagens da inspeção realizada através do microscópio ótico as conector. Na figura apresentam-se apenas as inspeções realizadas aos componentes da versão 10 das placas de circuito impresso com 0,5 e 1 mm de largura de pista. No entanto, este tipo de inspeção foi realizado em todos os componentes.



Versão	Placa com 0,5 mm de largura de pista	Placa com 1 mm de largura de pista
10		

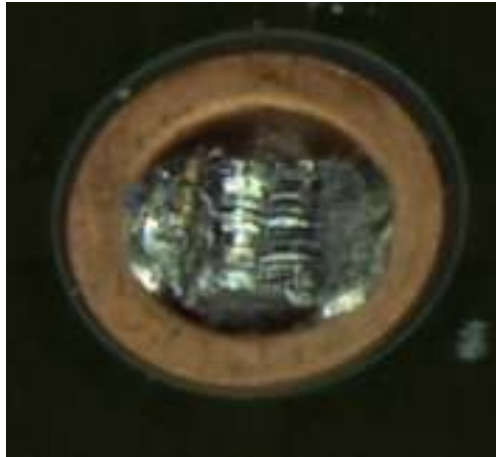
Figura 43 -Inspeção através de microscópio ótico realizada nos conectores.

Com base na inspeção realizada verificou-se, de um modo geral uma diferença significativa entre a junta de soldagem formada no pino central do componente (pino de sinal) e as juntas de soldagem formadas nos pinos da periferia (pinos de massa). É possível observar-se um maior enchimento do pino de sinal do que dos pinos de massa.

Este acontecimento está relacionado com o facto de os pinos serem diferentes, quer em termos de forma, quer em termos de composição. A composição dos pinos é diferente, havendo diferente molhabilidade da solda no pino de sinal e nos pinos de massa. O pino de sinal (pino central) é constituído por cobre e zinco e possui um acabamento superficial de níquel e ouro, enquanto os pinos de massa são constituídos por aço e possuem um revestimento de cobre. No entanto, devido ao processo de produção dos pinos de massa, estes são cortados numa fase posterior à deposição do acabamento superficial, ficando as superfícies nas quais ocorreu o corte sem acabamento superficial. Uma vez que estas duas superfícies do pino se encontram sem acabamento superficial, ficam sujeitas à oxidação dependendo do tempo de armazenamento entre a produção do componente e a soldagem do mesmo, o grau de oxidação pode variar. Nestas duas superfícies, devido à oxidação, serão formados óxidos, promovendo uma redução da molhabilidade da solda nessas mesmas superfícies, tornando a soldagem mais difícil e obtendo-se um furo com volume de solda inferior.

Na Figura 44 encontra-se uma imagem detalhada de um dos pinos de massa do conector. Nesta imagem é possível verificar-se a diferença entre as diferentes superfícies do pino.





**Figura 44 - Pino de massa.**

Existem duas superfícies onde a solda completou o enchimento do furo sendo correspondentes às superfícies com acabamento superficial. Quanto às duas restantes superfícies, o enchimento do furo não se deu por completo devido à falta de molhabilidade da solda nestas duas superfícies provocada pela presença de óxidos baseada na ausência de acabamento superficial. Em quase todos os pinos de massa, é visível este efeito, sendo mais significativo em determinados casos.

Quanto ao enchimento dos furos nas diferentes versões do componente, verifica-se que em nenhuma delas ocorre um enchimento de 100% em todos os pinos de massa do componente. O pino de sinal na maioria dos componentes analisados apresenta um enchimento do furo de 100% ou até superior.

Após a inspeção através de microscópio ótico verificou-se, na generalidade, um menor volume de solda nos componentes da placa de circuito impresso com 1mm de largura de pista do que na placa de 0,5 mm. Nos dados térmicos recolhidos, verificou-se também que as temperaturas atingidas na parte superior da PCB com 1 mm de largura de pista são menores que as atingidas nas placas com 0,5 mm. Assim, o menor enchimento de furos nas placas com largura de pista de 1 mm pode estar relacionado com a menor transferência de calor ao longo do furo, promovendo um aumento da viscosidade da solda e conseqüentemente um menor enchimento do furo.

---

## b) Condensador electrolítico

Na Figura 45 podem ser visualizadas as imagens obtidas na inspeção do enchimento dos furos nos componentes da versão 10 nas placas com 0,5 e 1 mm de largura de pista.



Figura 45 - Inspeção através de microscópio ótico realizada nos condensadores electrolíticos.

De forma geral, em cada uma das versões do condensador electrolítico, o critério de preenchimento do furo de 75% parece ser cumprido. Porém, é visualizada alguma diferença no enchimento dos furos de algumas versões. A versão 4, 6 e 10 aparentam ser as versões com um menor enchimento do furo enquanto a versão 1, 2 e 8 aparentam possuir o maior enchimento, em alguns casos com formação de menisco superior.

É possível ainda verificar-se que existe uma ligeira diferença no enchimento dos dois tipos de pinos (pino mais fino e pino com maior espessura). O pino mais fino possui maior dificuldade no enchimento do furo, enquanto no pino mais espesso, o volume de solda atingido parece ser ligeiramente superior, podendo concluir-se que a largura do furo possui impacto na soldagem seletiva. Este efeito pode estar relacionado com o efeito de capilaridade que ocorre durante o processo de soldagem seletiva.

Em algumas das versões é possível encontrar principalmente no pino de maior espessura o efeito apresentado na Figura 46. A solda apresenta sinais de se estar a destacar do pino do componente. Este efeito pode estar relacionado com o esforço gerado entre o pino e a junta de soldagem durante a remoção do corpo do componente. Além disso este efeito pode ainda estar relacionado com o fenómeno de contração da solda (*shrinkage*).



**Figura 46 - Pino com maior espessura - versão 4.**

O comportamento nos diferentes tipos de placas é semelhante. Existem apenas ligeiras diferenças na percentagem de volume de enchimento do furo. De modo geral, verifica-se um menor enchimento dos furos nas placas com 1 mm de largura de pista, sendo esta tendência mais significativa em determinadas versões. As versões da placa com 0,5 mm de largura de pista tendem a possuir maior enchimento dos furos. A placa com largura de pista de 0,8 mm possui um enchimento de furo com volume de solda intermédio entre o verificado nos restantes tipos de placa (0,5 e 1 mm de largura de pista).

Com base nos resultados obtidos na inspeção através de microscópio ótico realizada aos diferentes componentes nas diferentes versões e nos diferentes tipos de placa de circuito impresso pode observar-se uma diferença significativa no enchimento de furo nos dois tipos de componentes utilizados. É possível verificar-se que o volume de solda obtido nos furos dos condensadores eletrolíticos é bastante superior ao volume obtido nos conectores nas diferentes versões e tipos de placa. Esta diferença no enchimento dos furos nos diferentes componentes pode estar relacionada com a composição dos componentes. O conector possui um corpo metálico com interior oco enquanto o condensador eletrolítico possui um corpo maciço maioritariamente constituído por plástico. No entanto, o condensador eletrolítico apresenta dimensões superiores às do conector. Estas diferenças no corpo dos componentes induzem uma diferente dissipação térmica, havendo tendência de ser superior no conector.

#### 4.2.2 Inspeção através de raios-x

A inspeção através de raios-x é um método de inspeção não destrutivo e foi realizada com o intuito de visualizar o enchimento dos furos dos diferentes componentes e de avaliar a junta de soldagem formada verificando a presença de defeitos tais como vazios.

A inspeção foi realizada nos dois tipos de componentes, nos diferentes tipos de placa de circuito impresso utilizados e nas diferentes versões de cada componente.

##### a) Conector

Na Figura 47 podem ser visualizados os resultados obtidos para o conector da versão 5 da placa de circuito impresso com largura de pista de 0,5 e 1mm. Todas as versões foram analisadas, no entanto, são apenas apresentadas as versões que correspondem ao número mínimo de camadas de cobre, ao número intermédio e ao número máximo.

Versão	Placa com 0,5 mm de largura de pista	Placa com 1 mm de largura de pista
--------	--------------------------------------	------------------------------------

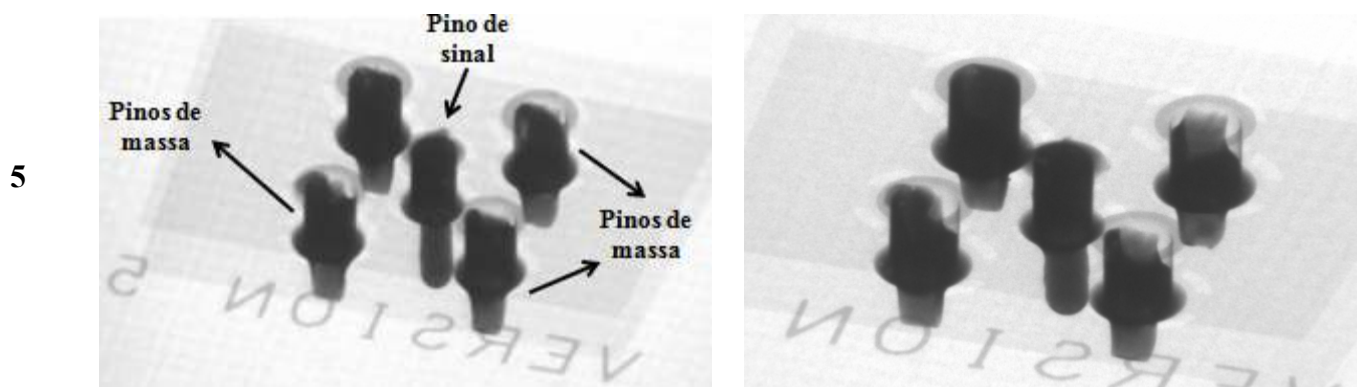


Figura 47 - Inspeção por raios-x realizada ao conector na placa com 0,5 e 1 mm de largura de pista.

É possível verificar-se que mesmo na placa de circuito impresso com 0,5 mm de largura de pista, em alguns pinos da massa não possuem um enchimento de 100%, no entanto, parecem cumprir o critério de IPC atingindo um mínimo de 75% de enchimento do furo.

Através dos dados presentes na tabela relativos à placa com 0,5 mm de largura de pista consegue-se ainda observar as diferenças entre as versões do componente. A versão 1 é aquela que apresenta o enchimento de furo mais elevado. Nas juntas de soldagem deste tipo de componente podem ser vistos alguns vazios, principalmente na versão 10 do componente.

Relativamente resultados obtidos na placa com 1 mm de largura de pista, observa-se que o pino de sinal se encontra com um enchimento de furo de 100%. Quanto aos pinos de massa, na maioria dos casos não ocorre o enchimento completo do furo.

Na placa com 1 mm de largura de pista verifica-se ainda uma diminuição da quantidade de solda presente nos furos relativamente à observada nas placas de circuito impresso com 0,5 e 0,8 mm de largura de pista.

### b) Condensador eletrolítico

Na Figura 48 podem ser visualizados os resultados obtidos para o conector da versão 5 da placa de circuito impresso com largura de pista de 0,5 e 1mm.

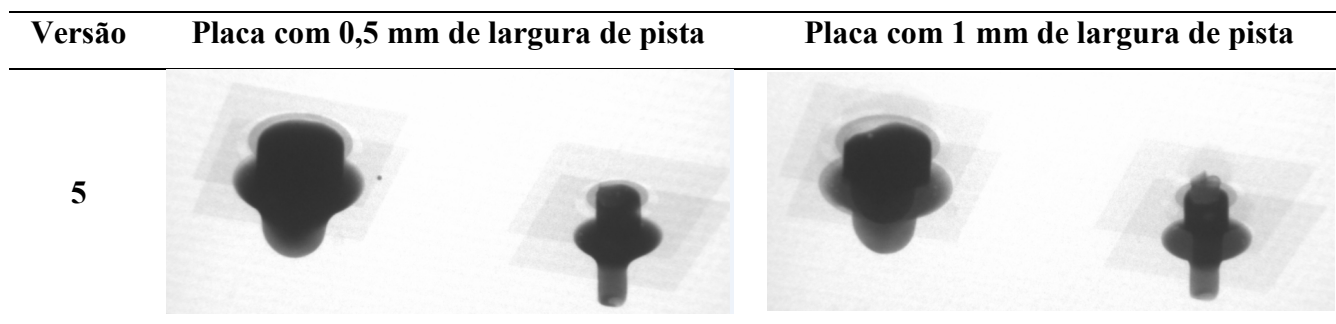


Figura 48 - Inspeção por raios-x realizada ao condensador eletrolítico na placa com 0,5 e 1 mm de largura de pista.

Através dos resultados obtidos na placa com 0,5 mm de largura de pista, é possível visualizar-se o enchimento dos diferentes pinos do condensador eletrolítico assim como o menisco inferior formado. Tal como na inspeção realizada através de microscópio ótico, verifica-se uma ligeira diferença entre o enchimento do pino com maior espessura e o pino com menor espessura ocorrendo neste um menor enchimento do furo.

O comportamento observado na placa com largura de pista de 1 mm é semelhante ao visualizado na placa com 0,5 mm de largura de pista assim como na de 0,8 mm. Existe apenas uma ligeira diferença no enchimento do pino com menor espessura, que tem apresenta uma tendência de possuir um menor enchimento relativamente ao visualizado na placa de circuito impresso com 0,5 mm de largura de pista.

Nos pinos de maior espessura da versão 5 e 10 na placa com 1 mm de largura de pista foram detectados alguns vazios.

Assim, verifica-se através da análise por raios-x tal como visualizado na inspeção através de microscópio ótico a influência dos diferentes tipos de placa utilizados no teste. A placa com 1 mm de largura de pista possui tendência para apresentar volumes de solda inferiores no enchimento dos furos em comparação com os restantes tipos de placa (0,5 e 0,8 mm).

Além da influência do tipo de placa de circuito impresso utilizada é também visível a diferença provocada pelo uso de diferentes componentes. O conector possui para as mesmas condições de

---

soldagem (mesmo tipo de placa e mesma versão de componente) enchimento de furo inferior do que o verificado no condensador eletrolítico.

#### 4.2.3 Inspeção através de microscópio ótico a cortes seccionais

De forma a poder efetuar-se uma análise mais completa das juntas de soldagem foram realizados cortes seccionais aos componentes soldados. Apesar de ser destrutiva, este tipo de técnica permite uma inspeção através de microscópio ótico que proporciona a avaliação da junta de soldagem de forma mais detalhada permitindo realizar uma caracterização microestrutural, avaliar a camada de reação, deteção de defeitos de soldagem e além disso permite ainda avaliar de forma mais viável o enchimento dos furos.

Tal como visto nas inspeções realizadas anteriormente, a placa de circuito impresso com 1 mm de *track width* é a que apresenta no geral um menor enchimento do furo, ou seja, apresenta uma maior dificuldade na soldagem dos componentes. Assim, as juntas de soldagem onde foram realizados cortes seccionais referem-se apenas aos componentes da placa de circuito impresso com largura de pista de 1mm.

---

### a) Conector

Na Figura 49 encontram-se as imagens obtidas através de microscópio ótico dos cortes seccionais realizados em todas as versões do conector na placa com 1 mm de largura de pista.

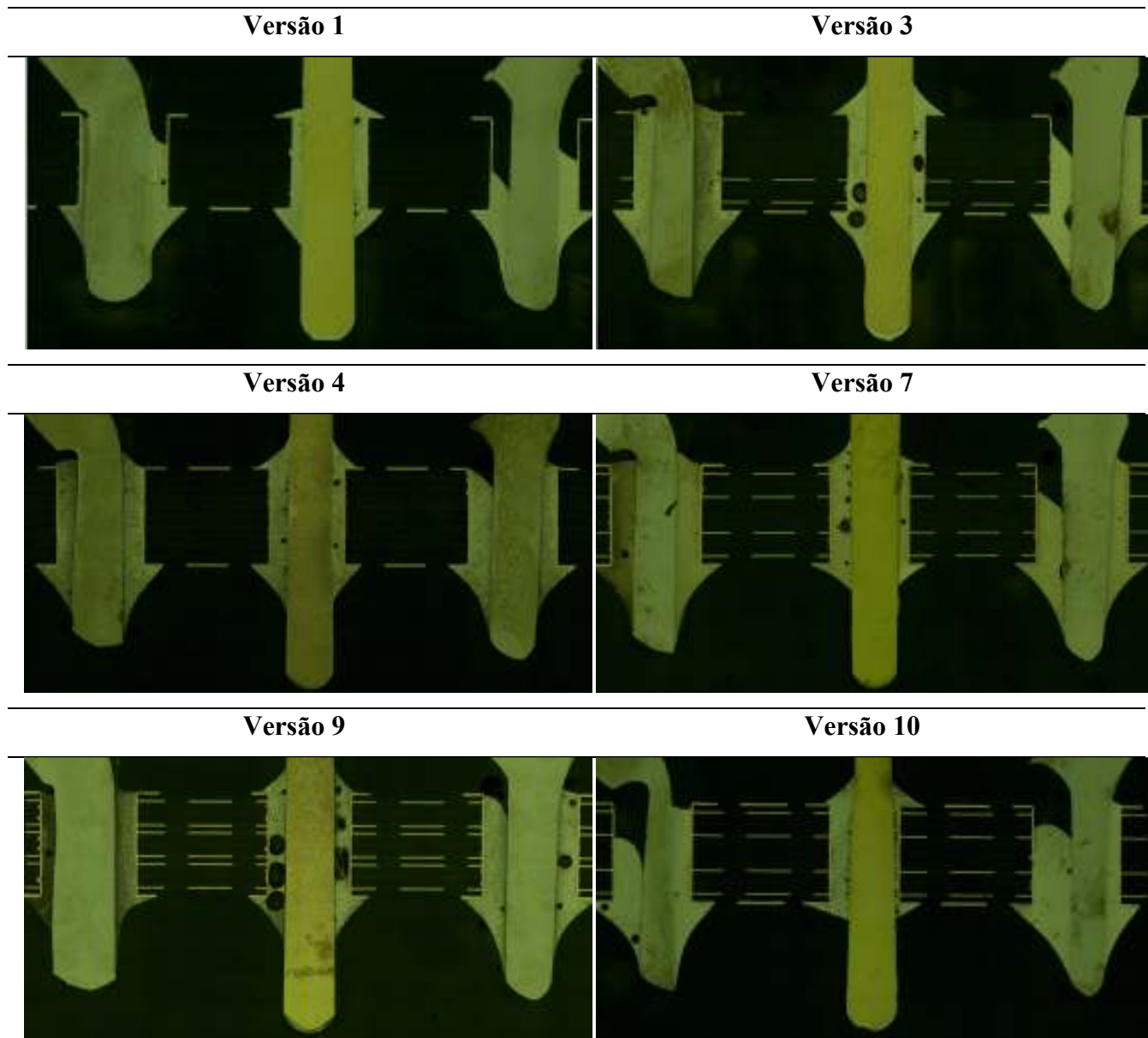


Figura 49 -Inspeção através de microscópio ótico realizada aos cortes seccionais do conector.

Na versão 1 é possível observar-se um enchimento superior a 100% no pino central do componente (pino de sinal), no entanto nos pinos de massa o enchimento não é total.

No pino de sinal verifica-se a presença de alguns vazios na junta de soldagem, principalmente junto ao pino. Este efeito pode estar relacionado com vários factores como por exemplo com a presença de humidade nos pinos do conector [28]. Durante o processo de soldagem a humidade tem tendência a evaporar devido à temperatura da solda, ficando aprisionada na junta de soldagem

---

preferencialmente junto do local onde a humidade tem origem. Se a formação de vazios estivesse relacionada com humidade presente na placa de circuito impresso, os vazios estariam localizados mais próximos da placa de circuito imprimidos ou dispersos na junta de soldagem.

Na versão 3 é visível um efeito que tende a aparecer nas restantes versões. Um dos pinos de massa possui um enchimento de furo inferior ao outro pino. Este efeito pode estar relacionado com a forma do componente utilizado.

Na Figura 50 (a) encontra-se o plano onde foram realizados os cortes seccionais nos conectores e na figura (b) encontra-se o conector. Tal como se pode visualizar na figura (b) o corpo do componente não é uniforme. Ao realizarem-se os cortes seccionais, um dos pinos de massa encontra-se sob a zona assinalada na figura. Esta zona possui mais material do que na área onde é cortado o outro pino de massa.

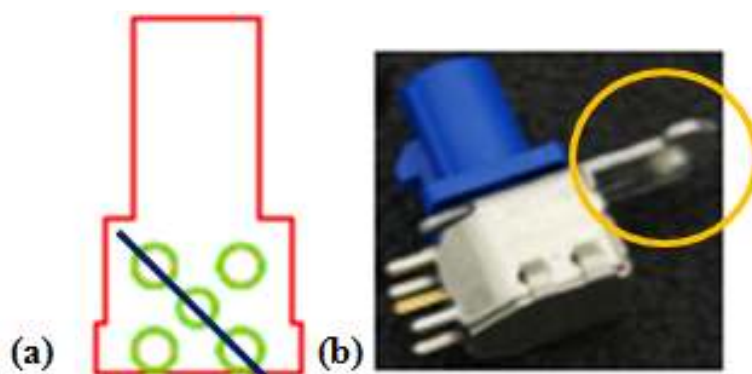


Figura 50 - Conector.

Esta diferença pode estar na origem de um dos pinos de massa possuir um menor enchimento do furo pois havendo uma maior quantidade de material metálico, a dissipação térmica é superior.

A versão 7 possui um aspecto semelhante às restantes versões. Nesta versão pode salientar-se o fenómeno presente no pino de massa do lado direito. Neste pino, é possível visualizar-se uma diferença significativa no enchimento dos dois lados do pino. Num dos lados (direita) o enchimento atinge os 100%, enquanto no outro lado (esquerda) o enchimento é por volta dos 70%. Esta diferença está relacionada com a qualidade dos pinos e o seu método de fabrico. Os pinos de massa deste conector são constituídos por uma liga Cu-Zn e possuem um acabamento superficial de estanho, no entanto, durante o fabrico dos pinos, a chapa que lhes dá origem é cortada de dois lados. As faces do pino que sofreram o corte não possuem acabamento superficial. Em alguns dos casos, parte do estanho presente na chapa é arrastado durante o corte e nas faces onde isso acontece, estas ficam com acabamento superficial parcial. Este processo de fabrico de pinos leva a um decréscimo da soldabilidade dos pinos, uma vez que 50% da superfície do pino não se encontra com o devido acabamento superficial. O acabamento superficial dos pinos é essencial para prevenir a formação de



óxidos e assim assegurar a molhabilidade da solda no pino [13]. Além disso, como pode ser visto na figura, o acabamento da face corta do pino é irregular, possui rugosidades, o que beneficia o acúmulo de umidade, favorecendo posteriormente a formação de vazios, diminuindo a qualidade da junta de soldagem formada.

A versão 9, mesmo com o número máximo de camadas condutoras (6), possui um enchimento de furo de 100% ou muito próximo de 100%. No entanto, a versão 10, com o mesmo número de camadas condutoras, apenas com alterações na sua distribuição, possui um enchimento de furo bastante inferior. Na versão 10, no pino de massa da esquerda, o enchimento obtido é cerca de 75%.

### b) Condensador eletrolítico

Na Figura 51 encontram-se as imagens obtidas através de microscópio ótico dos cortes seccionais realizados em todas as versões do condensador eletrolítico na placa com 1 mm de largura de pista.

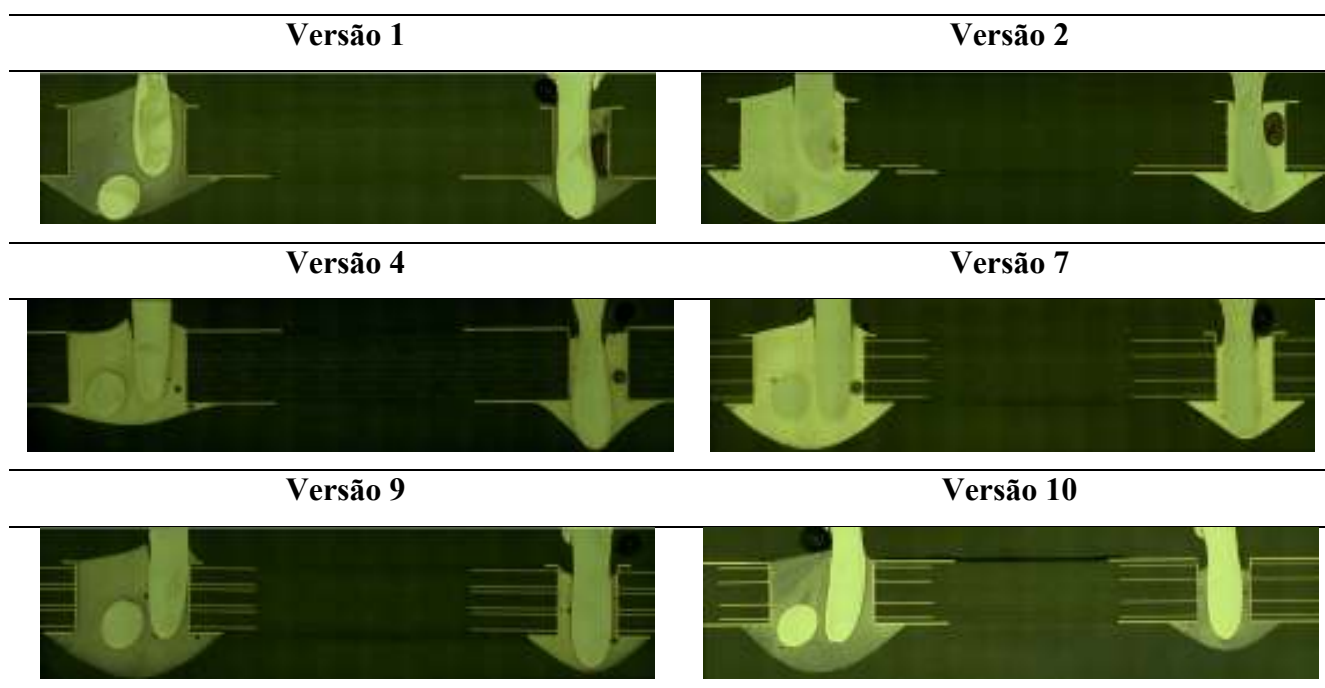


Figura 51 - Inspeção através de microscópio ótico realizada aos cortes seccionais do condensador eletrolítico.

Na versão 1 é possível verificar-se que ambos os pinos obtiveram um enchimento de 100%. No pino de maior espessura, o enchimento do furo é superior a 100%. Além disso é também visível a diferença no enchimento dos diferentes pinos do componente. O pino com maior espessura e consequentemente com um maior diâmetro de furo apresenta um enchimento superior ao obtido no pino mais fino. Esta diferença pode estar relacionada com a capilaridade do furo, sendo esta favorecida no furo de maior diâmetro.

---

Em algumas versões é possível ainda visualizar-se um ligeiro destacamento da parte superior da solda dos pinos do componente. Este efeito provavelmente está relacionado com o arrancamento do corpo do componente, a solda sofre uma tensão e destaca-se do pino. Este efeito podia também estar relacionado com o fenómeno de contração da solda. Durante a solidificação a solda tem tendência a contrair e dependendo dos coeficientes térmicos de expansão dos materiais envolventes, a solda pode-se destacar [28]. No entanto, é visível a presença de solda nas superfícies dos pinos, verificando-se que a soldagem ocorreu até esse nível, partindo posteriormente durante a operação de arrancamento do corpo do componente.

Na versão 4 o enchimento dos furos é ligeiramente inferior comparativamente às versões anteriormente analisadas. Esta diferença no enchimento é mais acentuada no pino mais fino. Através desta versão verifica-se que além do número de camadas de cobre ligadas ao furo, a sua distribuição ao longo do furo tem também influência no enchimento alcançado. A versão 2 possui o menor número de camadas condutoras que a camada 4, no entanto na versão 2 obteve-se um enchimento superior.

A versão 10 apresenta tal como a versão 9 o número máximo de camadas de cobre ligadas aos furos. A versão 9 possui as camadas de cobre mais concentradas na parte central no furo enquanto na versão 10 as camadas de cobre encontra-se mais concentradas nas extremidades dos furos. O enchimento atingido é ligeiramente inferior na versão 10 em ambos os pinos, principalmente no pino mais fino. Apesar do enchimento ser inferior respeita o requisito para este tipo de soldagem (mínimo 75% de enchimento). Confirma-se mais uma vez a influência da distribuição das camadas de cobre no enchimento dos furos. Observa-se que as camadas de cobre colocadas na periferia dos furos, possuem um maior impacto no enchimento dos furos aos quais estão ligadas, sendo o enchimento menor. Devido à sua presença nas extremidades dos furos, ou seja, estão à superfície da placa de circuito impresso, a transferência de calor ocorre não só por condução como também por convecção. Quanto maior a transferência de calor, mais dificuldade existe na soldagem dos componentes, o enchimento dos furos é menor.

### 4.3 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural foi realizada com o intuito de avaliar as juntas de soldagem em termos de fases, compostos intermetálicos formados e constituição química.

#### a) Conector

Dada a diferença em termos de composição entre os pinos do conector (pinos de massa e pino de sinal), a caracterização estrutural do conector foi efectuada nos dois tipos de pino.

Na Figura 52 e na Tabela 12 são apresentados os resultados de MEV e EDS da junta de soldagem do pino de sinal do conector da versão 1 na placa de circuito impresso com 1 mm de largura de pista.

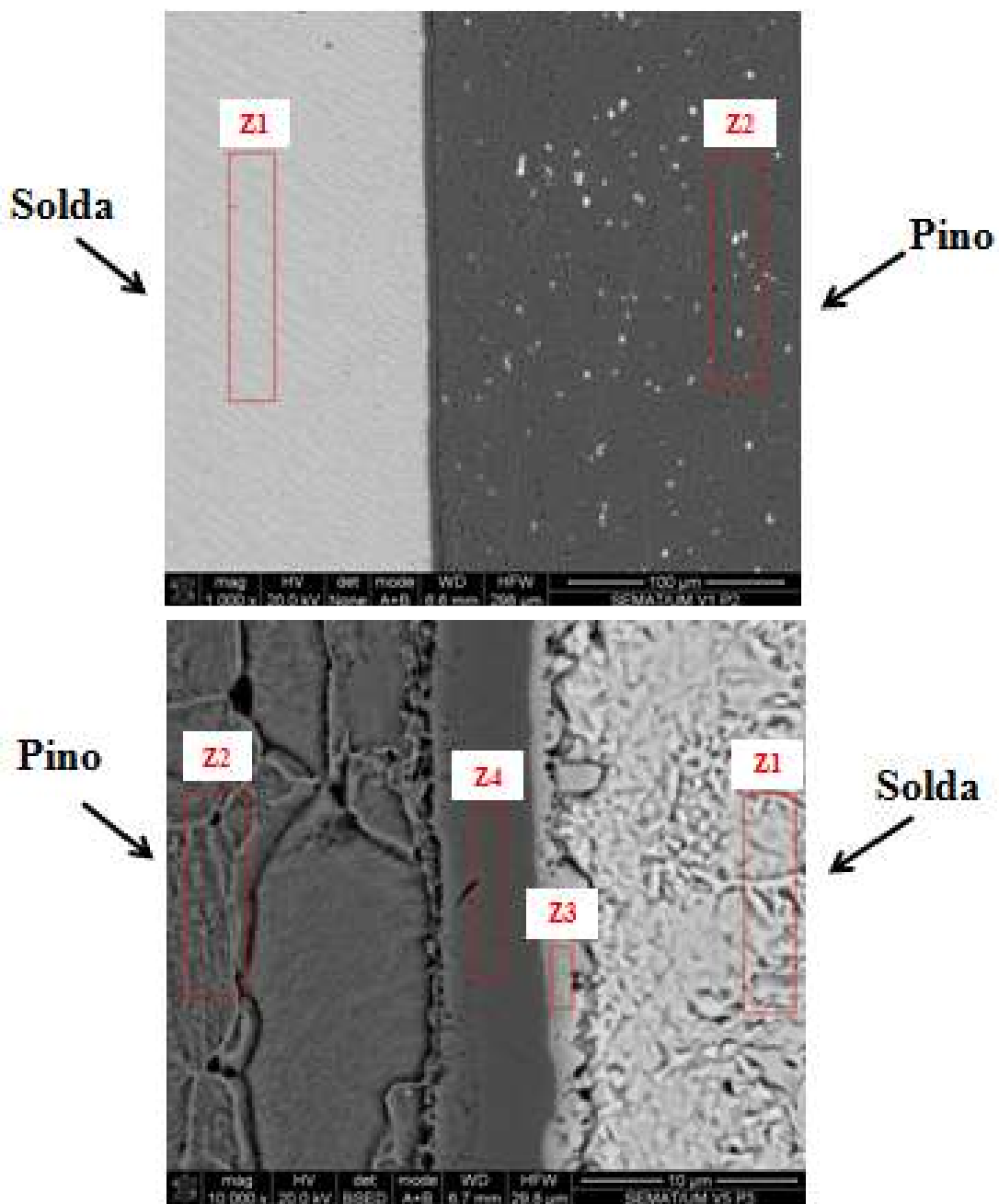


Figura 52 – Microestrutura da junta de soldagem do pino de sinal.

---

Tal como é possível observar na figura, existe uma camada de reacção contínua entre a solda e o acabamento superficial do pino. A solda apresenta uma cor mais clara que os restantes materiais presentes na figura. Na solda poderão estar contidas regiões com fase eutética na forma de  $Ag_3Sn$  [29].

A composição química das zonas Z1, Z2 e Z3 são apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12 - Composição química da zona Z1, Z2 e Z3.**

<b>Z1</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Wt %</b>
Ag	3,40
Sn	96,60
<b>Z2</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Wt %</b>
Pb	5,54
Cu	56,81
Zn	37,65
<b>Z3</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Wt %</b>
Au	3,42
Ag	1,78
Sn	48,74
Ni	27,42
Cu	18,64

A zona Z1 representa a composição da junta de soldagem sendo a sua composição semelhante à composição da solda (SAC305). Esta é composta maioritariamente por estanho e prata. O cobre não se encontra presente na composição química desta zona pois pode não ser detectado devido à sua quantidade bastante reduzida na solda, não se encontrando dentro do limite de detecção do equipamento utilizado.

Quanto à zona Z2, esta corresponde ao interior do pino de massa, verificando-se que este é essencialmente composto por uma liga de Cu-Zn com uma percentagem de chumbo.

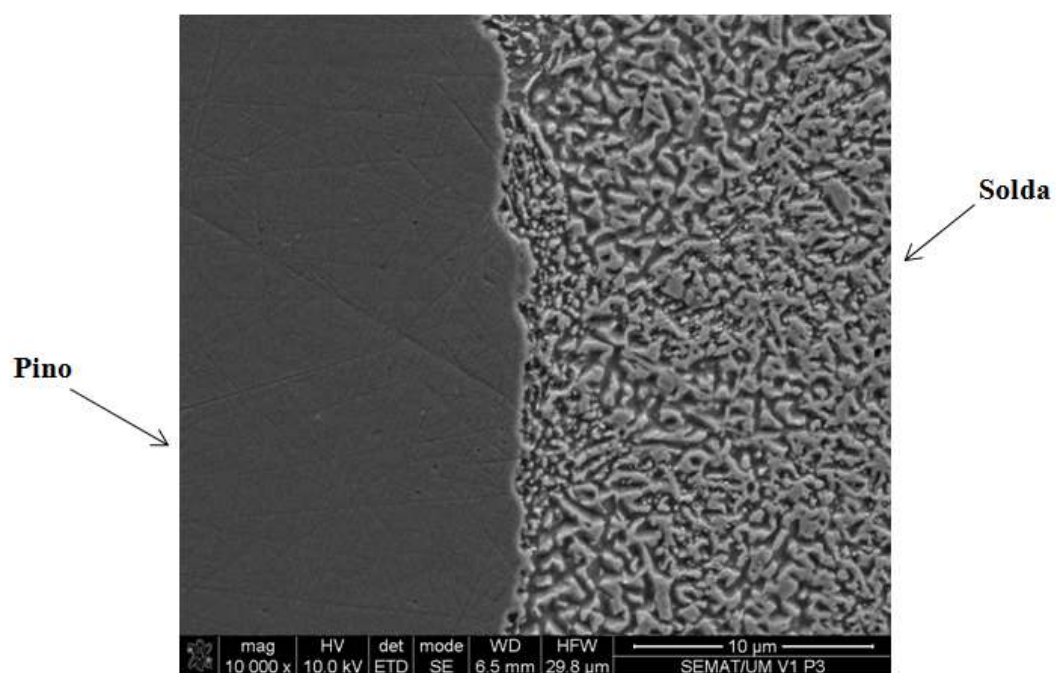
A camada de reacção encontra-se representada na zona Z3. Esta camada de é composta pelos elementos presentes na solda (Sn, Ag e Cu), pelos elementos presentes no acabamento superficial do

---

pino (Ni e Au) e pode ter ainda contribuição dos materiais da parte interna do pino. O elevado teor de cobre pode não estar só relacionado com a solda, como também com o interior do pino.

A zona Z4 é 100% composta por níquel (camada principal de acabamento superficial do pino). Esta camada funciona como barreira de difusão entre o cobre e o ouro.

Tal como o pino de sinal, um dos pinos de massa do conector foi também analisado (Figura 53).



**Figura 53 – Microestrutura do pino de massa.**

Na imagem é possível visualizar-se o pino de massa e solda. Pode ainda observar-se a camada de reacção entre a solda e o pino assim com uma estrutura mais fina da solda junto à camada de reacção.

Na Figura 54 encontram-se identificadas as quatro zonas onde foi realizada a caracterização química.

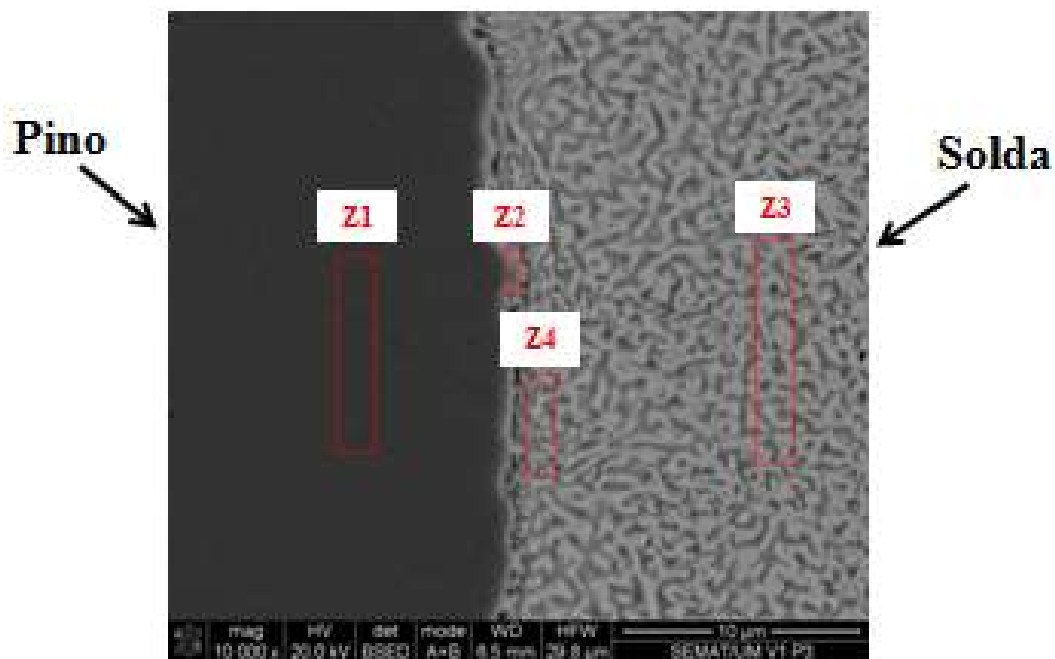


Figura 54 – Microestrutura do pino de massa.

A área identificada com Z1 representa o pino de massa e este é composto por aço. Na Tabela 13 são apresentadas as composições químicas das zonas Z2, Z3 e Z4.

Tabela 13 – Composição química Z2, Z3 e Z4.

<b>Z2</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Wt %</b>
Sn	77,38
Fe	20,38
Cu	2,24
<b>Z3</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Wt %</b>
Sn	95,68
Ag	4,32
<b>Z4</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Wt %</b>
Ag	8,55
Sn	88,18
Fe	1,59

---

A área identificada como Z2 representa a camada de reacção entre o pino de massa e a solda, como tal, possui na sua composição elementos presentes na solda e no pino de massa.

A composição da solda encontra-se na zona Z3.

A zona Z4 refere-se a uma zona da solda próxima da camada de reacção formada entre a solda e o pino de massa com uma estrutura mais fina que a estrutura presente na solda.

Como pode verificar-se através da composição química desta zona, esta ainda representa a camada de reacção entre o pino e a solda, pois há contribuição de materiais presentes em cada uma das partes.

Comparando os dois tipos de camada de reacção formada nos diferentes tipos de pino, pode concluir-se que a camada de reacção formada no pino de sinal é mais uniforme e contínua.

### b) Condensador eletrolítico

Uma vez que ambos os pinos do condensador electrolítico possuem a mesma composição química, apenas são apresentados os resultados de um dos pinos do condensador electrolítico da versão 1 da placa de circuito impresso com largura de pista de 1 mm. Na Figura 55 encontra-se a microestrutura da junta de soldagem do pino do condensador electrolítico (Z1 - pino, Z2 – solda, Z3 – camada de reacção e Z4 – acabamento superficial do pino).

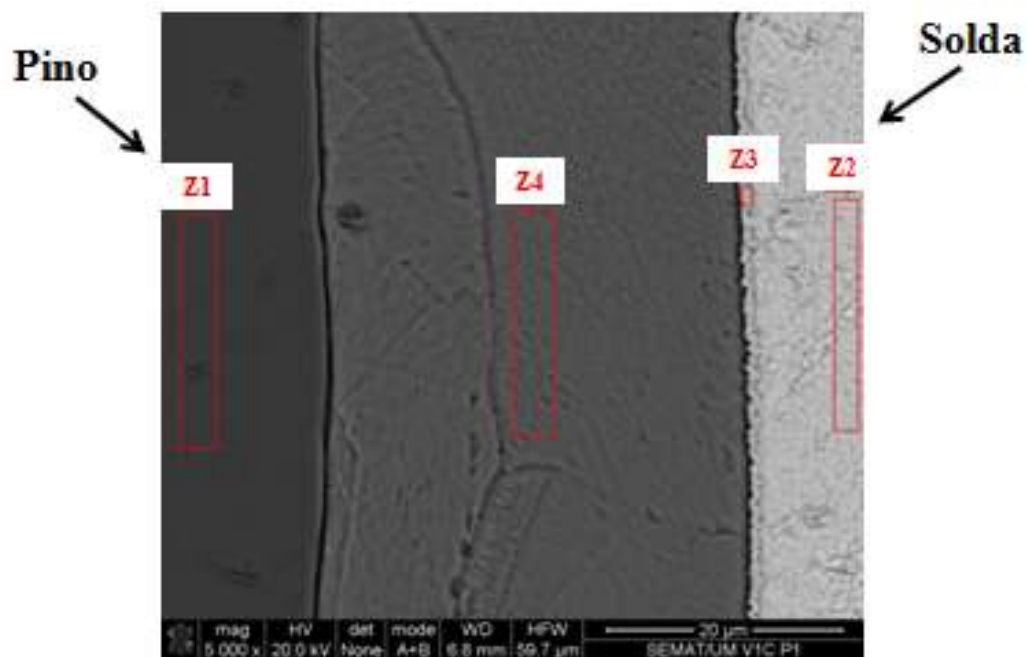


Figura 55 - Condensador eletrolítico.

---

O pino do condensador electrolítico (Z1) é composto por aço e o seu acabamento superficial (Z4) é composto por cobre (Cu).

A composição química da camada de reacção entre a solda e o pino do componente (Z3) encontra-se na Tabela 14.

**Tabela 14 - Composição química Z3.**

<b>Elemento</b>	<b>Wt%</b>
Sn	57,55
Cu	42,45

A camada de reacção formada entre o pino do condensador electrolítico e a solda é uniforme e contínua.



---

## 5. CONCLUSÕES

As principais conclusões a que se chegou após a realização deste trabalho referem-se ao: efeito do número, distribuição e largura de pista das camadas de cobre das placas de circuito impresso e tipologia de componentes utilizados (diferente tamanho e diferente composição).

Relativamente às características das camadas de cobre, pode concluir-se que:

- ambos os componentes utilizados no testes cumpriram o critério de 75% de enchimento do furo em todas as configurações de camadas de cobre testadas;

- o aumento do número de camadas de cobre na placa de circuito impresso provoca uma maior dissipação térmica da placa de circuito impresso;

- a distribuição das camadas condutoras de cobre na placa de circuito impresso afecta a dissipação térmica da mesma. Para um mesmo número de camadas de cobre se estás se encontram ligadas às superfícies da placa de circuito impresso, além de ocorrer dissipação térmica através de condução, irá também ocorrer dissipação térmica através de convecção aumentando a dissipação térmica da placa;

- a versão com 6 camadas condutoras com ligação à superfície provoca uma elevada dissipação térmica da placa de circuito impresso. O *gap* de temperatura obtida nos conectores, foi o mais baixo de todas as versões testadas;

- a placa com 0,5 mm de largura de pista possui uma menor dissipação térmica que as placas com 0,8 e 1 mm de largura de pista;

- há um maior enchimento do furo nas placas com 0,5 mm de largura de pista e um menor enchimento de furo nas placas com 1 mm de largura de pista.

Efeito dos componentes:

- o *gap* de temperatura nos conectores é inferior ao obtido, em virtude da condutibilidade térmica dos conectores ser superior à dos condensadores eletrolíticos;

- a maior dissipação térmica nos conectores originou uma ligeira diminuição do enchimento dos furos quando comparado com os condensadores eletrolíticos;

- além da elevada dissipação térmica, os conectores possuem pinos de massa que não se encontram com as melhores condições de molhabilidade, afectando também a capacidade para enchimento dos furos.

---

Quanto à caracterização das juntas de soldagem pode concluir-se que:

- ambos os componentes possuem uma camada de reacção continua e uniforme;
- devido ao limitado alcance do equipamento não foi possível identificar os compostos intermetálicos formados em cada um dos componentes;
- nas juntas de soldagem dos conectores foram detectados vazios, podendo estes estar relacionados com presença de humidade nos pinos do conector ou na placa de circuito impresso. No entanto, visto que este fenómeno foi frequente no conector e no condensador eletrolítico não foi verificado, pode deduzir-se que a presença de vazios está relacionada com os componentes.

---

## 6. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização deste trabalho foi possível tirar conclusões sobre o comportamento térmico verificado nas diferentes versões de camadas condutoras e as juntas de soldagem obtidas. No entanto, seria pertinente:

- avaliar a dissipação térmica em camadas de cobre mais extensas (lateralmente). Na placa de teste utilizada, as camadas condutoras não se encontravam ligadas a nenhuma massa lateral, apenas se encontravam ao redor dos componentes. Seria importante avaliar se a dissipação térmica ocorreria da mesma forma, ou se a dissipação térmica vertical é afectada pela condução térmica lateral;

- fazer uma caracterização estrutural e química exaustiva das características das juntas de soldagem, em particular da natureza dos compostos intermetálicos formados e qual o impacto de diferente dissipação térmica na microestrutura das juntas de soldagem formadas.



---

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. F. Fuchs, G. Pinter, and M. Tonjec, “Determination of the orthotropic material properties of individual layers of printed circuit boards,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 52, no. 11, pp. 2723–2730, 2012.
- [2] M. Ancău, “The optimization of printed circuit board manufacturing by improving the drilling process productivity,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 55, no. 2, pp. 279–294, 2008.
- [3] E. Havia, E. Bernhardt, T. Mikkonen, H. Montonen, and M. Alatalo, “Implementation of Lead-Free Wave Soldering Process,” *Eltupak*, pp. 1–15, 2005.
- [4] R. Mendez, H. Lowe, I. Marin, C. Monterrey, and C. Toronto, “Pb-Free Selective Wave Solder Guidelines for Thermally Challenging PCBs.”
- [5] S. Consiglio, T. Fleschutz, G. Seliger, and J. Seutemann, “Development of a Duothermal Soldering Process,” vol. 55, no. 1, pp. 1–4, 2006.
- [6] J. Li, H. Duan, K. Yu, L. Liu, and S. Wang, “Characteristic of low-temperature pyrolysis of printed circuit boards subjected to various atmosphere,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 11, pp. 810–815, 2010.
- [7] M. P. Groover, “Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, processes and systems,” p. 1025, 2010.
- [8] R. Kisiel, J. Borecki, J. Felba, and A. Moscicki, “Climatic testing of PCB interconnections made by electrically conductive adhesives,” no. September, pp. 24–27, 2006.
- [9] “[http://www.google.de/imgres?imgurl=http://www.ami.ac.uk/courses/ami4931\\_pcd/u01/images/PS0008.gif&imgrefurl=http://www.ami.ac.uk/courses/ami4931\\_pcd/u01/&h=266&w=742&sz=60&tbnid=2UQ7SINFj97vIM:&tbnh=90&tbnw=251&zoom=1&usg=\\_\\_NDcsOKoivjvIosFK-BkutyaEJok=&do](http://www.google.de/imgres?imgurl=http://www.ami.ac.uk/courses/ami4931_pcd/u01/images/PS0008.gif&imgrefurl=http://www.ami.ac.uk/courses/ami4931_pcd/u01/&h=266&w=742&sz=60&tbnid=2UQ7SINFj97vIM:&tbnh=90&tbnw=251&zoom=1&usg=__NDcsOKoivjvIosFK-BkutyaEJok=&do)” .
- [10] J. Clyde F. Coombs, *Printed Circuits Handbook, Sixth Edition* . .
- [11] Q. Zhua, Pranav Shrotriyab, N. R. Sottosb, and P. H. Geubelle, “Three-dimensional viscoelastic simulation of woven composite substrates for multilayer circuit boards,” 2013.
- [12] L. N. Ji, Y. Gong, and Z. G. Yang, “Failure investigation on copper-plated blind vias in PCB,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 50, no. 8, pp. 1163–1170, 2010.
- [13] Rudolf Strauss, *SMT Soldering Handbook*.

- 
- [14] M. S. A. Aziz, M. Z. Abdullah, C. Y. Khor, and F. C. Ani, "Influence of pin offset in PCB through-hole during wave soldering process : CFD modeling approach ☆," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 48, pp. 116–123, 2013.
- [15] H. R. Kotadia, P. D. Howes, and S. H. Mannan, "A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders," *Microelectron. Reliab.*, vol. 54, no. 6–7, pp. 1253–1273, 2014.
- [16] M. Abtey and G. Selvaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 27, no. 5–6, pp. 95–141, 2000.
- [17] A. W. W.J. Plumbridge, R.J. Matela, *Structural integrity and reliability in electronics: enhancing performance in a lead-free environment* .
- [18] S. M. Darwish, S. Al-Habdan, and a. Al-Tamimi, "Knowledge-base for electronics soldering," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 97, no. 1–3, pp. 1–9, 2000.
- [19] N. Mookam and K. Kanlayasiri, "Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn–0.3Ag–0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate," *J. Alloys Compd.*, vol. 509, no. 21, pp. 6276–6279, 2011.
- [20] M. Liukkonen, E. Havia, H. Leinonen, and Y. Hiltunen, "Application of self-organizing maps in analysis of wave soldering process," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 3, pp. 4604–4609, 2009.
- [21] M. S. Abdul Aziz, M. Z. Abdullah, C. Y. Khor, a. Jalar, and F. Che Ani, "CFD modeling of pin shape effects on capillary flow during wave soldering," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 72, pp. 400–410, 2014.
- [22] "<http://www.labelectron.org.br/certifique-se-eletronica/janeiro-2011/soldagem-seletiva-de-componentes-pth-uma-nova-solucao-na-montagem-de-placas-eletronicas-complexas.html>."
- [23] "[http://www.pcb007.com/articlefiles/47406-Selective\\_Sold.jpg](http://www.pcb007.com/articlefiles/47406-Selective_Sold.jpg)."
- [24] "IPC-A-610D."
- [25] "<https://www.google.pt/search?q=diagrama+sn+Ag+cu&sa=X&biw=1366&bih=651&tbm=isch&imgil=mCWo9LPop2UIXM%253A%253BeRD3XF4YUD2BaM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fwww.metallurgy.nist.gov%25252Fphase%25252Fsolder%25252Fagsn.html&source=iu&pf=m&fir=mCWo9LPop2UIXM%25>."
- [26] P. Biocca and C. Rivas, "Case Study on the Validation of SAC305 and SnCu Based Solders in SMT, Wave and Hand-soldering at the Contract Assembler Level," *2007 12th Int. Symp. Adv. Packag. Mater. Process. Prop. Interfaces*, pp. 152–157, 2007.
- [27] C. Mauney, "Thermal Considerations for Surface Mount Layouts," *Appl. Note, Texas Instruments*, pp. 1–16, 2005.
-

- 
- [28] C. Faure and S. Corporation, “Chapter 4 : Lead-Free Wave Soldering,” *Alternatives*.
- [29] A. Pietriková and J. Ď. Urišín, “Microstructure of Solder Joints and Isothermal Aging,” vol. 10, no. 3, pp. 43–46, 2010.