



**Universidade Federal do Amazonas**  
**Faculdade de Tecnologia**  

---

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de**  
**Produção - PPGE**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**NATHÁLIA MATTOS TERRA**

**UTILIZAÇÃO DE TESTES METALGRÁFICOS (CROSS-SECTION, DYE PRY E  
RAIO X) PARA ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DE DEFEITO: ESTUDO DE CASO EM  
UMA EMPRESA DE MANUFATURA DE PLACA DE COMPUTADOR**

MANAUS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

NATHÁLIA MATTOS TERRA

UTILIZAÇÃO DE TESTES METALGRÁFICOS (CROSS-SECTION, DYE PRY E  
RAIO X) PARA ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DE DEFEITO: ESTUDO DE CASO EM  
UMA EMPRESA DE MANUFATURA DE PLACA DE COMPUTADOR

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu, em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

**Area de concentração:** Gestão da produção e Operações.

**Linha de Pesquisa:** Gestão de Operações e Processos da Produção e Serviços.

**Orientador:** Sandro Breval Santiago

MANAUS  
2024

### Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

T323u	<p>Terra, Nathália Mattos</p> <p>Utilização de testes metalográficos (cross-section, dye pry e raio x) para análise de causa raiz de defeito: estudo de caso em uma empresa de manufatura de placa de computador /Nathália Mattos Terra . 2024</p> <p>120 f.: il.; 31 cm.</p> <p>Orientador: Sandro Breval Santiago</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)</p> <p>Universidade Federal do Amazonas.</p> <p>1. Cross section . 2. raio X . 3. dyepry . 4. engenharia da qualidade . 5. testes metalograficos I. Santiago, Sandro Breval II. Universidade Federal do Amazonas III. Título</p>
-------	--

**NATHÁLIA MATTOS TERRA**

**UTILIZAÇÃO DE TESTES METALOGRÁFICOS (CROSS-SECTION, DYE PRY E RAIOS X) PARA ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DE DEFEITO: ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE MANUFATURA DE PLACA DE COMPUTADOR**

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu, em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

**Area de concentração:** Gestão da produção e Operações.

**Linha de Pesquisa:** Gestão de Operações e Processos da Produção e Serviços

**Orientador:** Sandro Breval Santiago

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Sandro Breval Santiago  
Universidade Federal do Amazonas  
Orientador e Presidente

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira  
Universidade Federal do Amazonas  
Membro PPGEP

Prof. Dr. Antonio do Nascimento Silva Alves  
Universidade Federal do Amazonas  
Membro Externo

Manaus, 19 de maio de 2024

## **Agradecimentos**

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a Deus e à minha amada família por todo o apoio e amor que me proporcionaram ao longo desta jornada de pesquisa e estudo durante o mestrado.

Agradeço a Deus por me conceder a sabedoria, a paciência e a força para enfrentar os desafios que surgiram durante a elaboração desta dissertação. Suas bênçãos foram fundamentais para minha motivação e determinação em cada etapa.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, seja oferecendo palavras de encorajamento, seja compartilhando minha alegria nas conquistas e me apoiando nos momentos difíceis, não há palavras suficientes para expressar minha gratidão. Seu amor e apoio constante foram minha âncora em todas as tempestades.

## RESUMO

A metalografia permite observar a microestrutura de soldas metálicas e é através dessa observação que podemos entender o desempenho macroestrutural de determinados componentes e por isso exerce um papel muito importante para a compreensão do comportamento dos materiais e para a identificação de anomalias que causam o não funcionamento ou diminuem o tempo útil de vida dos produtos. Este trabalho tem como objetivo buscar subsídios tecnológicos para melhorar a identificação dos defeitos através dos ensaios mecanográficos, visando a melhor compreensão das relações de soldabilidade, as diferentes características dos componentes e os defeitos gerados. Assim a proposta para este trabalho seria: a) identificar, usando os ensaios metalógrafos de Cross section, Dye Pry e raios-X a causa raiz dos problemas de soldabilidade encontrados no processo produtivo; b) Cross Section: verificar através de um ensaio feito a partir de um corte com embutimento a Frio com Resina Epóxi de uma placa montada e com o auxílio de um microscópio x50 utilizado para avaliar a microestrutura de uma dada amostra, em uma secção determinada, encontrando resultados como medidas de espessuras de camadas, presença de voids, curtos, trincas; c) Dye Pry: entender através do ensaio com um líquido penetrante detectar defeitos de rupturas em superfícies, tais como fendas e trincas, que não são detectáveis a olho nu; d) Raios-X: realizar imagens capazes de análises de conexões de balls de BGA, interconexões de placas de circuito, presença de voids, não preenchimento de barris e rupturas nas trilhas e) identificar e quantificar anomalias encontradas nas microestruturas da estrutura da solda para encontrar a causa raiz do defeito através da análise de imagens. Como resultados esperados, o estudo visa apresentar os testes e as análises metalográfica, utilizando em placas eletrônicas de notebook, porém os dados fornecidos podem ser usados para qualquer tipo de produto, os insumos para sustentar as interpretações das várias microestruturas são pautadas em normas internacionais.

**Palavras-chave:** Cross section, raio X, dyepry, engenharia da qualidade, testes metalograficos.

## **ABSTRACT**

The Metallography allows us to observe the microstructure of metallic welds, it is through this observation that we can understand the macro structural performance of certain components and therefore plays a very important role in understanding the behavior of materials and in identifying anomalies that cause them not to work or shorten the useful life of products. This paper summarizes the ongoing researches about the improvement and the identification of defects through metallographic tests. The essential objective should be at a better understanding of the weld ability relationships, the different characteristics of the components and the defects generated, the proposal for this work would be: a) to identify, using the Cross section, Dye Pry and X-ray metallographic tests, the root cause of the weld ability problems found in the production process; b) Cross Section: check through a test made from a cut with cold embedding with Epoxy Resin of a mounted plate and with the use a x50 microscope to evaluate the microstructure of a chosen sample, in a chosen section, finding results such as layer thickness measurements, presence of voids, shorts, cracks; c) Dye Pry: understand, through testing with a penetrating liquid, to detect surface rupture defects, such as crevices and cracks, which are not detectable with the naked eye; d) X-rays: perform images capable of analyzing connections of BGA balls, interconnections of circuit boards, presence of voids, non-filling of barrels and ruptures in the tracks e) identify and quantify anomalies found in the microstructures of the solder structure to find the root cause of the defect through image analysis. As expected, results, the study aims to present the tests and metallographic analysis, using notebook electronic boards, however the data provided can be used for any type of product, the technical support for the interpretations of the various microstructures are based on international standards.

**Keywords:** Cross section, raio X, dye pry, Quality Engineering, Metallography test.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1** - Exemplos desse tipo de conexão: Soquetes, Conectores, Pinos, etc

**Figura 2** - Exemplos desse tipo de conexão: CI

**Figura 3** - Transformador

**Figura 4** - Placa com shields

**Figura 5** - Ligas de SN Capacitor

**Figura 6** - Ligas de SN Resistores

**Figura 7** - Ligas de cobre

**Figura 8** - Metais de conexão de solda-PCI

**Figura 9** - Defeitos relacionados a umidade

**Figura 10** - PCB com bolha defeito devido a umidade

**Figura 11** - Capacitor com oxidação

**Figura 12** - Componente tipo BGA, em (a) têm-se a imagem da face superior e da face inferior de um com 112 terminais e (b) têm-se a face inferior de um com 552 terminais.

**Figura 13** - Seção transversal de um componente tipo FCBGA

**Figura 14** - Perfil térmico do forno de refusão

**Figura 15** - Cross Section

**Figura 16** - Dye Pry

**Figura 17** - Raio X

**Figura 18** - Raio X Processo produtivo SMT

**Figura 19** - 6 pontos para traçar o perfil BOT e TOP

**Figura 20** - Perfil BOT

**Figura 21** - Perfil TOP

**Figura 22** - Proposta de teste TOP

**Figura 23** - Corte JWLAN1

**Figura 24** - IMC JWLAN1

**Figura 25** - Aceitabilidade JWLAN1

**Figura 26** - Primeira fila BGA processador

**Figura 27** - BGA e IMC

**Figura 28** - Mascara de solda



- Figura 29** - Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) entre esferas de solda
- Figura 30** - Primeira fila de um processador com void
- Figura 31** - cross section de um processador com furos no *ball*
- Figura 32** - Primeira fila de um processador com curto
- Figura 33** - Cross section de um curto de solda
- Figura 34** - IM da placa com curto de solda
- Figura 35** - cross section de 6 balls de um processador
- Figura 36** - Falha de “HEAD IN PILLOW NO BALL” ou cabeça sobre o travesseiro quando a solda não tem ligação com o PAD
- Figura 37** - Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) – Conexões de solda
- Figura 38** - Trinca no BGA visão cross section
- Figura 39** - Void no BGA visão cross section
- Figura 40** - Corte JDIMM1
- Figura 41** - IMC JDIMM1
- Figura 42** - Terminais JHDMI1
- Figura 43** - IMC JHDMI1
- Figura 44** - Aceitabilidade JHDMI1
- Figura 45** - Proposta de teste Botton
- Figura 46** - Corte JLAN
- Figura 47** - IMC JLAN
- Figura 48** - Critérios de aceitabilidade preenchimento de furo
- Figura 49** - Cross section PQBL1
- Figura 50** - IMC PQB11
- Figura 51** - Conjuntos pela tecnologia de montagem em superfície
- Figura 52** - Proposta de teste lado TOP
- Figura 53** - dye pry UC1 Processador
- Figura 54** - Dye pry cantos UC1 processador
- Figura 55** - Visão PCBA área UC1 processador
- Figura 56** - Dye pry cantos UC1 processador
- Figura 57** - Balls sem penetração de tinta
- Figura 58** - Ball que tem 80-100% de penetração de tinta que indica rachadura
- Figura 59** - Rachaduras nas juntas de solda na camada intermetálica (IMC)

**Figura 60** - Defeito “Head in Pillow”

**Figura 61** - Falhas do teste dye pry

**Figura 62** - Classificações Dye pry

**Figura 63** - Classificações real teste de Dye pry

**Figura 64** - Defeito interno de cabo quebrado

**Figura 65** - Proposta para teste

**Figura 66** - JTC1, JHDMI e JLAN

**Figura 67** - Comparação do preenchimento do barril bom e ruim

**Figura 68** - Anomalias de soldagem – void /furos (Pin Holes/Blow Holes)

**Figura 69** - Raio X JDIMM1

**Figura 70** - Raio X JDIMM2

**Figura 71** - Curto de solda entre terminais

**Figura 72** - Curto de solda

**Figura 73** - *Void* em ball

**Figura 74** - Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) – Alinhamento

**Figura 75** - Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) – Alinhamento

**Figura 76** - Medições do tamanho do ball com má formação

**Figura 77** - Processador com curto de solda

**Figura 78** - Curto de solda

**Figura 79** - Defeito curto de solda

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Exemplo de ligas lead-free e suas aplicações.

Tabela 2: Shenmao-SAC305-Solder Paste-PF606-P-T3J-Type 3-SAC305-  
Lead-Free-No-Clean

Tabela 3 – Furos passantes metalizados com terminais de componentes,  
mínimas condições aceitáveis.

Tabela 4 – Classificação de *Void*

Tabela 5 – Critérios dimensionais – Componentes BGA com bolas  
colapsantes

## LISTA DE SIGLAS

AOI - Inspeção automática da placa

BGA - Matrizes de grade de em formato de bola

BTC - Bottom termination components

BTC - Componentes de terminação inferior

BTC - componentes de terminação inferior

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva

EMI - Interferência eletromagnética

FBGA - Fine pitch BGA

FPY - Taxa de primeira aprovação

FTY - Taxa de aprovação na primeira vez

IC - Circuito integrado

ICT - In-Circuit-Teste

IMC - Camada intermetálica

IMC - Formação de intermetálicos

IPC - Aceitabilidade e indicadores de conformidade

IPC - Associação Conectando a Indústrias Eletrônicas

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

OSP - Proteção de Soldabilidade Orgânica

PAD - Superfície do metal base

PCB - Placa de circuito impresso

PCBA - Placa de circuito impresso montada

PCI - Padrão de interconexão de componentes periféricos

PCI - Placa de circuito impresso

PIM - Polo Industrial de Manaus

PTH - Pinos através de Furos

PTH - Tecnologia de montagem por pino através do buraco

QFP - Quad Flat Packages

RoHS - Restrição de Substâncias Perigosas

SMT - Tecnologia de montagem em superfície

SOIC - Small Outline Integrated Circuits

SPI - Inspeção de pasta de solda

TAL - Time above liquidus

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1 CONTEXTO DO PROBLEMA</b> .....	18
<b>1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA</b> .....	18
<b>1.2.1. Objetivo Geral</b> .....	19
<b>1.2.2. Objetivos Específicos</b> .....	19
<b>1.3 JUSTIFICATIVA</b> .....	19
<b>1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO</b> .....	20
<b>1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b> .....	20
<b>CAPÍTULO II</b> .....	22
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	22
<b>2.2. CONCEITOS DE SOLDA</b> .....	24
2.2.1. Ligas de solda .....	25
2.2.1.1 Latão (Cu/Zn) E BRONZE (Sn/Cu) .....	26
2.2.1.2 Ferro-níquel, ferro-cobre, cobre-níquel .....	27
2.2.1.3. Ferro-carbono (AÇO) .....	29
2.2.1.4. Ligas de Estanho .....	30
2.2.1.5. COBRE .....	32
2.2.2. PCB .....	32
2.2.3. BGA .....	37
2.2.4. SMT .....	38
2.2.5. PTH .....	39
2.2.6. Soldering – Com formação de IMC (formação de intermetálicos) .....	40
2.2.6.1. Processo de refusão .....	41
2.2.6.2. Processo de Printagem em SMT .....	44
2.2.6.3. Processo de teste de PCBA .....	46
2.3. Testes indicadores de conformidade .....	46
2.3.1 Raio X .....	48
2.3.2. Cross section .....	52
2.3.3. Dye Pry .....	54
<b>3. CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	56
3.1. Impressão em pasta de solda: .....	58
3.2. Perfil utilizado .....	59
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	63
4.1 Delineamento da Pesquisa .....	63

4.2	Indicação das etapas a serem desenvolvidas para o alcance dos objetivos.....	63
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>66</b>
5.1	RAIO X.....	66
5.1.1	PROPOSTA TOP .....	67
5.1.1.1	JTC1, JHDMI e JLAN .....	68
5.1.1.2	JDIMM1 e JDIMM2.....	70
5.1.1.3	C1 .....	72
5.2	CROSS SECCTION .....	79
5.2.1	LADO TOP .....	79
5.2.1.1	JWLAN1.....	80
5.2.1.2	UC1 BGA.....	83
5.2.1.3	JDIMM1 .....	92
5.2.1.4	JHDMI1 .....	94
5.2.2	LADO BOTTON.....	96
5.2.2.1	LAN.....	97
5.2.2.2	PQBL1 .....	100
5.3	DYE PRY .....	102
5.3.1	PROPOSTA TOP .....	102
6	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES .....	112
7	IMPACTOS DA PESQUISA .....	114
7.1	ACADÊMICO.....	114
7.2	ECONÔMICO.....	114
7.3	SOCIAL .....	114
	<b>REFERÊNCIA</b> .....	<b>115</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As empresas buscam aprimorar-se a cada dia para manterem-se competitivas e conquistar novos mercados. Precisam se capacitar tecnologicamente e intelectualmente para garantir sua sobrevivência, favorecendo a competitividade e lucratividade. Os produtos mudam cada vez mais rapidamente, as necessidades de mercado modificam e há uma competição cada vez maior por menores custos entre as empresas e produtos. Dessa forma, há uma busca cada vez maior por agilidade, flexibilidade e qualidade na concepção e fabricação de produtos.

Com o rápido desenvolvimento da ciência e tecnologia no ramo da eletrônica, a miniaturização dos componentes, alta tecnologia aplicada e alta complexidade de montagem são mais proeminentes de aparecerem falhas mais complexas e de difícil identificação, tornando necessário o desenvolvimento de novos métodos, utilização de novos equipamentos e inovações tecnológicas para a solução e identificação das causas.

Existem muitas técnicas para a identificação das falhas relacionadas à soldabilidade ou anomalias encontradas no processo de fabricação, para análise de PCB e análise de PCBA e certificado pelos padrões de aceitabilidade visual o uso das técnicas de metalografia. Que não se restringe apenas ao controle de qualidade, mas também é um instrumento de pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e estudos relacionados a ciclo de vida de materiais, sendo uma técnica de fácil utilização, simples e rápida, que permite a análise ampla do material estudado. (Padilha e Ambrozio Filho, 2006)

Neste estudo, a metalografia visa identificar sobre os problemas de solda encontrados em indústrias de placas eletrônicas de computadores. Para abordar essa temática, se faz uso das normas técnicas IPC-A-600, IPC-A-610, IPC- 2221, IPC-7093, IPC- 7095, IPC-TM 650, bibliografias e artigos relacionados que trabalhem com os métodos propostos de Cross section, dye pry e raio-X utilizados para análise de placas eletrônicas.

A análise de Cross section na seção transversal é apenas uma das muitas técnicas de controle de qualidade usadas pelos fabricantes. Por ser uma forma destrutiva de teste, pode nos permitir encontrar defeitos ocultos, não perceptíveis, de difícil detecção em um PCB. Ao cortar uma PCB em amostras menores, podemos



realizar inspeções e análises detalhadas. Se um elemento singular do PCB falhar, todo o sistema também poderá falhar. A seção transversal da placa de circuito impresso (às vezes chamada de micro seção da placa de circuito impresso) nos permite inspecionar a qualidade interna da placa de circuito impresso e investigar quaisquer falhas. (Hendrickx *et al.*, 2007)

O corte transversal, de Cross section é caracterizada e é usada com o objetivo de identificar uma causa física para a falha e alimentar essa informação de volta para o engenheiro, tornando possível que o problema possa ser corrigido. A análise por microscopia óptica permite observar a compactação das camadas e a distribuição das fibras e resina no interior das camadas da PCI. (Boit, 2005)

Para resolver o problema da análise de solda em BGA o uso do raio X digital é utilizado para inspeção de defeitos em placas de circuito impresso (PCB). Que consiste num sistema de inspeção visual que apresenta precisão da análise do defeito mostrando sem grau de dificuldade alta problemas na junta de solda do Ball grid array (BGA) da placa de circuito. Como resultado, o uso do microscópio consegue programar a inspeção invisível de defeitos nas juntas de solda no BGA atrás do método de observação das conformidades. (Wang, Wang e Zhang, 2014)

Segundo a IPC-TM 650(2020), norma do método de Dye and Pry, esta consiste em um teste utilizando na aplicação de um líquido penetrante de corante para análise de componentes de tecnologia de montagem em superfície (SMT) para confirmar a conformidade do processo de montagem e a qualidade/integridade da junta de solda. Normalmente, esse método é usado em ball grid arrays (BGAs) para avaliar a qualidade/integridade de suas juntas de solda; no entanto, ele também pode ser usado em outras peças SMT, como bottom termination components (BTCs) e conectores.

Portanto, busca-se através desta pesquisa demonstrar algumas análises feitas para encontrar causas raiz de problemas corriqueiros do processo de SMT, documentar e identificar através de ensaios metalógrafos as microestruturas causadoras de defeito, realizar inspeções de soldas, analisar características estruturais, medições de intermetálicos e a análise de falhas elétricas, visando melhorar a produtividade, qualidade de processo e do produto final.

## **1.1 CONTEXTO DO PROBLEMA**

O contexto do problema desta pesquisa emerge da relevância crítica que a qualidade de produtos industriais possui nos cenários econômicos e sociais contemporâneos. A indústria enfrenta constantes desafios relacionados à garantia da qualidade, a análise das conformidades de processo e análise de defeitos é uma etapa fundamental na investigação e resolução desses problemas, uma vez que permite identificar as origens subjacentes dos defeitos, possibilitando a implementação de correções eficazes e preventivas.

Nesse contexto, o uso de testes metalográficos, como Cross-Section, Dye Pry e Raio X, ganha destaque devido à sua capacidade de fornecer mais informações detalhadas sobre a estrutura e integridade dos materiais, apresentando um levantamento dos dados práticos e teóricos e apresentação com os critérios de aceitabilidade principalmente pautados nas normas técnicas com relação à soldabilidade dos componentes.

Adicionalmente, o contexto atual é marcado por avanços tecnológicos e novas exigências de qualidade, que demandam uma análise de causa raiz cada vez mais precisa e abrangente, a fim de atender às expectativas de qualidade cada vez mais rigorosas e manter a competitividade das empresas no mercado global.

Por fim, o contexto do problema também se insere em um cenário de busca constante por eficiência, sustentabilidade e segurança na produção industrial. A identificação precoce e precisa das causas raiz de defeitos não apenas reduz os custos associados a retrabalhos, alinhando-se com as crescentes preocupações com a qualidade e com o cliente. Portanto, esta pesquisa busca responder a um desafio premente na indústria, contribuindo para o avanço das práticas de controle de qualidade e para o alcance de padrões mais elevados de excelência e responsabilidade nas operações industriais.

## **1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA**

O objetivo desta dissertação é investigar, analisar e avaliar de forma abrangente a utilização de testes metalográficos, incluindo as técnicas de Cross-Section, Dye Pry e Raio X, como ferramentas fundamentais para a identificação e conformidades e defeitos. A evolução das novas tecnologias industriais e de novos

produtos trazem a necessidade do estudo aprofundado, compreensão e análise da capacidade individual de novas técnicas e mais rápidas para a análise de defeitos, visando, assim, aprimorar a confiabilidade e a excelência nos processos de fabricação e produção industrial.

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como proposta a avaliação dos testes metalógrafos para validação da conformidade dos componentes em PCBA de computadores.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar os fatores que colaboram para o aumento da taxa de falha
- Avaliar a capacidade de cada técnica metalográfica em identificar e caracterizar defeitos em materiais metálicos, tais como fissuras, trincas, inclusões e descontinuidades.
- Investigar anomalias do material nas diferentes microestruturas causadoras de perda da funcionalidade do produto;
- Demonstrar a análises de situações reais de defeitos em componentes industriais para demonstrar a utilidade prática das técnicas metalográficas na resolução de problemas e na prevenção de recorrência de defeitos.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

No estudo realizado pretendeu-se, a partir da aplicação de testes metalográficos, como Cross-Section, Dye Pry e Raio X, com a necessidade da indústria em identificar e mitigar defeitos em materiais e componentes, devido ao impacto direto que esses defeitos podem ter na qualidade dos produtos, na segurança dos consumidores e no custo de produção. A apresentação dos testes para uma promissora solução no intuito fazer análise de causa raiz de defeitos ou checar a conformidade do processo, uma vez que essas técnicas oferecem uma visão detalhada da estrutura interna dos materiais e podem revelar informações cruciais sobre a origem e natureza dos defeitos. Esta pesquisa visa, portanto, fornecer uma base sólida para a aplicação eficaz dessas técnicas, auxiliando a melhorar seus processos de controle de qualidade e reduzir custos associados a retrabalhos e recalls.

Além disso, a justificativa para este estudo é reforçada pelo atual estado de evolução tecnológica e inovação na área de testes não destrutivos e destrutivos. Portanto, esta pesquisa busca acompanhar essa evolução e explorar como as técnicas metalográficas podem ser integradas a abordagens modernas de análise de dados para aprimorar a eficácia na resolução de problemas relacionados à qualidade industrial.

Por fim, a importância da pesquisa reside na sua capacidade de disseminar conhecimentos e melhores práticas para a comunidade acadêmica e industrial, possibilitando que empresas de diferentes setores, diferentes produtos possam beneficiar-se das descobertas, recomendações e comparação com as normas técnicas resultantes desta dissertação. Ao compreender como as técnicas metalográficas podem ser aplicadas na vida real com a análise de causa raiz de defeitos e checar a conformidade do processo, as organizações terão a oportunidade de aprimorar significativamente seus processos de fabricação e garantia de qualidade, promovendo a entrega de produtos mais confiáveis e seguros aos consumidores.

#### **1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO**

O estudo estará limitado a placas eletrônica do produto notebook, no que diz respeito a aplicação dos testes metalográficos, especificamente os métodos de Cross-Section, Dye Pry e Raio X. O escopo abrange vários componentes industriais e a forma de análise individual, a análise se concentra na identificação e caracterização de defeitos físicos, como fissuras, trincas, inclusões e descontinuidades, e não aborda defeitos de natureza química ou funcional. A pesquisa será conduzida com base em estudos de caso, análises laboratoriais e revisões da literatura relacionadas ao uso dessas técnicas metalográficas, oferecendo uma perspectiva abrangente sobre suas aplicações e limitações específicas na análise de causa raiz de defeitos em materiais e componentes industriais.

#### **1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho será dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro o de Introdução, contextualizando o problema em termos da importância dos testes metalográficos para a indústria de produção de placas eletrônicas. São explicitados ainda o contexto do problema, os objetivos do estudo com sua justificativa, delimitações e estrutura.

O segundo capítulo é um estudo bibliográfico das principais falhas, conceitos relacionados ao tema e normas pertinentes. Além disso, será feito um estudo da ocorrência de falhas em PCBA e conformidades de processo comparadas com o que pode ser encontrado em normas técnicas, utilizando-se dados coletados durante o período de um ano com outros modelos.

No terceiro capítulo está a Metodologia utilizada de maneira a demonstrar o processo de pesquisa bem como o seu embasamento conceitual.

A quarta capítulo focará no uso das ferramentas: Raio X, cross section e Dye Pry, como ferramenta para análise da confiabilidade e conformidade do processo de fabricação do produto, por atuar com base em estudos/testes de confiabilidade, o objetivo é observar e caracterizar os comportamentos de confiabilidade, da probabilidade de falha e da taxa de falha em relação ao tempo de um componente ou sistema. Esperando como resposta sempre a melhoria e garantia da qualidade.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as Conclusões e Considerações Finais quanto ao desenvolvimento da pesquisa e sugestões para pesquisas complementares para expandir a fronteira do conhecimento.

Cada parte deste trabalho está ligada diretamente á outra, pois o estudo visa apresentar testes realizados fornecem informações para a garantir a qualidade do produto, que por sua vez fornecerá dados e conhecimento, junto com a análise de ocorrência, para o estudo a de confiabilidade.

A complexidade do projeto eletrônico, é a identificação de modo significativos de falhas oriundas, principalmente, dos processos de solda. Para a realização desse serviço, a proposta é utilizar a análise de Cross Section, verificar e analisar a camada intermetálica da região soldas, a morfologia da esfera de solda, assim como ocorrências de trincas, contaminações e defeitos de posicionamento da máscara. Já a análise da ocorrência de voids e curtos-circuitos em soldagem de componentes do tipo BGA, com avaliação da quantidade, características e volume de solda por esferas, são feitas por meio da inspeção por Raios-X. Por fim, utiliza-se a técnica de Dye and Pry, com a aplicação de líquido penetrante para avaliação de descontinuidades nas esferas e junções da solda com o substrato (placa ou componente). Após a extração, são realizadas análises de cada fratura na solda em todas as balls e tabelas com a classificação das fraturas são geradas.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo são apresentados os conceitos básicos para o bom entendimento dessa proposta de pesquisa. A composição do Referencial Teórico divide-se em: Processo Produtivo SMT, IPC (Aceitabilidade e indicadores de conformidade) e Confiabilidade

#### 2.1 Metalografia

A metalografia, ensaio normatizado pela norma ASTM E407-99, é a ciência que estuda e caracteriza o comportamento microestrutura e elementos constituintes dos metais, ligas e outros materiais. Apresenta-se como a mais importante técnica de análise microestrutura dos metais, sendo possível definir as fases e a orientação cristalográfica dos grãos presentes (ASM International. Handbook Committee., 2004)

A realização de um ensaio metalógrafo tem início com a preparação da amostra, seguida por corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico (se for necessário). Com a amostra está pronta para ser observada, os processos se fazem necessários para que a luz ao ser incidida na amostra seja refletida de maneiras diferentes, dando assim tonalidades distintas para as fases, fato que realça o contorno das formas observadas. Com isso, se torna mais fácil a visualização e interpretação da amostra presente no microscópio. (Oliveira e Silva, 2023)

As normas técnicas de referência utilizadas nesse trabalho foram desenvolvidas pela associação IPC cujo objetivo é padronizar os requisitos de montagem e produção de equipamentos e montagens eletrônicas. Foi fundado em 1957 hoje é credenciado pelo American National Standards Institute (ANSI) como uma organização de desenvolvimento de padrões e é conhecido mundialmente por suas publicações dos padrões de aceitabilidade mais amplamente utilizados na indústria eletrônica.

IPC-A-600, Revision K, October 2020, Acceptability of Printed Boards, IPC, Northbrook, Illinois, (2020). – Norma utilizada aceitabilidade das características encontradas em placas nuas ou Printed Circuit Board (PCB)

IPC-A-610, Revision H, October 2020, Acceptability of Electronic Assemblies - Redline, IPC, Northbrook, Illinois, (2020). - Norma utilizada para comparação dos

critérios de aceitabilidade das características encontradas, classificação dos defeitos dependendo das características do componente e do produto utilizado.

IPC-2221, Revision B, November 2012, Generic Standard on Printed Board Design, IPC, Northbrook, Illinois, (2012). – Norma utilizada demonstrando de padrões impostos na fabricação de placas nuas ou Printed Circuit Board (PCB)

IPC-7095, Revision D, August 2019, Design and Assembly Process Implementation for BGAs, IPC, Northbrook, Illinois, (2019). – Norma utilizada demonstrando de padrões impostos na fabricação e características dos produtos de Ball grid array (BGA)

IPC-7093, Revision A, November 2020, Design and Assembly Process Implementation for Bottom Termination SMT Components, IPC, Northbrook, Illinois, (2020). – Norma utilizada demonstrando de padrões de componentes com terminais de Surface-mount technology (SMT)

IPC-TM 650, Revision A, October 2020, Test Methods Manual, IPC, Northbrook, Illinois, (2020). – Norma utilizada como padrão para o teste de Dye and Pry

## 2.2. CONCEITOS DE SOLDA

A União Europeia aprovou uma legislação denominada Política RoHS (Restrição de Substâncias Perigosas) que proíbe o uso de chumbo (Pb) e diversas outras substâncias em produtos eletrônicos a partir de julho de 2006. A partir deste ano, a utilização de um dos componentes mais utilizados na soldagem, o chumbo, não seria mais utilizada na soldagem eletrônica devido a esta legislação. Dentre as alternativas sem chumbo, a soldagem sem chumbo (SnAgCu) é um substituto bastante aceito, devido a sua melhor fluência, resistência à fadiga e estabilidade microestrutural. (Puttlitz e Galyon, 2007)

Uma das principais diferenças entre as soldas SnPb e SnAgCu sem chumbo é que a solda SnAgCu exige temperatura de refluxo mais alta que as soldas SnPb, o ponto de fusão é 217 °C - 219 °C, maior que a temperatura de solda SnPb, que tem um ponto de fusão de 183 °C. Também é necessário verificar a adaptação dos componentes do conjunto. Devem ser tomadas medidas para proteger os componentes contra possíveis danos causados por temperaturas de refluxo mais altas. Deve-se verificar a qualidade das uniões e dos materiais de soldagem e sua adequação para uma determinada aplicação. (Erinc, Schreurs e Geers, 2008)

A norma RoHS de 2006 trouxe várias restrições à composição da liga de solda para uso eletrônico. No entanto, a indústria brasileira e global ainda usa liga de solda estanho/chumbo para montagem de placas eletrônicas, então a indústria teve que se ajustar aos novos requisitos do mercado. Esta diretriz proíbe o uso de certas substâncias nos processos de industrialização. Na indústria eletroeletrônica, isso teve um impacto direto na liga de solda, pois não podia mais conter a substância chumbo. A indústria que exporta seus produtos para a Europa foi obrigada a mudar sua linha de montagem com o uso de novas ligas de solda que não continham chumbo como resultado dessa nova diretriz como exemplos na Tabela 1. A liga SnAgCu (Estanho, Prata e Cobre) é a liga que a indústria adotou em substituição a liga SnPb (Estanho, Chumbo). A liga SAC305 (Sn3Ag0.5Cu) é uma das mais conhecidas no Brasil em se tratando de ligas de solda sem chumbo. (Almeida *et al.*, 2013)



Tabela 1– Exemplo de ligas lead-free e suas aplicações.

Liga	Material	Ponto Eutético (°C)	Indústria
Sn3.5Ag	estanho/prata	221-226	Automotiva Militar Aeroespacial Consumo
Sn2.0Ag	estanho/prata		
Sn3.4Ag4.8Bi	estanho/prata/bismuto		
Sn7.5Bi2.0Ag	estanho/bismuto/prata		
Sn3.5Ag3.0Bi	estanho/prata/bismuto		
Sn7.5Bi2.0Ag0.5Cu	estanho/bismuto/prata/cobre	206-213	Militar Aeroespacial Consumo Automotivo Telecomunicações
Sn3.5Ag5.0Bi0.7Cu	estanho/prata/bismuto/cobre		
Sn2.0Ag4.0Bi0.5Cu0.1Ge	estanho/prata/bismuto/cobre/germanio		
Sn2.0Ag0.75Cu	estanho/prata/cobre		
Sn4.0Ag0.5Cu	estanho/prata/cobre		
Sn4.0Ag1.0Cu	estanho/prata/cobre		
Sn3.5Ag0.7Cu	estanho/prata/cobre		
Sn3.0Ag0.7Cu	estanho/prata/cobre		
Sn3.2Ag0.5Cu	estanho/prata/cobre		
Sn4.7Ag1.7Cu	estanho/prata/cobre		
Sn/Bi	estanho/bismuto		
Sn0.7Cu	estanho/cobre		
Sn/Zn	estanho/zinco	198,5	Consumo

**Fonte:** Almeida *et al.*, 2013

- Welding – metais bases (MB's) e adição (MA) se fundem formando uma conexão (MIG (metal inert gás) - fusão dos metais e adição)
- Brazing – apenas o metal de adição (MA) se funde os metais bases (MB's) permanecem no estado sólido ( $> 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – sem fusão dos metais base)
- Soldering – apenas o metal de adição (MA) se funde dissolvendo o metal base (MB) formando a camada intermetálica (IMC – intermetallic compounds)

### 2.2.1. Ligas de solda

A principal função da liga de solda é unir os componentes que se quer unir em um sistema. Embora grandes quantidades de ligas de solda possam ser usadas para soldar vários metais, apenas um pequeno percentual é usado para soldar componentes eletrônicos. Para distinguir as ligas de solda que são usadas na eletrônica e na microeletrônica das ligas de solda brasagem, as variações na

composição dessas ligas de solda são comuns, e eles também podem conter metais com baixo ponto de fusão para diminuir a temperatura de fusão do sistema como um todo, como por exemplo: o bismuto (Bi), índio (In), antimônio (Sb), prata (Ag), zinco (Zn), entre outros.(HWANG, 1996)

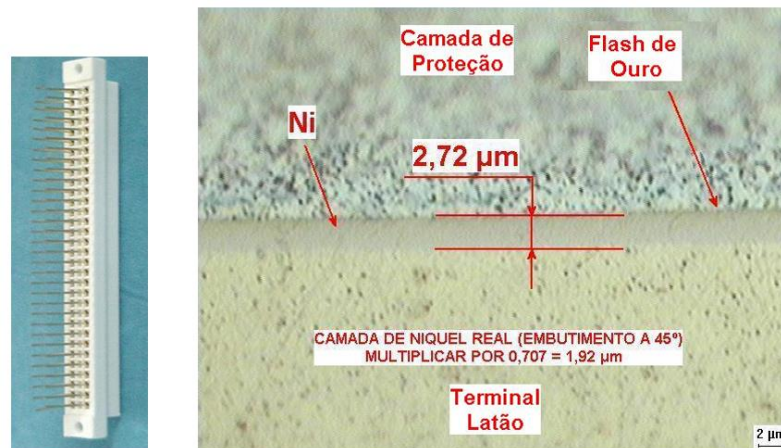
Para que sejam determinados quais tipos de liga de solda se usar em um projeto de montagem de um circuito eletrônico para determinado produto, alguns fatores precisam ser levados em consideração, tais como: as propriedades mecânicas da liga, a compatibilidade metalúrgica e química entre liga de solda substrato, compatibilidade de temperatura, composição eutética e não eutética, propriedades físicas e mecânicas, e ntre outras variáveis.(WASSINK, 1989)

As ligações formadas pelas pastas de solda são claramente semelhantes às ligações metálicas e fornecem ao sistema as características necessárias para que o produto funcione bem, fornecendo funções elétricas, mecânicas e térmicas desejáveis. Como resultado, a qualidade da pasta tem um impacto direto na integridade das juntas de solda formadas, que são cruciais para a confiabilidade do produto eletrônico.(LAU, 1991)

#### 2.2.1.1 Latão (Cu/Zn) E BRONZE (Sn/Cu)

As ligas de metais desempenham um papel crucial na fabricação de componentes eletrônicos, fornecendo características físicas e químicas ideais para aplicações específicas. Duas ligas notáveis, o latão (Cu/Zn) e o bronze (Sn/Cu/X), destacam-se no cenário eletrônico, desempenhando papéis essenciais em soquetes, conectores e pinos, como pode-se observar na figura 1. Esta dissertação explora a composição, propriedades e aplicações dessas ligas, destacando sua relevância na indústria eletrônica moderna.(Siervo, 2002)

**Figura 1** - Exemplos desse tipo de conexão: Soquetes, Conectores, Pinos, etc



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

O latão, uma liga de cobre (Cu) e zinco (Zn), é amplamente empregado na fabricação de componentes eletrônicos devido à sua combinação única de propriedades mecânicas e condutividade elétrica. A versatilidade do latão permite sua utilização em soquetes, conectores e pinos, onde a durabilidade e a eficiência elétrica são essenciais. A resistência à corrosão do latão é particularmente valiosa em ambientes eletrônicos, garantindo a integridade a longo prazo desses componentes. (Kim, Son e Ziaie, 2008)

O bronze, uma liga de estanho (Sn), cobre (Cu) e podendo conter outros elementos, é escolhido por suas propriedades específicas que o tornam adequado para aplicações eletrônicas. A adição de estanho confere ao bronze características como resistência ao desgaste, baixa fricção e uma boa condutividade elétrica. Essas propriedades fazem do bronze uma escolha ideal para conectores e pinos, onde o atrito e a durabilidade são fatores críticos. (Hyun-Joong Kim *et al.*, 2009)

#### 2.2.1.2 Ferro-níquel, ferro-cobre, cobre-níquel

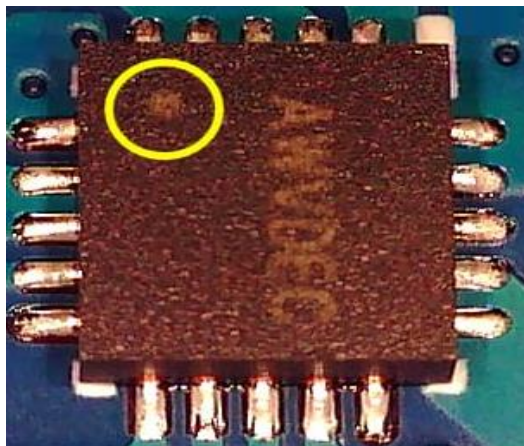
Na indústria eletrônica, componentes como Circuitos Integrados (CI's), pacotes Quad Flat Packages (QFP's), Small Outline Integrated Circuits (SOIC's), cristais e diodos desempenham um papel vital na criação e operação de dispositivos eletrônicos modernos. Esses componentes, que formam o alicerce da tecnologia, muitas vezes incorporam ligas metálicas específicas para atender a requisitos críticos de desempenho. Entre as ligas mais proeminentes, destacam-se aquelas baseadas em ferro-níquel, ferro-cobre e cobre-níquel, que oferecem propriedades únicas, como estabilidade térmica, condutividade elétrica e resistência à corrosão. Esta dissertação

busca explorar as características dessas ligas em componentes eletrônicos, revelando a sua influência nas propriedades físicas e elétricas desses elementos essenciais. (Yousaf, Iqbal e Ajmal, 2011)

As ligas de ferro-níquel encontram aplicação significativa em CI's igual a figura 2, onde a estabilidade térmica é crucial. Essas ligas, conhecidas por suas propriedades termomagnéticas, permitem a fabricação de CI's que mantêm uma estabilidade dimensional excepcional em diferentes faixas de temperatura. Além disso, o ferro-cobre é frequentemente empregado em CI's devido à sua excelente condutividade elétrica, facilitando a transmissão eficiente de sinais eletrônicos. A combinação dessas ligas em CI's contribui para o desempenho confiável de dispositivos eletrônicos em uma ampla gama de condições operacionais. (Chlenova *et al.*, 2014)

Em pacotes como QFP's e SOIC's, as ligas de cobre-níquel são frequentemente empregadas devido à sua resistência à corrosão, o que é vital em ambientes eletrônicos propensos a exposição a elementos adversos. Essas ligas garantem a integridade estrutural desses pacotes, protegendo os componentes internos de agentes externos prejudiciais. Além disso, em cristais e diodos, a escolha de ligas de ferro-níquel é motivada por suas propriedades magnéticas únicas, essenciais para a estabilidade de frequência em osciladores cristalinos e para a modulação eficiente de sinais em diodos. A combinação precisa de ferro-níquel nessas aplicações assegura um desempenho preciso e confiável, atendendo às exigências críticas dos circuitos eletrônicos modernos. (Souza, 2006)

**Figura 2** - Exemplos desse tipo de conexão: CI

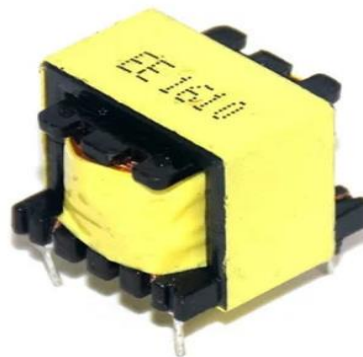


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

### 2.2.1.3. Ferro-carbono (AÇO)

Os transformadores como na figura 3 desempenham um papel central na manipulação eficiente da energia elétrica, e as ligas de ferro-carbono são frequentemente escolhidas como núcleos magnéticos devido às suas características magnéticas únicas. A presença de carbono na liga contribui para a permeabilidade magnética, permitindo que o núcleo do transformador responda de maneira eficaz às variações no campo magnético, resultando em uma transferência eficiente de energia. Além disso, a capacidade da liga de ferro-carbono de minimizar as perdas magnéticas assegura que a eficiência do transformador seja maximizada, tornando essas ligas uma escolha fundamental na fabricação desses dispositivos essenciais para a distribuição e transformação de energia elétrica. (Xu *et al.*, 2021)

**Figura 3 – Transformador**



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Em componentes eletrônicos onde existe o risco da interferência eletromagnética (EMI), são utilizados escudos como na figura 4, para proteger os circuitos sensíveis ou equipamentos de comunicação. As ligas de ferro-carbono, devido à sua capacidade de direcionar e concentrar campos magnéticos, são escolhas ideais para a fabricação de escudos eficazes. Essas ligas proporcionam uma barreira magnética, bloqueando ou desviando eficientemente as interferências eletromagnéticas prejudiciais, garantindo assim a integridade dos sinais e o desempenho confiável de dispositivos eletrônicos sensíveis. A combinação de ferro e carbono nessas ligas se revela essencial, proporcionando propriedades magnéticas adaptáveis e estruturais robustas para enfrentar os desafios específicos apresentados pela interferência eletromagnética nos ambientes eletrônicos modernos. (Majcher *et al.*, 2020)

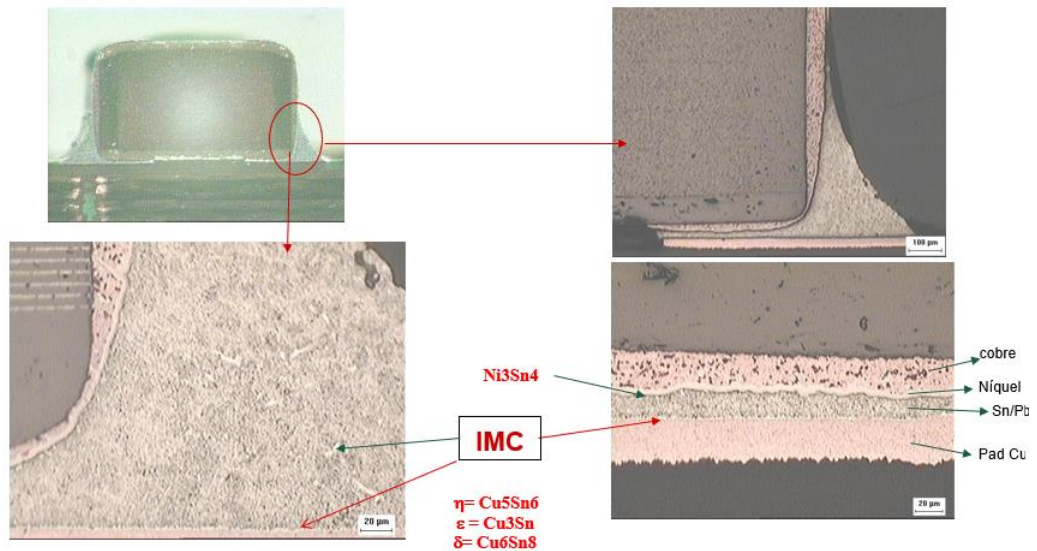
**Figura 4** – Placa com shields

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

#### 2.2.1.4. Ligas de Estanho

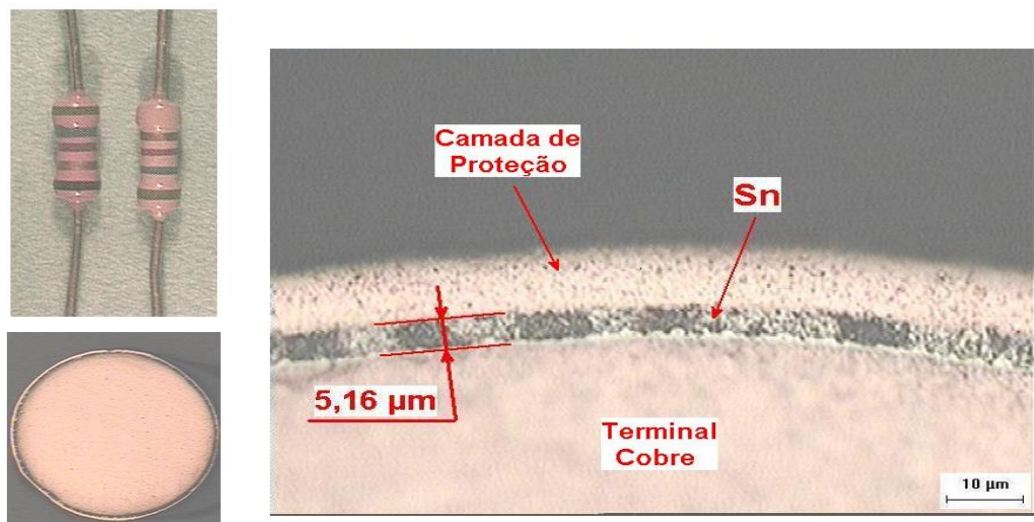
A utilização de ligas de estanho em componentes eletrônicos é devido a sua versatilidade na fabricação, na busca por eficiência, confiabilidade e desempenho em dispositivos eletrônicos impulsiona a exploração e inovação no uso de ligas de estanho, consolidando assim o papel vital dessa metalurgia na evolução constante da tecnologia eletrônica. desempenham um papel crucial na conexão eficiente de componentes a placas de circuito, e as ligas de estanho são frequentemente utilizadas em suas esferas de solda. A soldagem por estanho oferece uma conexão confiável, garantindo uma transferência eficiente de sinais elétricos e térmicos. Além disso, as ligas de estanho exibem propriedades de expansão térmica compatíveis com muitos substratos, minimizando o risco de falhas mecânicas em BGA's. Em capacitores conforme figura 5, o estanho pode ser usado em camadas finas para otimizar a eficiência dielétrica e a capacitância, proporcionando uma interface estável entre o componente e a placa.(Prabaharan, Barik e Kumar, 2016)



**Figura 5 - Ligas de SN Capacitor**

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

As ligas de estanho desempenham um papel multifacetado na fabricação de resistores eletrônicos, sendo utilizadas tanto em suas terminações quanto nas camadas de filme resistivo. A aplicação de estanho nas terminações dos resistores conforme na figura 6 oferece uma soldagem confiável e eficiente, garantindo uma conexão elétrica estável com a placa de circuito. Essa propriedade é vital para resistores montados em superfície (SMD), onde a soldagem por estanho oferece uma união robusta e eficaz. A resistência à corrosão das ligas de estanho contribui significativamente para a durabilidade dos resistores, especialmente em ambientes desafiadores. (Seo *et al.*, 2019)

**Figura 6 – Ligas de SN Resistores**

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

### 2.2.1.5. COBRE

As ligas de cobre encontram aplicação extensiva em uma variedade de componentes, desde conectores e fios até placas de circuito impresso. A condutividade elétrica excepcional do cobre permite uma transmissão eficiente de corrente elétrica, minimizando perdas e garantindo o desempenho otimizado desses componentes. Além disso, a maleabilidade do cobre facilita a conformação em formas complexas, tornando-o ideal para a fabricação de conexões precisas e duráveis. Sua resistência à corrosão é um fator crítico em ambientes desafiadores, contribuindo para a longevidade e confiabilidade dos componentes eletrônicos. Dessa forma, as ligas de cobre se tornam não apenas blocos de construção fundamentais na engenharia eletrônica, mas também catalisadores essenciais para a inovação e avanço tecnológico em todos os setores. (Spolaore *et al.*, 2011)

Ligas de cobre são amplamente utilizadas na fabricação de componentes eletrônicos como: fios e cabos elétricos devido à excelente condutividade elétrica do cobre, conectores devido a maleabilidade do cobre e a condutividade elétrica assegura uma transmissão eficiente de sinais elétricos e o cobre é um material essencial nas PCB, onde é utilizado para criar trilhas condutoras que conectam os diversos componentes eletrônicos. (Işıldar *et al.*, 2016)

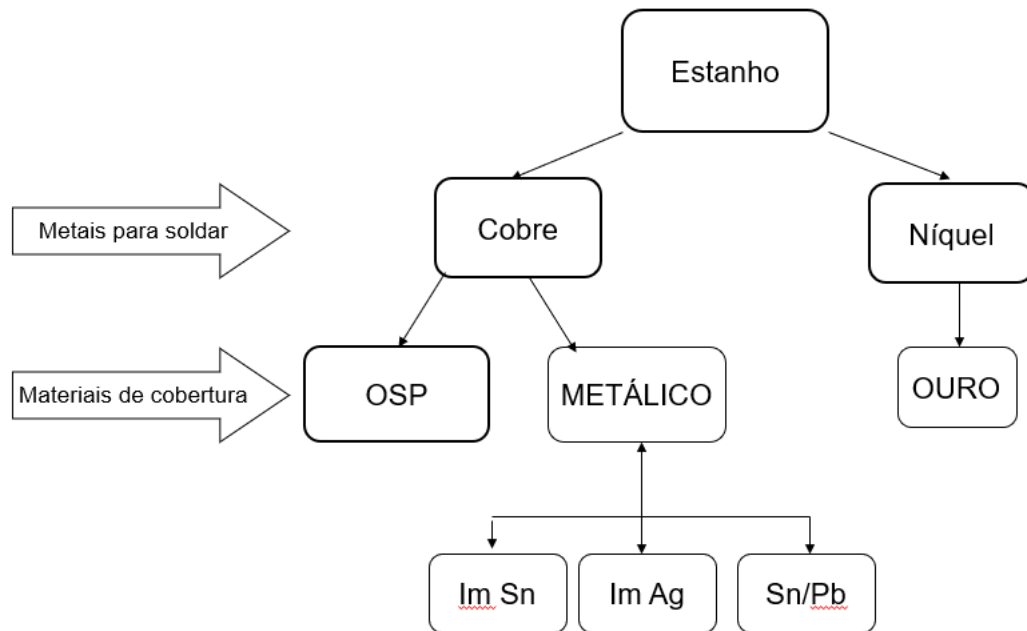
### 2.2.2. PCB

As placas de circuito impresso mais comumente empregadas são: – Face simples: Possuem trilhas condutivas sobre um lado da placa. Neste tipo de placa os componentes PTH são inseridos do lado oposto das trilhas e os componentes SMT são inseridos do mesmo lado das trilhas. – Dupla face: Possuem trilhas condutivas sobre dois lados da placa. Elas podem ser consideradas como a junção de duas placas de face simples, desta forma, a densidade de componentes aumenta significativamente. Como materiais base é usado mais comuns fibra de vidro, Fenolite ou Composite. Para os acabamentos metálico são usadas ligas Cu,Sn/Pb, Ni-Au, etc. Demonstrado na figura 7 sobre os metais e conexões de solda na figura 8. A face de cima e a face de baixo da placa podem ser conectadas por um furo metalizado (vias de 8 contato). A metalização destes furos é feita por um processo de revestimento, por esta razão estes furos são chamados de PTH. – Multicamadas: Possuem várias camadas de trilhas, sendo duas localizadas na superfície da placa.



As trilhas internas são construídas num processo de laminação que encaixa as trilhas sobre as camadas. As placas multicamadas são usadas geralmente onde o layout da placa é muito complexo. (Hamlet, Martin e Edwards, 2017)

**Figura 7 -** Metais de conexão de solda-PCI



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

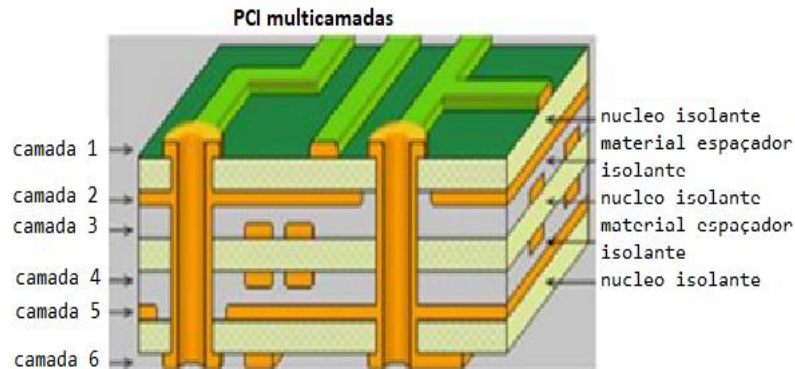
Enquanto as primeiras patentes de fiação impressa datam de 1900, a ideia de circuito impresso, só foi concebida pelo Dr. Eisler em 1936, apesar de a produção de PCI's não iniciarem antes dos anos 50. Os condutores ou trilhas, como são chamados, são faixas de cobre fixadas na superfície do substrato isolante. De forma simplificada, as PCI's podem ser divididas em 4 grupos: (Camilo, 2015)

- Placas de uma face ou simples: as trilhas são aplicadas em apenas um dos lados da placa. Geralmente esse tipo de placa possui furos.
- Placas de duas faces ou dupla face: as trilhas são aplicadas em ambos os lados da placa. Geralmente as trilhas dos dois lados são conectadas por metalizações na parte interna dos furos, produzindo assim, orifícios revestidos ou chapeados para a inserção de componentes PTH.
- Placas multicamadas: são placas de duas faces com camadas condutoras adicionais no seu interior, as quais são conectadas mutuamente conforme o exigido pelos furos chapeados. Placa multicamadas comuns possuem quatro ou cinco

camadas como demonstra figura 8, porém são encontradas PCI's mais complexas de até 12 camadas.

- Placas flexíveis: são placas de qualquer um dos três tipos de placas anteriores, porém são feitas de material flexível

**Figura 8** - Esquema de uma PCI multicamada



Fonte: CAMILO (2015)

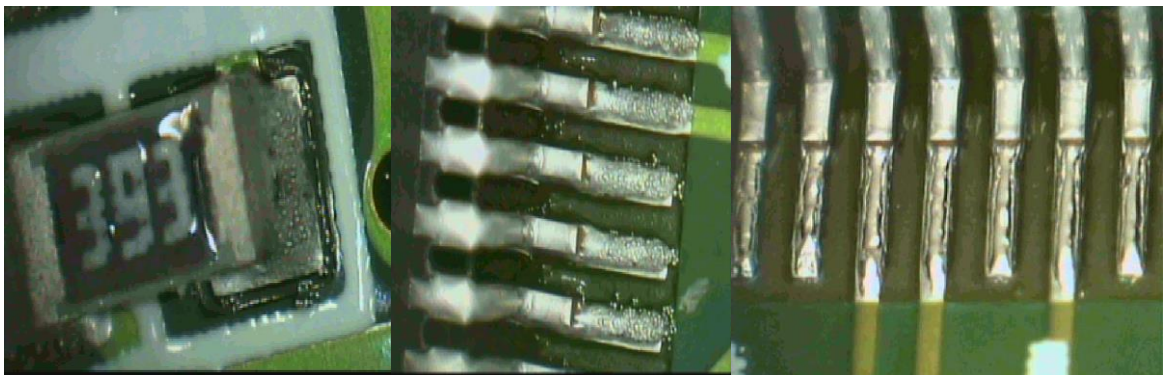
São feitos tratamentos superficiais de revestimento para que a PCI não sofra problemas de oxidação nos PAD's feitos de Cu. O acabamento mais comum em PCI's é o OSP (Organic Solderability Protect) que consiste em um polímero orgânico incolor que possui geralmente, espessuras entre 0,2 e 0,5 $\mu$ m. Esse tratamento ou acabamento, é dissolvido na própria pasta de solda quando aplicado calor ou então é volatilizado durante a etapa de soldagem. Além de proteger a PCI contra a ação e formação de óxidos que impedem ou dificultam a soldagem eletrônica, outras funções do tratamento superficial depositado em cima dos pad's são a de promover uma superfície soldável, formar uma junta de solda confiável no desempenho do produto, proteger os pad's contra outras formas de corrosão e instaurar um limitante de dissolução do Cu quando em contato com a solda e temperatura. (Pinheiro e Bracarense, 2021).

O tratamento OSP é basicamente um revestimento dos pad's com um polímero orgânico incolor que possui geralmente, espessuras entre 0,2 e 0,5 $\mu$ m. 22 Esse revestimento consiste em revestir os pad's da PCB expostos, que consegue proteger o Cu até a etapa de soldagem, quando ele é volatilizado por efeito da alta temperatura empregada ao processo. (PINTO, 2015)

A principal função da camada OSP é fornecer uma barreira temporária para evitar a oxidação do cobre exposto na superfície do PCB durante o processo de fabricação e armazenamento. Que contribui também para garantir que a umidade não oxide o material, muitas vezes a umidade presente no ambiente pode penetrar nas lacunas microscópicas dos dispositivos eletrônicos, provocando a formação de condensação e a corrosão de contatos metálicos. Esse processo corrosivo não apenas compromete a integridade estrutural dos componentes, mas também influencia as características elétricas, levando a falhas de curto-circuito, resistência aumentada e, eventualmente, à inoperância do dispositivo. (Jeong *et al.*, 2020)

A umidade pode afetar a qualidade da solda conforme demonstrado na figura 9 de várias maneiras, causando problemas que vão desde falhas de conexão até defeitos estruturais. Para evitar problemas de solda relacionados à umidade, práticas adequadas de armazenamento e manipulação de componentes eletrônicos são essenciais. A presença de umidade na solda criando uma barreira que reduz a eficiência da solda, podendo diminuir a condutividade elétrica, levando a falhas de conexão e mau contato. Podendo causar porosidade na estrutura da solda durante o processo de fusão, comprometendo a integridade física da junta, causando efeito da solda fria, onde a água presente na solda evapora durante o processo de soldagem, deixando uma junta fraca e mal formada. (Bosco, Silverman e Kurtz, 2016)

**Figura 9** - Defeitos relacionados a umidade

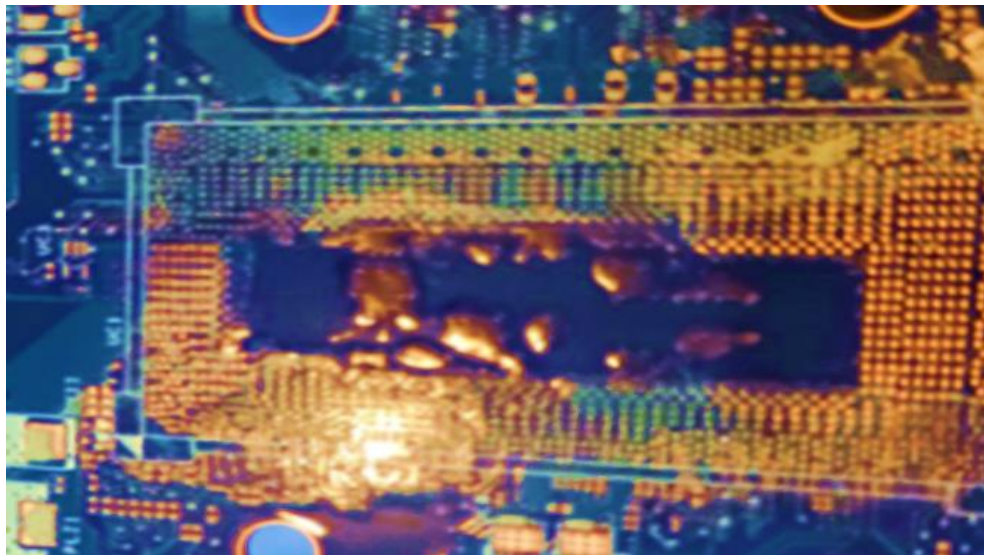


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Na figura 10 da PCB, mostra a presença de bolhas onde pode danificar camadas intermetálicas, essenciais para a integridade estrutural e funcional do circuito, quando isso ocorre a IPC-A-610 considera defeito. As bolhas são comuns de

aparecerem no processo quando a placa foi exposta a umidade excessiva após o forno de refusão. No entanto, as vias com bolhas de solda podem não ser efetivamente preenchidas com solda devido à exposição, embora camadas fracas de IMC de solda e cobre tenham sido formadas para condução, o que pode causar falhas intermitentes. (Chen *et al.*, 2013)

**Figura 10** - PCB com bolha defeito devido a umidade



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Componentes eletrônicos críticos em circuitos, podem ser suscetíveis à oxidação ao longo do tempo. A oxidação em capacitores como na figura 11 geralmente ocorre nas extremidades dos terminais ou nas placas internas, principalmente quando há exposição a condições ambientais desfavoráveis, se um capacitor estiver exposto a ambientes úmidos, a água pode infiltrar-se nos terminais ou no corpo do capacitor, levando à oxidação. A presença de umidade acelera o processo de corrosão, especialmente em capacitores eletrolíticos. Outro motivo pode ser ter estourado o prazo de validade do componente. (Djurfors *et al.*, 2005)

**Figura 11** – Capacitor com oxidação

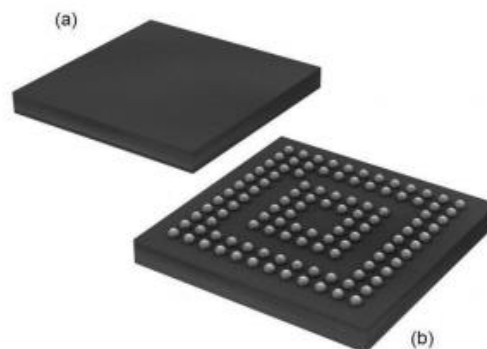


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

### 2.2.3. BGA

O encapsulamento BGA é composto por esferas (ball) de solda. A figura 12 mostra um componente tipo BGA onde (a) mostra face superior e em (b) a face inferior, os balls são aquecidos até que a solda derreta de modo que os componentes se fundam com os pads da PCI. A quantidade, as propriedades e a temperatura da solda são selecionadas para que cada esfera não derreta completamente, isto permite que cada esfera fique separada das esferas vizinhas. (Tz-Cheng Chiu et al., [s.d.] , 2004)

**Figura 12** - Componente tipo BGA, em (a) têm-se a imagem da face superior e da face inferior de um com 112 terminais e (b) têm-se a face inferior de um com 552 terminais.

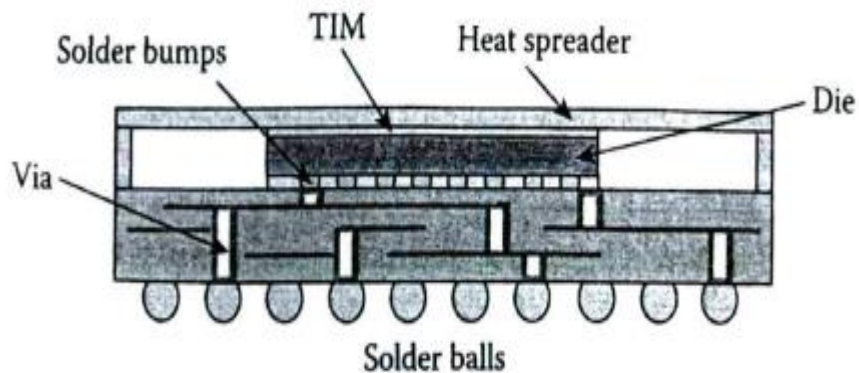


Fonte: (TZ-CHENG CHIU *et al.*, [s. d.], 2004).



Uma versão comum de um componente com o encapsulamento tipo BGA é o FCBGA (Flip-Chip Ball Grid Array) com mostra a seção transversal na Figura 13. Estas conexões são feitas por soldas no lado ativo do die, que podem ser vistas. Depois que o die está de ponta cabeça, estes bumps de soldagem estão em contato com os soldadores no substrato. A fim de proteger os solder bumps de pressão excessiva, um material que aumenta a força de conexão física entre o die e o substrato preenche as lacunas entre eles. Este empacotamento é coberto por uma placa metálica (normalmente cobre) que faz contato com a parte de trás do die. Isso transfere calor para o componente e melhora sua temperatura. (Shabany, [s.d.]

**Figura 13** - Seção transversal de um componente tipo FCBGA



Fonte: SHABANY (2010)

#### 2.2.4. SMT

O processo de montagem SMT (Surface Mount Technology) ou Tecnologia de Montagem em Superfície, é também conhecido como SMD. Nessa tecnologia, os componentes eletrônicos são montados sob a superfície de uma placa de circuito impresso, a soldagem dos componentes acontece num forno onde a pasta de solda passa por um processo térmico de transformação. (MORAES, 2006)

A montagem em superfície (SMT) os componentes são soldados sobre a superfície da placa, não necessitando assim, que a placa seja perfurada. Na metade dos anos 60 esta tecnologia surgiu e está evoluindo rapidamente. Inicialmente, os componentes eram produzidos em pacotes similares aos componentes PTH, onde os terminais eram cortados e moldados para permitir a soldagem sobre a superfície da

placa. Hoje, a largura dos terminais e a geometria dos componentes estão continuamente sendo reduzidas. (Whitaker, 2017)

A soldagem por onda é uma técnica de soldagem em massa relativamente barata e de alta eficiência, que se encaixa bem com o conhecimento e a experiência existentes na indústria. A soldagem por onda tem a capacidade de produzir juntas de solda adequadas e ainda pode soldar componentes diferentes (PTH ou SMD). (DORO, 2004)

Já a soldagem por refusão apresenta vantagens como: adequação à alta densidade de juntas de solda na PCI, podendo realizar a soldagem de vários componentes com diferentes dimensões ao mesmo tempo, dá liberdade de adequação para os parâmetros de processo, além de conferir choques térmicos menores aos componentes. (WASSINK, 1989)

Por outro lado, a soldagem por refusão é uma técnica complexa e que precisa ser bastante estudada para garantir a qualidade do processo, além de ser limitada para soldagem de alguns tipos de componentes e podendo gerar também defeitos de abertura do terminal devido a planaridade insuficiente do componente ou da própria PCI. (Camilo, 2015)

#### 2.2.5. PTH

O processo de PTH (Pinos através de Furos), os pinos ou terminais dos componentes eram inseridos manualmente ou através de máquinas e soldados através de furos na placa de circuito impresso. Nesse tipo de tecnologia PTH a soldagem dos componentes acontece num forno através de uma onda de solda líquida que percorre a superfície inferior do circuito impresso onde a solda preenche o furo. (MORAES, 2006)

O processo Pick & Place envolve aplicar uma pasta de solda nos furos da PCI onde os terminais passantes dos componentes PTH são inseridos. A operação é executada na mesma fase de impressão da pasta de solda nas ilhas dos componentes SMDs. Os componentes são então montados através das máquinas Pick & Place e, em seguida, soldados em uma única passagem pelo forno de refusão. Se a disposição do componente PTH não for adequada para o processo de montagem automático, o componente pode ser inserido manualmente na PCI. É o uso da soldagem por refusão, que substitui a soldagem manual. Várias particularidades devem ser levadas

em consideração neste processo, como a espessura do stencil, o design para abertura no stencil, as dimensões do furo na PCI para os terminais e as dimensões do terminal do componente. (Martinek e Krammer, 2019)

Os componentes PTH, são caracterizados como componentes onde seus terminais são montados na PCI atravessando os furos existentes no substrato e são montados pela tecnologia THT (Through Hole Technology). Esse tipo de componente, é dividido em duas classes: componentes PTH axiais, que possuem os terminais ao lado do corpo do componente e, os PTH radiais, que apresentam seus terminais na parte inferior. Ambos os tipos de componentes PTH. (Camilo, 2015)

Os métodos de soldagem para componentes PTH são muito mais fáceis de usar do que os métodos de soldagem para componentes SMD. Os componentes PTH são normalmente soldados por meio da técnica de soldagem por onda. Nesta técnica, os terminais dos componentes que transpassam a PCI são aquecidos e soldados tão rapidamente que o encapsulamento dos componentes, ou seu corpo, não é afetado pelas altas temperaturas da solda, que normalmente permanecem abaixo dos 150°C. (Kuo *et al.*, 2013)

#### 2.2.6. Soldering – Com formação de IMC (formação de intermetálicos)

A fixação dos componentes na PCI é realizada mediante a formação de uma liga denominada intermetálica, cuja formação depende do metal envolvido, isto é, intermetálicos de Sn/cobre e Sn/níquel. o elemento ligante, estanho, penetra pelo fenômeno da difusão atômica no metal a ser unido dos componentes e da PCI após a dissolução dos revestimentos de Au ou Ag. Para componentes e PCI's pré-estanhados (hal) não há o fenômeno da difusão, apenas continuidade metálica do estanho, os metais bases mais comuns são latão, Fe-Ni, Fe-Cu, bronze, aço comum.

Metalurgicamente, a camada intermetálica é definida como um tipo de fase intermediária entre duas ou mais fases distintas que possui limites intermediários de composição. Quando a solda fundida entra em contato com um substrato livre de contaminantes e óxidos, o IMC é formado. Além disso, pode-se dizer que o IMC é formado quando dois elementos metálicos têm limites de solubilidade diferentes quando submetidos à temperatura e têm uma composição que depende de uma razão estequiométrica específica derivada dos componentes. (Xu *et al.*, 2006)



A temperatura, o tempo e a composição química dos componentes a serem difundidos são os principais fatores que influenciam a formação do IMC quando está abaixo da temperatura de fusão da pasta de solda. A taxa de formação do intermetálico é acelerada pela solubilidade do elemento que compõe o substrato na solda fundida. A espessura das camadas intermetálicas aumenta com o tempo de exposição an altas temperaturas e, na maioria dos casos, os resultados experimentais são aproximadamente aceitáveis com base nas relações aplicadas pelas equações a seguir. (Yousaf, Iqbal e Ajmal, 2011)

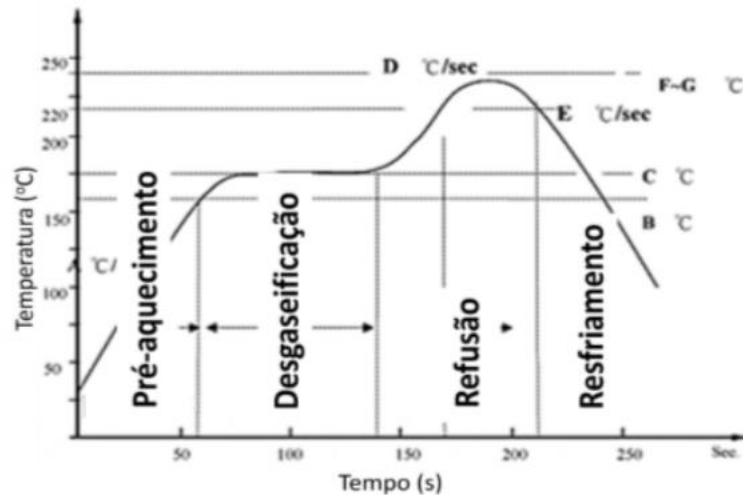
#### 2.2.6.1. Processo de refusão

Através do processo de refusão da pasta de solda a última etapa será a soldagem realizando a fusão entre o componente e a placa. Normalmente esta etapa é realizada em um forno que aquece a placa no forno de refusão (convecção forçada). Uma esteira rolante possibilita que a placa avance através do forno. O forno possui zonas com temperaturas diferenciadas ao longo do caminho percorrido pela placa. A refusão da pasta de solda acontece através do “perfil térmico” do forno, ou seja, a curva da temperatura da placa em função do tempo (Figura 14). (OLIVEIRA, 2012)

Este perfil é formado de quatro fases distintas:

- Pré-aquecimento: nesta fase a temperatura ambiente é elevada até a evaporação dos solventes da pasta de solda;
- Desgaseificação: nesta fase a temperatura é elevada lentamente com o propósito de ativar o fluxo e igualar a temperatura na placa;
- Refusão: nesta fase a temperatura é elevada para que as esferas de solda se fundam, formando então a junta de solda, e;
- Resfriamento: a temperatura é reduzida gradativamente até a temperatura ambiente.

**Figura 14** – Perfil térmico do forno de refusão.



Fonte: OLIVEIRA (2012).

A temperatura usada obedece a um perfil de refluxo (refusão) específico para cada tipo de pasta de solda. Em outras palavras, o processo de aquecimento não é aleatório e segue zonas de temperatura planejadas baseadas nos componentes químicos presentes na pasta de solda (que pode ou não conter chumbo) (CAMILO, 2015)

O processo de reflow é uma parte do processo de SMT, onde os componentes são unidos na placa diretamente na superfície da placa de circuito impresso através de um forno que faz a função de fundir a solda e unir os metais. Os processos das linhas de montagem SMT geralmente envolvem pasta de solda, colocação de componentes e as operações de soldagem por refluxo. O processo de soldagem por refusão consiste em aquecer toda a placa montada para liquefazer a pasta de solda para formar uniões de soldagem entre SMD e PCB sem alterar as características originais dos componentes elétricos. É utilizado um forno de refluxo com uma temperatura específica para aquecer as placas montadas em um período especificado e controlado a uma taxa de aquecimento adequada e mensurável para uma boa qualidade de processo. O perfil característico e recomendado depende diretamente dos componentes utilizados e da temperatura característica que eles aguentam sem alterar sua propriedade funcional ou estética. O perfil, o tempo de imersão em cada zona, refusão e resfriamento precisam ser rigidamente controlados para um resultado adequado. Juntas de solda precisam ser unidas de forma perfeita e sem movimentos o que também podem ter resultado catastrófico quando os componentes se deslocam devido na placa. (Pan et all, 2006 )

O refusão incompleto devido ao aquecimento insuficiente pode ocorrer em e em torno de componentes de grande massa. Juntas de solda podem aparecer nos testes de metalografia granuladas, porque as esferas de pasta de solda não derreteram em uma massa homogênea, indicando que o refusão não foi completo. Essas juntas de solda serão mais fracas e menos confiáveis do que aqueles que são lisos e brilhantes na aparência. (Yamamoto e Tsubone, 2007)

Componentes SMT podem ser montados nas PCI's através do uso dos processos de refusão da pasta de solda, soldagem por onda, ou cura de adesivo condutivo. Para realizar a soldagem, o material de solda deve primeiro ser aquecido a um estado fundido. Esta solda fundida é então deixada para resfriar na superfície do metal base(PAD). (Uhlmann, 2015)

- Homogeneização (SOAK)
- Etapa que consiste em preparar igualmente todos os envolvidos (diversos componentes eletrônicos, PCB e pasta de solda) antes da fusão da pasta de solda
  - Nesta etapa há perda de material orgânico (solvente), em torno de 40 %. Ou seja, no momento da fusão da pasta ainda existem solventes
  - TAL (Time above liquidus)
  - Nesta fase tem-se o tempo de permanência que a liga de solda se encontra na fase líquida, portanto inicia-se a formação do IMC, característica do processo soldering.
    - A temperatura do início do TAL depende da composição da liga utilizada
    - Continua a saída de voláteis (solventes), na faixa de 10 % como também a formação de gases de redução provocadas pelas reações de desoxidação, remoção de OSP, etc.
    - É uma fase crítica para formação de voids, principalmente para encapsulamentos BGA's, etc.
    - O controle do TAL é importante para se manter as características dos sólidos do fluxo (veículo, ativador e aditivos).
    - Temperature peak
    - Este controle é muito importante, pois é um indicador que mostra as diferenças entre as temperaturas entre os terminais de um mesmo componente e a PCI, que deve ser em torno de 5 °C. Também se aceita uma diferença de no máximo

10 °C para diferentes componentes devido tamanho, massa e população de componentes a soldar.

- Para componentes que se fundem com a pasta, como BGA's, é importante este controle devido as questões que envolvem as tensões superficiais do metal líquido.

- A temperatura de pico depende obviamente da composição da liga da pasta, e sua suficiência ou insuficiência podem causar sérios problemas de conexão. Por exemplo, um "pillow in the head"

#### 2.2.2.6. Processo de Printagem em SMT

O processo de printagem em SMT baseia-se na deposição da pasta de solda, na região exata os terminais das peças soldadas na PCI, este processo se dá por meio de estampagem de um stencil em aço inox de maneira que os furos permaneçam na correta posição dos terminais, que fazem parte de específico circuito eletrônico. A pasta de solda somente poderá ser introduzida no local determinado e no volume para o qual foi desenvolvido. (Ho Tuck Ming, Tan Kong Ming e Khor, 2010)

O padrão dos terminais dos componentes, especificado no layout do circuito a ser montado, é utilizado no projeto e fabricação do estêncil. Um padrão é gravado na superfície de uma chapa metálica para que as perfurações se encaixem perfeitamente no local onde os componentes serão colocados mais tarde. Após a gravação, a chapa é corroída para fazer furos nos locais especificados. O processo de perfuração a laser pode ser usado para obter estênceis de alta precisão e definição. (Coleman, 2009)

Os componentes são posicionados na superfície da PCI após a aplicação da pasta de solda. Em tecnologia SMT, a soldagem por refusão é o último passo na montagem de PCIs. Trata-se de um método no qual a pasta de solda, o conjunto PCI e os componentes inseridos são submetidos a temperaturas controladas em um forno ou estufa para fundir a solda. Isso é feito para conectar os terminais dos dispositivos SMD às ilhas de cobre do substrato. (Shiloh e Malboeuf, 2000)

Uma boa impressão de pasta de solda é o primeiro passo essencial no SMT processo de montagem. Tamanho correto do estêncil e da pasta de solda seleção são essenciais para uma boa impressão. A espessura do estêncil também garante o volume adequado de pasta. A pasta precisa ter as propriedades certas (tamanho de

partícula, proporção de fluxo para metal, tipo de fluxo para a aplicação) para garantir a boa junta de solda e garantir uma boa soldabilidade. Um estêncil entupido ou mal lavado muitas vezes resulta em uma impressão de solda ruim o defeito é uma junta de solda eletricamente aberta (ou intermitente) gerando e defeitos no produto final o que diminui os índices de produtividade, podendo gerar retrabalho ou a placa ter que ser jogada no lixo.

Um perfil térmico impróprio pode resultar em preenchimento inadequado do furo, a placa deve passar por uma etapa de pré-aquecimento para trazer lentamente as superfícies metálicas até a temperatura e também para permitir o fluxo ativar. Se a temperatura estiver muito baixa ou o pré-aquecimento muito curto, a solda não entrará no orifício corretamente. Se o fluxo não atingir a temperatura de ativação, ele não limpará superfícies oxidadas de forma eficaz. O fluxo tem consistência voláteis e orgânicas podem ficar presos na solda e causar bolas de solda soltas, resultando em má molhagem. (Curtin e Feeney, 2005)

O volume de solda deve ser uniforme para todas as áreas após a impressão. Uma impressão irregular pode resultar em irregularidades em um lado da placa recebendo menos pasta de solda do que o lado oposto gerando falhas. Um preenchimento mínimo do orifício de 50% para solda de componentes PTH para garantir o aterramento é exigido pelo IPC. Preenchimento inadequado pode resultar em solda fraturada nas articulações. Juntas de solda fraturadas podem criar em um ponto específico um ponto de aquecimento que pode levar à carbonização do dielétrico das camadas. Isso, por sua vez, pode criar um caminho condutor entre condutores de diferentes potenciais podendo gerar falha intermitente na 0 zero e posteriormente romper e gerar uma falha que não é passível de correção. (Krammer, 2015)

Apenas três parâmetros de impressão são considerados, incluindo velocidade e pressão de impressão, e velocidade de separação. A velocidade de impressão indica a taxa de movimento do rodo na superfície do estêncil; pressões de impressão é a pressão aplicada pelo rodo no estêncil; e a velocidade de separação denota a rapidez com que o estêncil é separado do PCB. Essas variáveis são fáceis de controlar e atualizar durante a execução da produção usando a printer. (Khader e Yoon, 2018)

A indústria eletrônica usar equipamentos de screen printers com dois rodos de metal(squeeze), um para a frente e outro para trás controlando a alocação de

pressão e ângulo de ataque da pá, pois são significativamente influenciados pela pressão do rodo a afetam diretamente no volume de pasta aplicada. Assim, de lado a pressão do rodo resulta na variabilidade da pasta de solda deposição e configuração de defeitos de impressão, como impressões erradas, pasta insuficiente e a pasta seca. (Huang *et al.*, 2011)

Assim, após o processo de impressão, uma inspeção de pasta de solda (SPI) é geralmente usado para examinar a pasta de solda deposição. A inspeção da SPI refere-se a a medição tridimensional (3D) da espessura da solda, área, volume e regularidade da deposição de solda através tecnologia de digitalização baseada em laser. Uma SPI é capaz de examinar a deposição de solda para identificar erros sistemáticos e aleatórios de impressão antes que as placas sejam enviadas para próxima estação de colocação de componentes. Esse feedback contínuo e em tempo real foi esperado para melhorar o rendimento do processo. (Barajas *et al.*, 2008)

#### 2.2.6.3. Processo de teste de PCBA

Estando prontas, as PCIs necessitam passar por um novo processo agora de teste a fim de verificar se seu funcionamento condiz com aquele para o qual foi projetado. Esse processo possui vários testes, e estes podem variar de acordo com o objetivo final para o qual o circuito foi projetado.

O teste elétrico é o mais comum entre os testes para o teste de funcionalidade da PCBA, um teste que funciona bem para vários circuitos. Esse teste envolve o uso de um dispositivo chamado JIG de Teste, que possui pontas de prova automáticas que quando colocadas em contato com as trilhas de cobre, testam a continuidade das trilhas para detectar possíveis falhas de componentes e/ou inserções incorretas. Além disso, as PCIs são submetidas a inspeções visuais ou ópticas através de microscópio por pessoas especializadas e treinadas para esse tipo de função. Nessas inspeções, podem ser encontradas componentes faltando, componentes posicionados incorretamente e inversões de polaridade. (Cavalcante, 2017)

#### 2.3. Testes indicadores de conformidade

A implementação desses testes de conformidade ajuda a garantir que as PCBA estejam em conformidade com os padrões de qualidade e segurança, proporcionando produtos confiáveis aos consumidores e reduzindo os riscos de

recalls e reparos pós-venda. Esses indicadores de conformidade são essenciais para a indústria de eletrônicos, garantindo a satisfação do cliente e a reputação da marca. Minimizando assim o risco de falhas prematuras e garantindo o desempenho consistente dos notebooks. Existem vários testes que podem ser realizados para avaliar a conformidade de PCBA.

A inspeção visual é um teste inicial e fundamental para identificar defeitos visíveis, como soldas quebradas, componentes desalinhados ou sinais de danos físicos. Os inspetores examinam a placa de circuito impresso com lupa ou microscópio e iluminação adequada para detectar qualquer anomalia. (Bradley e Banerji, 1996)

Os testes de continuidade consistem em testes verificam se os circuitos elétricos na placa estão conectados corretamente. Isso inclui a verificação de curtos-circuitos em máquinas de raio X ou circuitos abertos verificação de circuito que podem ser feitas com o auxílio de multímetros ou ICT para encontrar falhas que podem afetar o funcionamento do notebook. Podendo os testes serem executadas em fase de placa limpa ou montada. Inclui também os testes funcionais avaliam o desempenho real da placa, verificando se todos os componentes e circuitos estão funcionando conforme o esperado. Isso pode incluir testes de energia, testes de comunicação, testes de memória, entre outros. (Renbi e Delsing, 2012)

Estresse acelerado de confiabilidade consiste em submeter a placa a ciclos de aquecimento e resfriamento, simulando as condições reais de uso. O teste devem ser uma parte essencial das diferentes fases do design do produto, desenvolvimento, fabricação e envio. Com análise de falhas e programas de ação corretiva em vigor aceleraram testes de estresse de confiabilidade podem reduzir drasticamente o tempo de ciclo de design e desenvolvimento do produto. Além disso, maior confiabilidade ou menores taxas de falha em campo, maior satisfação do cliente, menor garantia e o custo de reparo em campo pode ser alcançado. A variação da temperatura exercida conduz devida na PCBA é agravado por posterior testes como cisalhamento/funcional/continuidade devido ao aumento de temperatura durante a operação é esperado ver os modos de falhas que a PCBA demoraria a apresentar. O problema também pode apresentar falhas funcionais durante os ciclos devido ao estresse de tração e térmico. (Jawaid e Ferguson, [s.d.]

Quando usamos testes de vibração e choque, a intenção é encontrar falha por fadiga por vibração de juntas de solda é frequentemente avaliada quanto à

confiabilidade usando um modelo de vida por fadiga de alto ciclo. Quando uma rachadura é iniciada na junta de solda durante o teste de vibração, a resistência aumentará com o aumento do dano por fadiga. Esses testes também podem simular condições adversas de transporte e manuseio, garantindo que a placa seja robusta o suficiente para resistir a impactos e vibrações sem comprometer a integridade dos componentes. (Che e Pang, 2009)

Os testes de envelhecimento acelerados são realizados para analisar o mecanismo de envelhecimento, resultando em perda gradual de desempenho e, finalmente, no fim da vida útil da PCBA, analisando as características de vida e conseguir desenvolver informações padrão sobre taxas e mecanismos de falha. Estes testes expõem a placa a condições extremas, como altas temperaturas e umidade, para acelerar o envelhecimento e identificar possíveis falhas prematuras. O envelhecimento térmico é realizado em câmara de teste de temperatura e umidade programável onde normalmente as temperaturas variam entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $180^{\circ}\text{C}$ . (Mekonnen, Aburba e Sarwat, 2018)

As metodologias de monitoramento de falhas realizadas em conjuntos eletrônicos submetidos a quedas e choques, utiliza a continuidade resistiva de circuitos encadeados em série, com testes como cisalhamento, de tração de esfera e de queda. Baseados na JEDEC é nos padrões de teste JESD-B2111, e visa a avaliação em nível de conselho da confiabilidade do choque de componentes. Pacotes eletrônicos na placa de circuito impresso são normalmente encadeados em série e as técnicas de detecção de falhas confiar na medição da resistência elétrica. (Lall *et al.*, 2009)

### 2.3.1 Raio X

A inspeção por raio-x é uma técnica amplamente utilizada para a realização ensaios não destrutivos. Utilizada nos processos SMT ideal para controle do processo e observação de componentes com encapsulamento, análises de BGAs, trincas de diversas ordens, Voids, rupturas de cabos curtos-circuitos e afins. Para a realização desse serviço, podem ser utilizados equipamento de raio-x e tomografia 3D, que usa tecnologia com detectores eletrônicos ao invés de filmes radiológicos. A avaliação e análise da imagem pode ser feita em tempo real. (Vieira *et al.*, 2015)



Os produtos defeituosos aumentam os custos e deterioram os processos de fabricação. Detecção oportuna e precisa de defeitos ajuda as indústrias a aplicar o controle de qualidade e estratégias de estabilização para manter a vantagem competitiva sobre a concorrência. Várias abordagens de monitoramento de qualidade, como inspeção ultrassônica, corrente parasita, teste de corante penetrante, termografia, sonda de circuito, raio X e inspeção óptica são atualmente sendo usado para avaliar a qualidade dos produtos, a fim de alcançar 100% de produtos qualificados. A maioria dessas abordagens são considerados não destrutivos, onde cada um deles possui suas próprias vantagens e desvantagens. (Ebayyeh e Mousavi, 2020),

Os métodos de teste eletrônico geralmente são impotentes para o exame e identificação de defeitos do dispositivo BGA pois não apresentavam precisão e repetição dos *voids*, porém o tempo utilizado para a análise manual é maior e o que aumenta em grande parte o custo de solução de problemas e retrabalho. A tecnologia de inspeção automática por raios X tornou-se um meio de detecção mais barato e eficiente por ser um teste não destrutivo e de rápida aplicação. É proeminente para detectar a solda escondida juntas ou as ligações incorretas entre *balls* (curtos), aplicadas para componentes PTH e SMT em componentes complexos como BGA ou conectores, importante ressaltar a capacidade das análises qualitativas e quantitativas nos resultados de detecção de defeito para melhorar ainda mais o nível de tecnologia de produção e qualidade. (Said *et al.*, 2012)

A proposta de um novo método de análise Blob para detecção de cavidade interna BGA, ou seja, o filtro de caixa multi escala é usado para pré processar a imagem, o gradiente local da imagem é calculado para gerar uma imagem Blob e a cavidade é detectado pela morfologia e, em seguida, elimine os orifícios falsos por meio da forma redonda e finalmente, calcule a proporção de orifícios. (Peng e Nam, 2012)

A definição para a detecção de *voids* como um problema de fatoração de matriz e consideraram *voids* em imagens BGA, a proposta funciona bem como a aplicação da média simples, embora apenas três imagens sejam usadas para calcular a média, um método de fatoração de matriz não negativa para detecção de *voids* utilizado com a simulação computacional demonstrou ter o mesmo nível de precisão do método convencional. (Mouri *et al.*, 2014)

A proposta para o cálculo do tamanho do *void* era usar a transformada de Hough para extrair o centro de cada bola de solda BGA e então calculou a triangulação de Delaunay para evitar a detecção perdida de bolas de solda e, em seguida, usou a equalização de histograma para cada bola de solda BGA para aumentar o intervalo entre as bolas de solda *void* e o fundo, o contraste entre eles e, finalmente, o algoritmo LoG é usado para detectar *void*. Obviamente, o plano de fundo da imagem da bola de solda BGA é relativamente simples, então o método acima adota em áreas claras, existem diferenças óbvias entre o *void* e o fundo, distribuição densa de *void* e pequena área. Um núcleo de convolução circular adaptativo é proposto para detectar *void*. Finalmente, o fator de forma e a estratégia de nível médio de cinza são usados para eliminar detecções falsas causadas por traços de fundo e furos de solda, e realizar a detecção precisa de *voids* internos nas juntas de solda do resistor de chip. (Nuanprasert, Baba e Suzuki, 2015)

Um modelo para extrair a área da solda com base no conhecimento prévio da forma, área e regras de arranjo da bola de solda BGA. Os parâmetros do recurso são extraídos por meio de diferentes etapas de classificação para classificar cada artefato detectado dentro da bola de solda como um candidato ou *void* fantasma, então usa o fator de forma e o nível de cinza médio para eliminar detecções falsas e, finalmente, calcule a proporção dos *voids*, sendo capaz de detectar *voids* de tamanhos diferentes dentro das esferas de solda sob diferentes condições de brilho e *voids* que são parcialmente obscurecidos por vias. (Said *et al.*, 2012)

Os defeitos de solda, a maioria deles acontece após a etapa de refluxo, como os defeitos na embalagem do IC componentes (pseudo-junta, excesso de solda, solda insuficiente. Solda de deslocamento e defeitos de ponte) e os defeitos nos componentes não-IC (terminação lateral, componentes marcados para exclusão, componentes elevados, pseudo-junta, excesso de solda, solda insuficiente, deslocamento, ponte de solda). Esses defeitos podem afetar gravemente a funcionalidade do PCB. Por exemplo, uma junta de solda faltando ou junta de solda insuficiente pode causar um circuito aberto do PCB. O excesso de junta de solda pode causar ponte com outras juntas de solda PCB que podem levar a um curto-circuito. A pseudo solda (também conhecida como solda fria) é considerado um defeito complexo para detecção que ocorre quando os terminais da junta de solda parecem estar conectados com o componente eletrônico; no entanto, não há nenhuma conexão física

ocorrendo que possa levar a abrir contato do circuito. Uma pseudo-junta é formada quando insuficiente o calor é aplicado para derreter completamente a solda. (LaCasse, Otieno e Maturana, 2020)

Os *voids* são definidos como cavidades formadas dentro de uma bola de solda devido à quantidade de fluxo de gases que fica aprisionado na esfera de solda durante o refluxo. Algumas causas de *void* são fluxo retido que não tiveram tempo suficiente para ser liberado da pasta de solda. *Voids* aparecem como uma área mais clara dentro das esferas de solda em um 2-D imagem de raios-X e são normalmente encontrados aleatoriamente. Estudos anteriores mostraram que a existência de *voids* diminui a vida útil da esfera de solda, o que foi validado através de testes mecânicos e testes de ciclo térmico. Um aumento súbito de *voids* dentro da grade de bola bolas de solda é indicativo problema e que algo mudou no material ou nos processos de montagem de placas de solda. (Wild *et al.*, 2018)

Com o passar do tempo o tamanho das esferas do BGA de solda vêm diminuindo e o espaço entre as esferas de solda diminui, o que gera maior complexidade ao processo, há uma demanda maior no sistema de medição óptica de máquinas de colocação de componentes, para poder identificar quando há problema no processo. Portanto, muitos pesquisadores consideraram inspecionar os defeitos resultantes que podem ocorrer durante o Processo de fabricação e colocação de BGA. (Bai, Yang e Gao, 2018)

Como os defeitos podem afetar gravemente a funcionalidade da PCB, uma junta de solda faltando ou junta de solda insuficiente pode causar um circuito aberto do PCB e, portanto, a funcionalidade geral do circuito será afetada. O excesso de junta de solda pode causar ponte com outras juntas de solda PCB que levaria a um curto-circuito. A pseudo solda (também conhecida como solda fria) é considerado um defeito complexo para detecção e esse defeito ocorre quando os terminais da junta de solda parecem estar conectados com o componente eletrônico, no entanto, não há nenhuma conexão física ocorrendo que possa levar a abrir contato do circuito. Uma pseudo-junta é formada quando insuficiente o calor é aplicado para derreter completamente a solda. (Song, Kim e Park, 2019)

Em uma abordagem baseada em um modelo para detectar pixels defeituosos em imagens de amostra de PCB, o modelo conduzido neste estudo é chamado de modelo de imagem de defeitos localizados (LDIM). Na tarefa de inspeção manual, os

trabalhadores se concentram nos defeitos locais em vez de defeitos globais, considerando tanto a cor regional desvio da cor dominante local e cor regional mudando rapidamente como possíveis defeitos.(Wang, Wang e Zhang, 2014)

### 2.3.2. Cross section

As vantagens do método de Cross section incluem a facilidade de uso teste e a possibilidade de complementar com outros fatores e modelos de processo que podem afetar a qualidade do PCB. A utilização da técnica metalografia é apropriada em todas as etapas durante a vida útil de componentes: desde o desenvolvimento inicial, produção, controle de fabricação e se necessário até na análise de falhas. Ter o controle dessas etapas garante confiabilidade ao produto. (VASILYEV, 2021)

A análise de seção transversal tem como objetivo permitir e expor recursos ocultos em uma amostra de maneira controlada. Essa técnica possui como etapas principais: definição de plano de corte, corte, lixamento, polimento e inspeção microscópica. É usado regularmente em testes de conformidade IPC, para avaliar dimensões críticas ou para identificar diversos defeitos estruturais ou anormalidades, como: rachaduras, pontes, delaminação, deformações e muito mais. (Liu *et al.*, 2016)

Ensaio preparado para a avaliação da formação de intermetálico (IMC), verificando também a estrutura da esfera de solda, contaminações, as ocorrências de trincas e os defeitos de causados na máscara de solda. O conhecimento das características dos materiais metálicos é fundamental para garantir a conformidade de determinados produtos como o tipo de liga metálica utilizada na solda e classe do produto. O objetivo do teste é analisar os componentes e as características estruturais dos metais e suas ligas, utilizado para a análise metalográfica para identificar possíveis defeitos como falhas estruturais, impurezas e outros aspectos na microestrutura do material. Para o serviço, utiliza-se uma técnica de inspeção por camada, objetivando a análise da superfície exposta e de sua composição. (Zhou *et al.*, 2023)

A norma IPC-TM-650 2.1.1 mostra o método que pode ser usado como diretriz para preparar uma amostra metalográfica de placas impressas. A micro seção acabada é usada para avaliar a qualidade do sistema laminado e das estruturas revestidas (orifícios revestidos, juntas de solda, caminhos, etc.). A preparação de amostras metalográficas é considerada por muitos como uma habilidade altamente

desenvolvida, a norma determina a conformidade com os requisitos de especificação de desempenho aplicáveis, porém ela não precisa ser tão específica a ponto de não permitir variações aceitáveis que possam diferenciar os ensaios metalógrafos.

O objetivo é verificar falhas, contaminações, voids, irregularidades em revestimentos e outras aplicações. Recursos como a Microscopia Óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) podem ser utilizados usados. Realizada com o microscópio óptico, possibilita descobrir desvios no tratamento térmico, identificar regiões com segregação de elementos químicos, desenvolvimento de microtrintas, entre outros. Essa solução é utilizada para inúmeros setores da indústria e abrange uma grande variedade de peças e equipamentos. (Costa, 2023)

A principais forças se constituem na análise estrutural de alta resolução para recursos internos de componentes, montagens e substratos é um teste com documentação robusta e padrões de normas e comparativos de conformidade disponíveis. Porém como limitações estão a forma do teste que tem como característica a análise destrutiva, múltiplas amostras transversais são necessárias para avaliar todos os pinos na maioria dos componentes eletrônicos/PCBs, a técnica é altamente manual e é necessária uma vasta experiência para preparar adequadamente as amostras, e sendo que as amostras mal preparadas normalmente conduzem a enganosos e a dificuldade de saber exatamente a área a ser cortada como no caso das fileiras de BGA. (Hong, Li e Li, 2022)

A fim de avaliar e identificar quantitativamente o potencial de falha do processo causado por grandes tensões, por meio da análise de fatias é usado o teste de cross-section para visualizar a tensão que causa danos. A tensão que atua na junta de solda do PCBA é dividida em tensão mecânica e tensão térmica. O estresse mecânico refere-se ao estresse causado pela interação entre as partes quando um objeto é deformado por uma força externa. O estresse térmico refere-se ao estresse gerado por um objeto devido a restrições externas e mútuas entre partes internas que o impedem de expandir e contrair completamente livremente. De acordo com o padrão IPC-9704 existem padrões de testes, as etapas de teste e montagem que de modo que o PCBA com o extensômetro montado seja submetido a diferentes processos de teste e montagem para monitorar a deformação do PCBA, ultrapassam o limite de

deformação são consideradas procedimentos de risco.(Wanchun, Hui e Chaohui, 2020)

A seção transversal (às vezes chamada de microssecção) é uma técnica metalográfica usada para caracterizar materiais, realizar uma análise de falha e expor uma estrutura interna de uma PCB ou um pacote de componentes eletrônicos. A amostra montada é cuidadosamente polida usando mídia progressivamente mais fina para alcançar o plano de exame de interesse. Para iniciar a metodologia do corte transversal, é necessário definir o tipo de corte e a direção da amostra; os cortes nas validações de solda para BGAs estão na diagonal do componente ou com base em algum requisito especial do solicitante. Como próximo passo, são feitas inspeções visuais e radiográficas gerais no componente e, após a observação das evidências, é tomada a decisão da direção e posição do corte diagonal. A amostra preparada é então examinada em várias ampliações em um microscópio óptico ou em microscopia eletrônica de varredura (MEV). Este processo é definido pelo procedimento IPC. (ARELLANO, 2018)

### 2.3.3. Dye Pry

O teste Dye Pry é uma técnica destrutiva de análise de falhas e controle de qualidade prescrita pelo IPC, realizada em juntas de solda em conjuntos de placas de circuito impresso para identificar defeitos exclusivos das juntas de solda, como: rachaduras, “*head-in-pillow* (cabeça em travesseiro)” defeitos e outras separações conjuntas. Esse teste é regido pela IPC-TM-650, este método de teste detalha o procedimento de tingir e puxar utilizando um corante penetrante para a análise de componentes de tecnologia de montagem em superfície (SMT) onde podem ser checados os defeitos oriundos do processo de montagem e a qualidade da junta de solda/ integridade. Este método de teste é apenas para observação, para determinar a existência de indicações de corante

A principais forças se constituem no método mais conhecido para identificar defeitos nas juntas de solda em um dispositivo BGA. Todas as juntas de solda em um BGA são testadas simultaneamente o que apresenta um ganho representativo de tempo e produtividade, e é capaz de caracterizar rachaduras finas e crateras que são invisíveis aos sistemas de raios X ou cross section, possuem documentação robusta, normas e padrões de conformidade disponíveis. Como limitações apresentam

características como a análise destrutivas e as amostras usadas nos testes Dye & Pry não são adequadas para análises subsequentes com outras técnicas na área onde foi realizado o teste e é necessário experiência para otimizar a preparação da amostra para uma análise precisa e completa. (Qasaimeh, Lu e Borgesen, 2011)

Depois de tingir e arrancar, os componentes são removidos usando um impacto de choque da parte de trás da placa de teste normalmente com o auxílio de um dinamômetro, para a medição da força aplicada. Este é um método preferencial sobre a separação por dobrar e puxar, pois evita a deformação da junta de solda e, portanto, a distorção das superfícies fraturadas. Na maioria dos casos, a rachadura principal está no lado do PCB e o as esferas de solda ainda grudam no componente para ter acesso ao ball do BGA para a interface do componente e revelar o possível dano em lado do componente, as esferas de solda são cortadas. Tipicamente as rachaduras são encontradas no lado da PCB e uma pequena rachadura em o lado do componente. (Zhou *et al.*, 2010)

Quanto a análises de falha, podem ser realizado as análises de separação de corantes através de cross section, sendo realizadas nas placas testadas e envelhecidas de forma diferente (exemplo temperatura diferente ou tempo de envelhecimento), para investigar o modo de falha e entender o impacto do envelhecimento no desempenho das juntas de solda. Acredita-se que é observado algum tipo de trinca normalmente ela é iniciada no canto da interface IMC devido ao alto concentração de tensão e se propaga em direção ao centro da interface IMC. A proposta do teste é mostra claramente quando a trinca se propaga ao longo da interface e para quando se desloca. (Hongtao Ma *et al.*, 2011)

Amostras de teste podem ser combinadas para a análises de junta de solda durante o teste de queda e/ou vibração, análise de falha da montagem. O resultado é uma visão geral da confiabilidade da solda e combinações de ligas de solda testada durante os ciclos consecutivos. As amostras para realização do teste normalmente, esse método é usado em matrizes de grade de esferas (BGAs) para avaliar a qualidade/integridade da junta de solda; no entanto, ele também pode ser usado em outras peças SMT, como componentes de terminação inferior (BTCs) e conectores. (Caers *et al.*, 2008)

Medições do tamanho da trinca são feitas através do método de uma imagem clara sobre as rachaduras e devem se propagam ao longo da interface de fratura

inteira. No entanto, para repetir a medição em muitas articulações requer muito tempo e uma interrupção do processo de propagação da trinca. Portanto, pode-se propor a capacidade de descrever a correlação as áreas de fissuras de forma mais fácil e uniforme. Para este objetivo foi feita uma simulação para investigar o efeito de múltiplas rachaduras tanto no PCB quanto nos lados do componente, e da orientação da trinca, no medições experimentais. (Shi e Ueda, 2011)

### **3. CONTEXTUALIZAÇÃO**

A complexidade do projeto eletrônico, é a identificação de modo significativos de falhas oriundas, principalmente, dos processos de solda. Para a realização desse serviço, a proposta é utilizar a análise de microseção (Cross Section), verificar e analisar a camada intermetálica da região soldas, a morfologia da esfera de solda, assim como ocorrências de trincas, contaminações e defeitos de posicionamento da máscara. Já a análise da ocorrência de voids e curtos-circuitos em soldagem de componentes do tipo BGA, com avaliação da quantidade, características e volume de solda por esferas, são feitas por meio da inspeção por Raios-X. Por fim, utiliza-se a técnica de Dye and Pry, com a aplicação de líquido penetrante para avaliação de descontinuidades nas esferas e junções da solda com o substrato (placa ou componente). Após a extração, são realizadas análises de cada fratura na solda em todas as balls e tabelas com a classificação das fraturas são geradas.

O processo de fixação de componentes na superfície da placa através das superfícies de contato em componentes com uma camada de solda. Começa quando a solda é aplicada como uma pasta de partículas metálicas e fluxo na figura 18 é observado a linha de produção utilizada no estudo. A pasta é impressa na placa com equipamento solder paste printer que consiste em um rodo através de um estêncil feito especialmente. O estêncil tem uma espessura determina para garantir a quantidade de pasta de solda depositada.

Os componentes são colocados na placa com equipamento no estudo de caso NXT Placement (Pick and Place). A placa montada então passa por um forno de refusão no qual as partículas de metal na pasta de solda derretem e formar as juntas de solda. O forno de refusão tem necessita uma “receita” a ser seguida, o perfil contém informação essenciais como tempo de imersão em cada zona, refusão e resfriamento onde ocorrerá as juntas de solda para forma perfeita e os passos precisam ser



rigidamente controlados e desenvolvidos da forma correta para um resultado adequado.

São feito 3 tipos de teste, primeiro uma inspeção dos componentes através de um sistema de câmera automática conhecido como inspeção automática da placa (AOI) para detecção de falha de componentes faltando, deslocados, com insuficiência de solda e etc..., depois passam por 2 testes funcionais um chamado In-Circuit- Teste (ICT) sendo um teste elétrico por agulhas para depurar como bem como analisar o funcionamento de parte do circuito e um teste funcional simulando a situação real do produto e algumas atividades.

**Figura 18** – Processo produtivo SMT





**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

### 3.1. Impressão em pasta de solda:

As especificações da pasta de solda utilizadas consistem em SAC305, que é usada comente nos processos de manufatura eletrônica destalhes da solda na tabela 2, com a composição química das esferas apresenta 96,5% de Estanho (Sn), 3,0% de Prata (Ag) e 0,5% de Cobre (Cu). O diâmetro nominal da esfera é de 0,4mm com tolerância de 0,01mm.

Tabela 2: **Shenmao-SAC305-Solder Paste-PF606-P-T3J-Type 3-SAC305-Lead-Free-No-Clean**

<b><u>PF606-P</u></b>	
<b>Liga</b>	Sn/Ag3/Cu0.5/x
<b>Ponto de fundir (C)</b>	217~219
<b>Tamanho da partícula (µm)</b>	20-45
	20-38
	15-25
	5~15
<b>Consentração de fluxo (%)</b>	11±1
<b>Tipo de fluxo</b>	ROL1
<b>Viscosidade (Pa·s)</b>	200±30

**Fonte:** <https://www.buypt.com/product/Shenmao-SAC305-Solder-Paste-PF606-P-T3J-Type-3-SAC305-Lead-Free-No-Clean/89871/>

O Fluxo utilizado é solúvel em água, na forma viscosa para aplicação o processo automatizado de transferência por pinos, que consiste na imersão de uma ferramenta em uma fina camada de fluxo de solda. Quando aplicado ao processo de BGA o fluxo de solda assume a função de manter as esferas posicionadas durante o processo de soldagem no forno de refusão. O fluxo de solda pode ser classificado

com relação a sua composição química em resina natural, resina de origem sintética, orgânicos e inorgânicos de acordo com a norma J-STD-004 (2011).

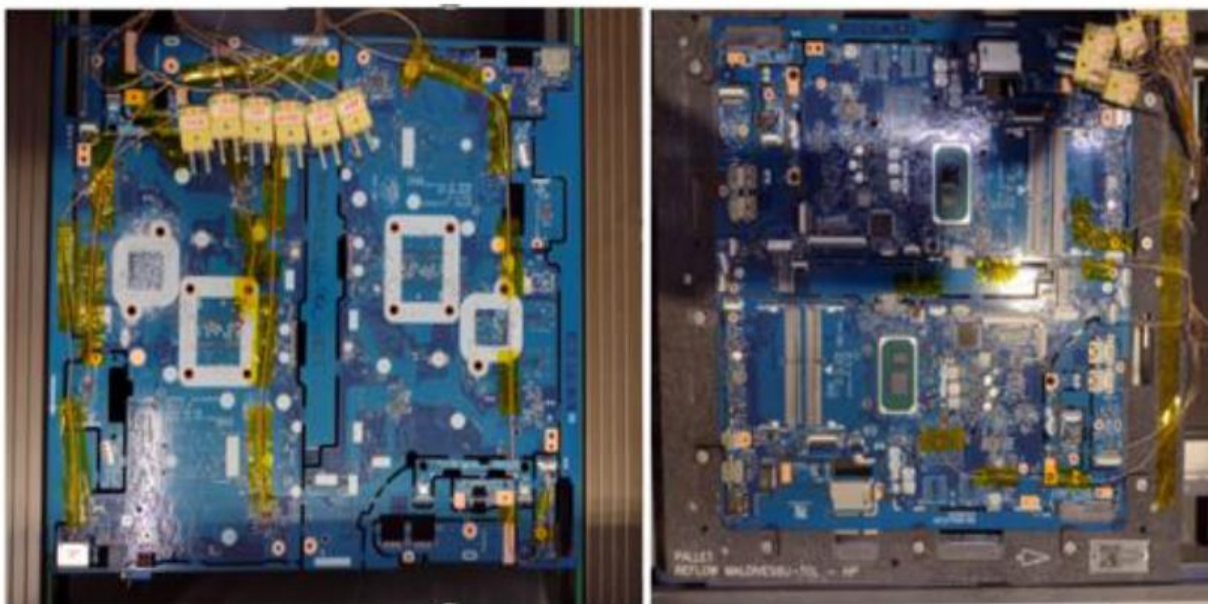
### 3.2. Perfil utilizado

Um perfil de refusão inadequado pode causar muitas falhas na PCB montada. Devido ao formato anatômico do processador e outros BGAs o calor mal distribuído pode empenar excessivamente se a para um lado.

Excursões térmicas excessivamente longas ou repetidas podem causar nas juntas de solda enfraquecidas devido a um aumento na camada intermetálico de ligação entre o Sn, liga de solda e o Cu ou níquel metálico na superfície da camada. Um espesso intermetálico composto (IMC) pode se tornar quebradiço, resultando em desgaste mecânico fratura entre a camada e a solda na interface da camada intermetálica.

Resfriamento inadequado pode resultar em granulados ou “pedras” nas junções dos componentes com a PCB. Capacitores e resistores são mais propensos a isso tipo de defeito. Para prevenir esse tipo de defeito é sugestionado que seja tirado o perfil uma vez por dia e na Figura 19 é a placa de computador leva 6 termos pás em componentes criticos para traçar o perfil BOT e TOP

**Figura 19** – 6 pontos para traçar o perfil BOT e TOP



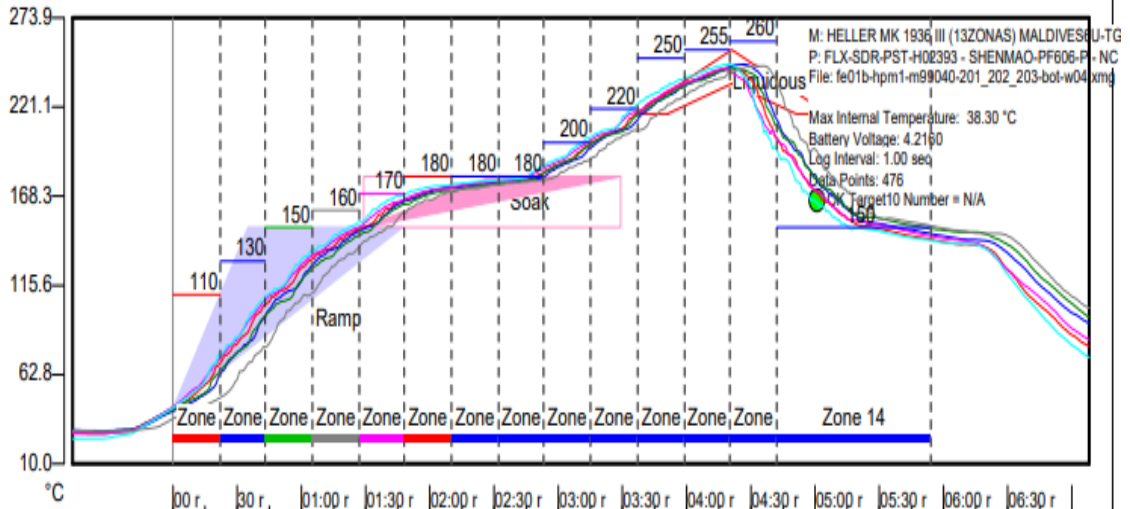
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Se o resfriamento for muito rápido, um lado de um componente pode esfriar mais rápido que o outro, fazendo com que a solda congele nessa ponta causando

problemas como tombstone ou insuficiência de solda. Componentes com chumbo devem ser coplanares de um lado do componente para o outro pois problemas de coplanaridade são geralmente o resultado de problemas de manipulação errada dos componentes sensíveis a umidade ou com armazenamento incorreto de temperatura e umidade. Problemas de coplanaridade podem ser causam juntas de solda abertas, bolas de solda soltas, componentes dobrados, torcidos ou levantados. Podemos observar a figura 20 como o perfil BOT e a figura 21 como o perfil TOP.

Figura 20 – Perfil BOT

Setpoints: °C									
Oven Area:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Up Side:	110	130	150	160	170	180	180	180	200
Down Side:	110	130	150	160	170	180	180	180	200
Oven Area:	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Up Side:	220	250	255	260	150				
Down Side:	220	250	255	260	150				
Conveyor Speed:	83.00 cm/min								



		Slope Between Temperature	Time Between Temperature	Time Above Temperature: Total (+/-)	Maximum Temperature	Slope: Peak to Temperature
		°C/sec	sec	sec	°C	°C/sec
		28-150	150-180°C	1217°C		Peak-190
1	ILAN	0.90	81	60.0	245	-1.86
2	UCR1	0.87	83	61.0	246	-2.01
3	PE2240	0.87	77	62.0	244	-1.78
4	UA1	0.91	79	61.0	244	-1.67
5	JH1	1.21	85	62.0	246	-2.36
6	GLASS	0.82	80	62.0	246	-1.84
	<b>Range</b>	<b>0.39</b>	<b>8</b>	<b>2.0</b>	<b>2</b>	<b>0.69</b>
	<b>Average</b>	<b>0.930</b>	<b>80.8</b>	<b>61.33</b>	<b>245.2</b>	<b>-1.920</b>
	<b>Std Deviation</b>	<b>0.1407</b>	<b>2.66</b>	<b>0.616</b>	<b>0.98</b>	<b>0.2424</b>

Solder Paste:

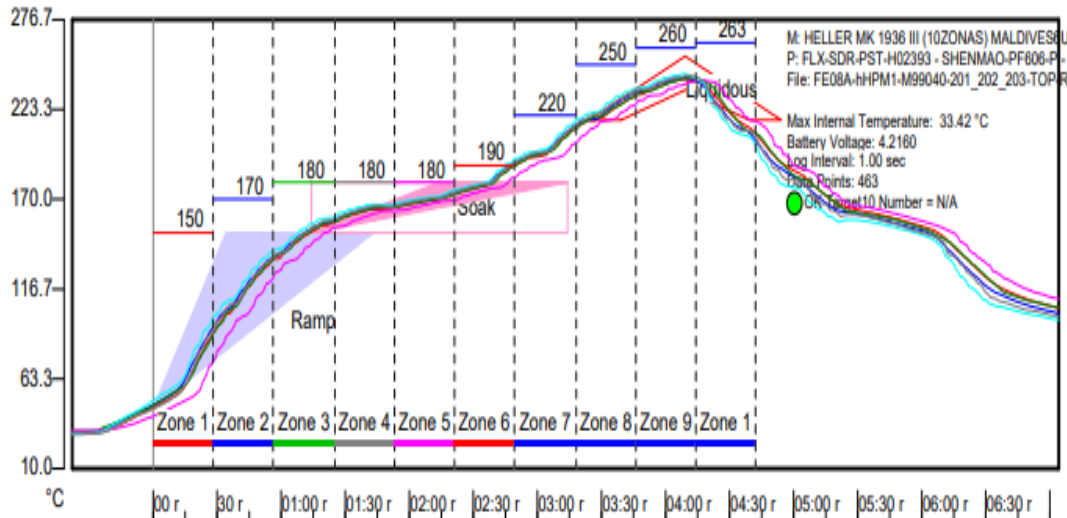
Manufacturer: FLX-SDR-PST-H02		Paste Number: SHENMAO-PF606-P		
Statistic Name	Threshold Temp deg C	Low Limit	High Limit	Units
Ramp Slope:		1.000	3.000	deg C/sec
Soak Time:	150.000 180.00	60.000	120.000	sec
Spike Slope:		1.000	2.000	deg C/sec
Peak Temp:		235.000	255.000	deg C
Time Above (TAL):	217	60.000	90.000	sec
Cooling Slope:		1.000	6.000	- deg C/sec

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024



Figura 21 – Perfil TOP

Setpoints: °C									
Oven Area:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Up Side:	150	170	180	180	180	190	220	250	260
Down Side:	150	170	180	180	180	190	220	250	260
Oven Area:	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Up Side:	263								
Down Side:	263								
Conveyor Speed:	85.00 cm/min								



		Slope Between Temperature	Time Between Temperature	Time Above Temperature: Total (+/-)	Maximum Temperature	Slope: Peak to Temperature
		28-150	150-180°C	217°C		Peak-190
		°C/sec	sec	sec	°C	°C/sec
1	UC1 CENTER	1.07	84	67.0	241	-1.09
2	UC1 CORNE 1	1.10	87	68.0	242	-1.22
3	UC1 CORNE 2	1.08	89	70.0	242	-1.17
4	DIMM	0.99	87	66.0	241	-1.21
5	BIOS	1.13	89	70.0	244	-1.39
6	DLW	1.10	88	70.0	243	-1.33
	Range	0.14	5	4.0	3	0.30
	Average	1.078	87.3	68.50	242.2	-1.235
	Std Deviation	0.0479	1.86	1.761	1.17	0.1088

**Solder Paste:**

Manufacturer: FLX-SDR-PST-H02		Paste Number: SHENMAO-PF606-P		
Statistic Name	Threshold Temp deg C	Low Limit	High Limit	Units
Ramp Slope:		1.000	3.000	deg C/sec
Soak Time:	150.000 180.00	60.000	120.000	sec
Spike Slope:		1.000	2.000	deg C/sec
Peak Temp:		235.000	255.000	deg C
Time Above (TAL):	217	60.000	90.000	sec
Cooling Slope:		1.000	6.000	- deg C/sec

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a classificação da pesquisa, estrutura do estudo, as etapas para o desenvolvimento dos testes e a comparação com as normas comprovando a conformidade das placas, além do processo de execução dos testes. Ao final são apresentadas as características gerais de pesquisa adicional conduzida com o objetivo de avaliar os testes.

### 4.1 Delineamento da Pesquisa

Definir as características da pesquisa quanto seu Método, Natureza, Objetivos e Abordagem.

A pesquisa bibliográfica a ser realizada na pesquisa contempla normas técnicas, de instituições de ensino e pesquisa, empresas e laboratórios, publicações entre artigos, teses, revistas e periódicos e buscará contemplar dois aspectos diferentes: a) formar a base conceitual em assuntos relacionados a metalografia, Cross-section, dye and pry e raio X, componentes eletrônicos e placas b) leituras técnicas sobre análise processos e normas relacionadas à eletrônica.

### 4.2 Indicação das etapas a serem desenvolvidas para o alcance dos objetivos

Descrever a forma de coleta e tratamento dos dados para o alcance dos objetivos indicados.

Para tanto, a análise de conteúdo utilizada para esta pesquisa será o qualitativo de cunho descritivo, ou seja, realizando-se um estudo de caso, para o qual se estabelece relações entre variáveis e a utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados como ensaios realizados em placas de notebook com defeitos desconhecidos.

A representação dos dados para o estudo de caso será feita através das seguintes etapas de teste

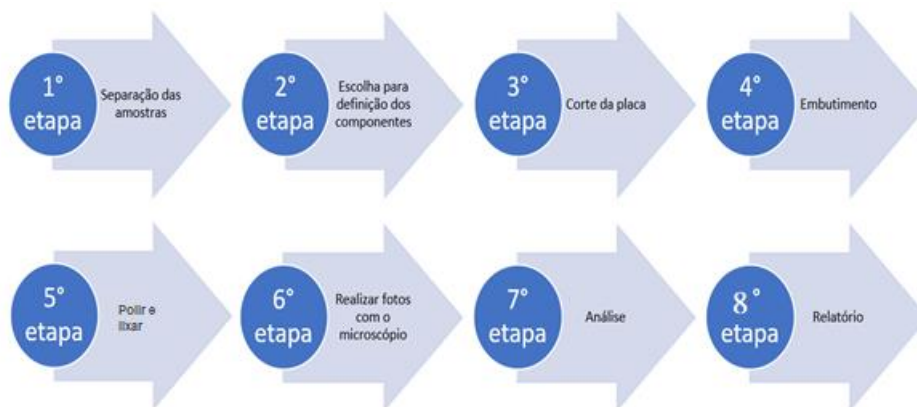
#### a) Cross Section:

Primeiro passo consiste em preparar as seções transversais da amostra, os componentes ou regiões de interesse são extraídos manualmente, através de um corte físico com uma ferramenta cortante seguindo o plano de amostra lado TOP na

e lado BOT. Em seguida, essas peças extraídas são encapsuladas em resina epóxi, que retém a verdadeira estrutura da amostra durante o processamento posterior.

Uma vez encapsuladas, as amostras são polidas para aumentar a clareza e a uniformidade da superfície e para direcionar o recurso de interesse na superfície do disco de resina. Quando o polimento atinge o local de destino (por exemplo, o centro de uma junta de solda), as etapas intermediárias e finais de polimento são usadas para obter uma rugosidade de acabamento para poder obter visualização das partes necessárias. Os detalhes nas estruturas da camada de seção transversal podem ser aprimorados com um ataque químico leve, finalizando a amostra para imagens e análises subsequentes para a Microscopia Óptica adequada.

**Figura 15** Cross section



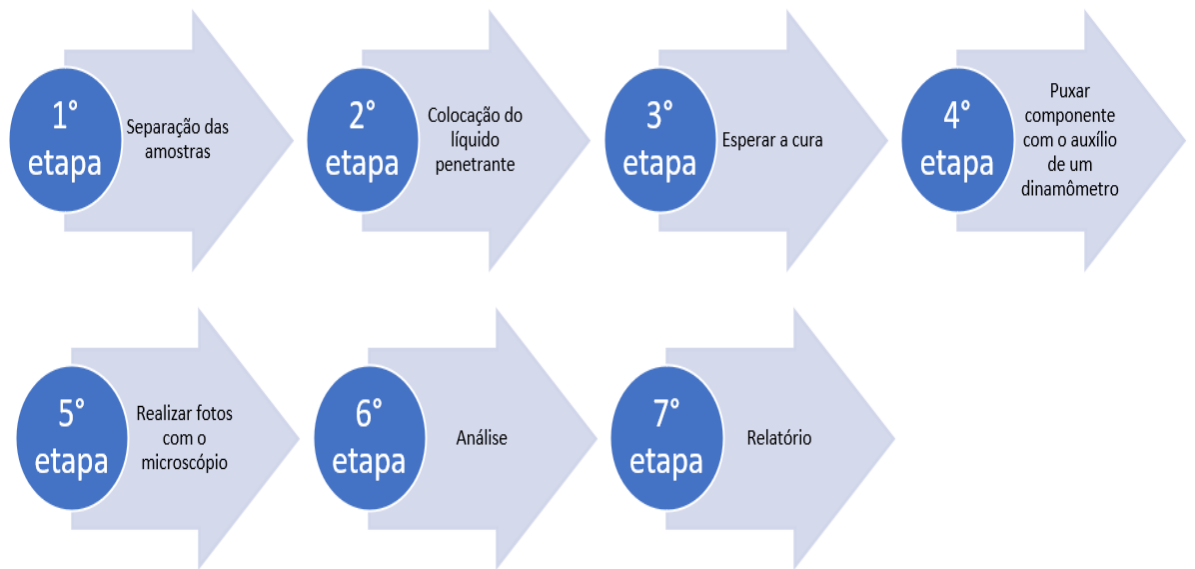
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

### c) Dye Pry:

Os procedimentos começam submergindo uma placa-alvo em um corante fluorescente vermelho especializado, o fluido marcador penetra em quaisquer rachaduras ou outras aberturas nas juntas de solda expostas. Como parte desse processo, é feito um processo em que a placa é colocada na estufa final para definir o corante. Após o cozimento, é necessário executar uma tração na superfície superior do componente de forma uniforme.

Os componentes são puxados manualmente da placa para permitir a avaliação visual das juntas de solda. Quaisquer rachaduras pré-existent ficarão manchadas de vermelho. Cada junta é então inspecionada com uma ampliação usando Microscopia Óptica.

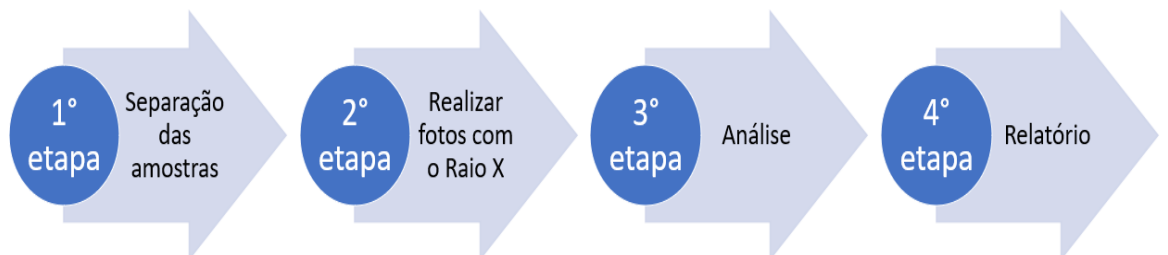


**Figura 16 – Dye Pry**

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

d) Raio X:

Um sistema de exame de raios X para análise de placa de circuito impresso onde é possível a identificação visual do defeito que não é visível a olho nu é apresentada neste trabalho o uso do auxílio computacional para a captura das imagens, incluindo a visão dos componentes do sistema que causam a falha se tornando um elo indispensável na detecção e análise de falhas da produção real para os defeitos, como a detecção de *void* dentro das juntas de solda dos componentes SMD.

**Figura 17 – Raio X**

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Para a execução da pesquisa citada a fonte de pesquisa será executada no laboratório de uma fábrica no Polo Industrial de Manaus (PIM) onde é produzido placas de aparelho celular e de notebook, onde acontecem falhas de difícil identificação, como a produção não é de um produto próprio, a apresentação das análises de falha encontradas no processo produtivo é obrigatória para o cliente juntamente com o corpo técnico especializado em teste e processo.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 RAIOS X

O detector de raios X consiste em intensificador de imagem de raios X MCP e CMOS industrial Câmera. O intensificador de raios-X MCP captura a mudança na intensidade dos raios depois de passar pela placa PCB, e se converte em luz visível imagem que é exibida na tela. A câmera CMOS adquire a imagem visível na tela e converte em uma imagem digital transmitindo para o computador. Na produção industrial real, considerando o custo do hardware e a eficiência da imagem, a geração de imagens bidimensionais de raios-X (2D X-Ray) é geralmente usada para coletar imagens internas conforme figura 64 onde é possível a identificação de defeitos internos de componentes não visíveis a olho nu, em seguida, projetar algoritmos de detecção de defeitos correspondentes de acordo com as características da imagem sem a destruição da amostra.

**Figura 64** – Defeito interno de cabo quebrado



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

O sistema de análise das imagens de raios-X pode ser avaliado por uma série de parâmetros técnicos e regidos pelas normas: IPC 610 - Norma utilizada para comparação dos critérios de aceitabilidade das características encontradas, classificação dos defeitos dependendo das características do componente e do produto utilizado mais IPC-A-7095 - Norma utilizada para demonstração de padrões impostos na fabricação e características dos produtos de BGA.

Esta pesquisa apresenta um sistema fotos de raios-X em uma PCB de computador. Utilizando o microscópio RH-2000 System da marca Hirox Europe, que apresenta configuração completa de microscopia digital 3D portátil compatível com PC com hardware e software de alta qualidade, inspeção sem contato de quaisquer amostras de 0,1x até 10.000x. As imagens brutas de raios-X distorcida foram corrigidas sequencialmente em duas etapas; uma correção de forma e um processo de correção de intensidade. Desde o espaço mapeamento de distorção foi obtido com base em recursos de imagem, o desempenho do resultado do mapeamento está intimamente relacionado com resultados de extração de características. Para uma extração confiável de recursos, uma imagem filtrada por borda foi usada em vez de binarizada para evitar qualquer corrupção dos padrões em um sombreado localmente imagem. Para o processo de extração de características, um Kohonen neural rede foi empregada para localizar automaticamente o padrão centros na imagem de borda.

#### 5.1.1 PROPOSTA TOP

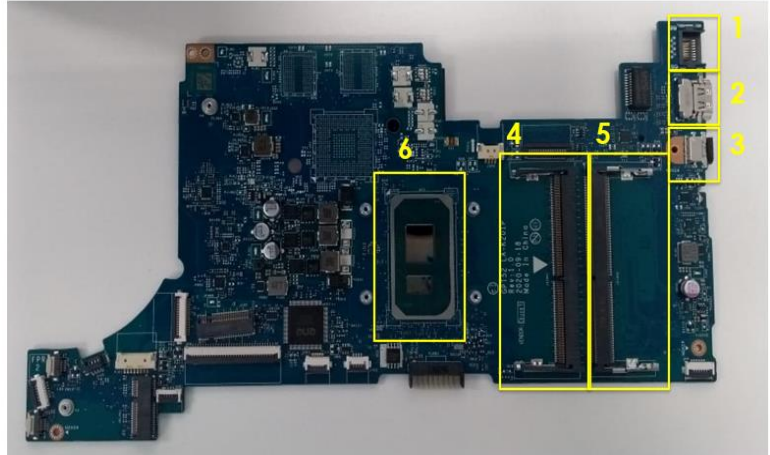
A priorização determinada para proposta de teste para o lado TOP figura 65, levando em conta que é uma técnica de análise metalográfica do raio que permite examinar a qualidade das soldas internas para análise foram escolhidas:

**Figura 65** – Proposta para teste

## Proposta para teste

### Componentes para Raio X:

1. JTC1
2. JHDMI
3. JLAN
4. JDIMM1
5. JDIMM2
6. UC1

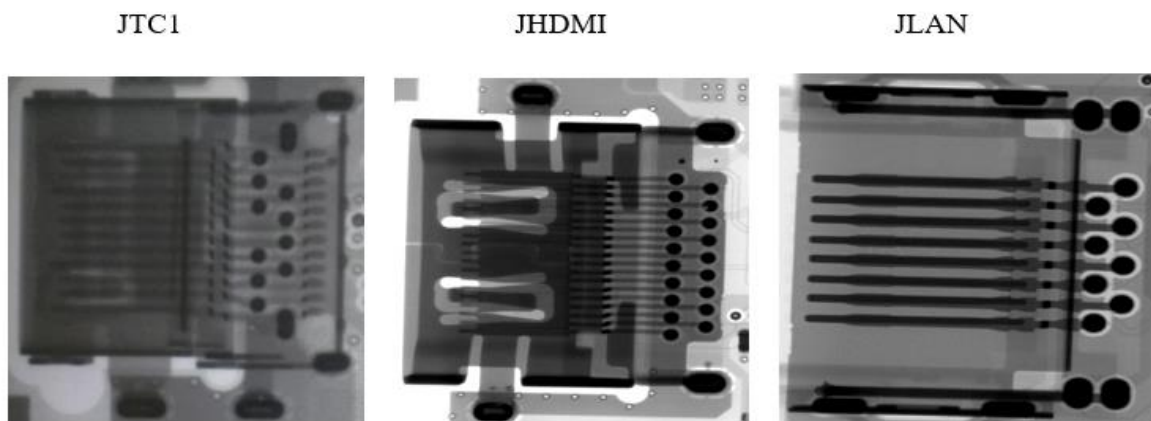


**Fonte:** Elaborado pelo autor,204

### 5.1.1.1 JTC1, JHDMI e JLAN

Para a análise dos conectores a considera requisitos para inspeção visual: Primeiro quando o método de inspeção visual é usado para verificar a aceitação do produto, os níveis de preenchimento de furo de solda são observados. Caso encontrada alguma não conformidade como na figura 66 o processo deve ser parado e feito a análise e deve ser feito a revisão do lote produzido. Segundo que os terminais de soldagem na linha analisada podam não ser identificado o defeito no teste funcional.

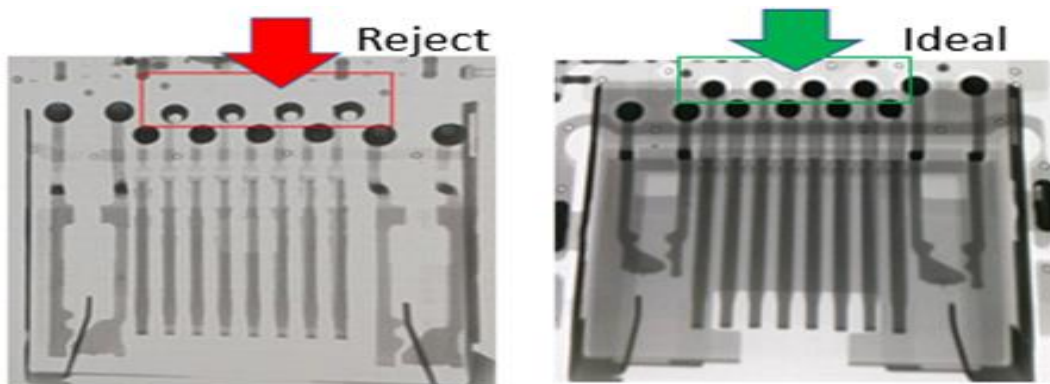
**Figura 66** - JTC1, JHDMI e JLAN



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

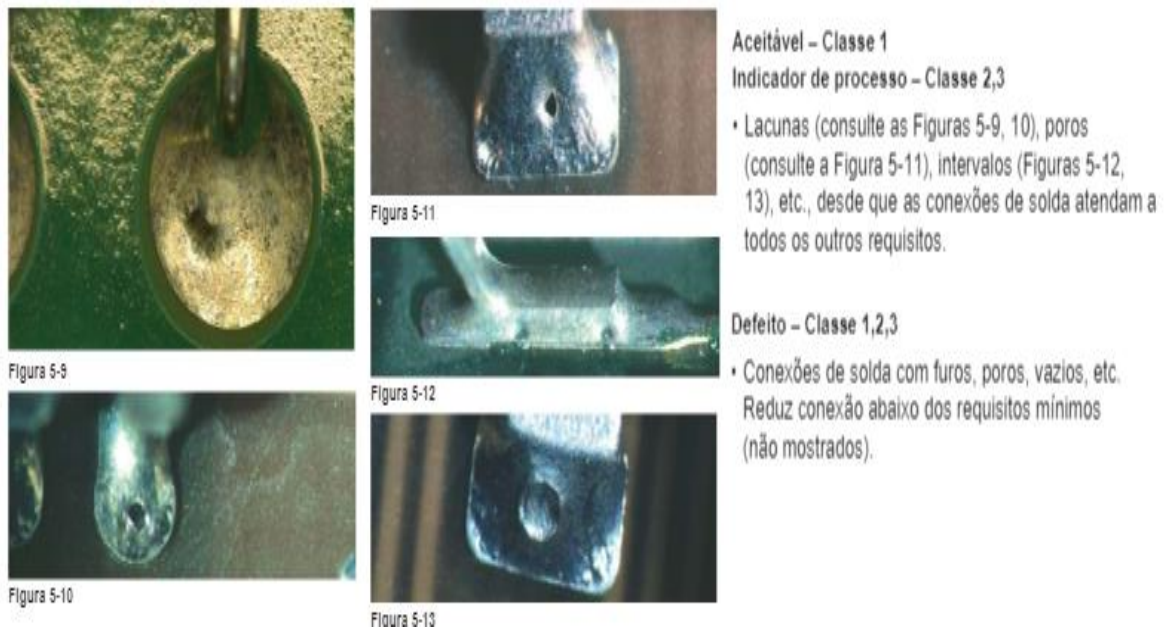
A inspeção visual não mostrou anomalias para todos os casos mostrados na Figura 66. Os barris foram inspecionados por raio X para observar o preenchimento do barril com solda, porém essas imagens não são possíveis de analisar a porcentagem de preenchimento do buraco. A Figura 67 possibilita ver uma imagem clara de contraste escuro para furos preenchidos e claro para quando não há solda no furo e conseguimos determinar exatamente os pontos na imagem simplesmente processando a imagem com um valor limite, uma vez que a imagem é sombreada de forma desigual por toda a área. É necessária a utilização do raio X para análise nesse caso pois a solda pode criar uma crosta falsa sem ter o preenchimento do furo completo. A IPC-A-610H considera defeito as anomalias de soldas que podem gerar furos, poros ou vazios como mostra na figura 68.

**Figura 67** – Comparação do preenchimento do barril bom e ruim



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

**Figura 68 – Anomalias de soldagem – void /furos (Pin Holes/Blow Holes)**



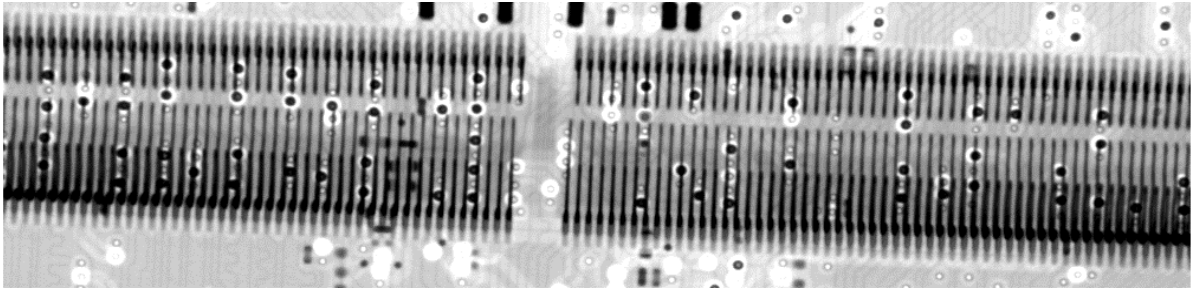
Fonte: IPC- 610

#### 5.1.1.2. JDIMM1 e JDIMM2

A figura 69 e 70 de raio X oferece uma perspectiva interna nítida e detalhada, revelando a parte interna de visão dificultada devido a estrutura plástica dos componentes JDIMM1 e JDIMM2 os slots de memória RAM. Notavelmente, a análise não revela a presença de quaisquer defeitos nas junções entre esses componentes como curtos de solda como na figura 71 que podem estar escondidos embaixo da parte plástica. A característica distintiva observada nos terminais, com sua configuração em formato de "asa de gaivota" (gull wing), está claramente delineada na imagem de raio X. A análise não apenas valida a qualidade da conexão, mas proporcionando uma visão confiável e detalhada do estado funcional e estrutural desses componentes críticos no sistema. Essa imagem, portanto, é instrumental na garantia da integridade e desempenho eficiente dessa interface vital em dispositivos eletrônicos.

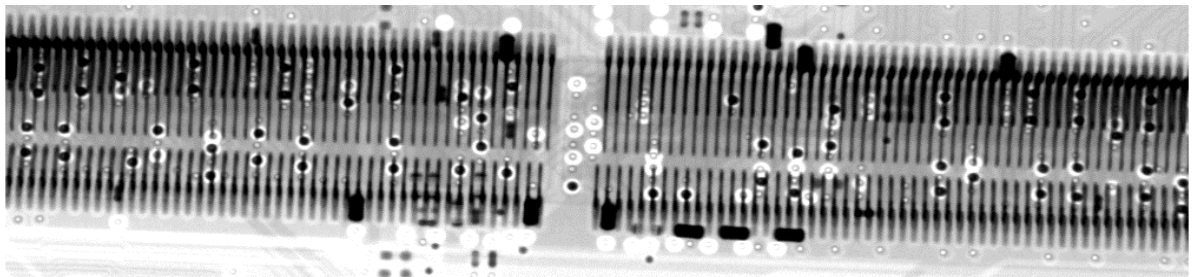


**Figura 69 – Raio X JDIMM1**



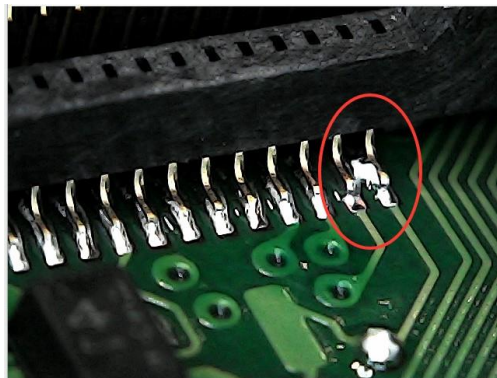
**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

**Figura 70 – Raio X JDIMM2**



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

**Figura 71 – Curto de solda entre terminais**

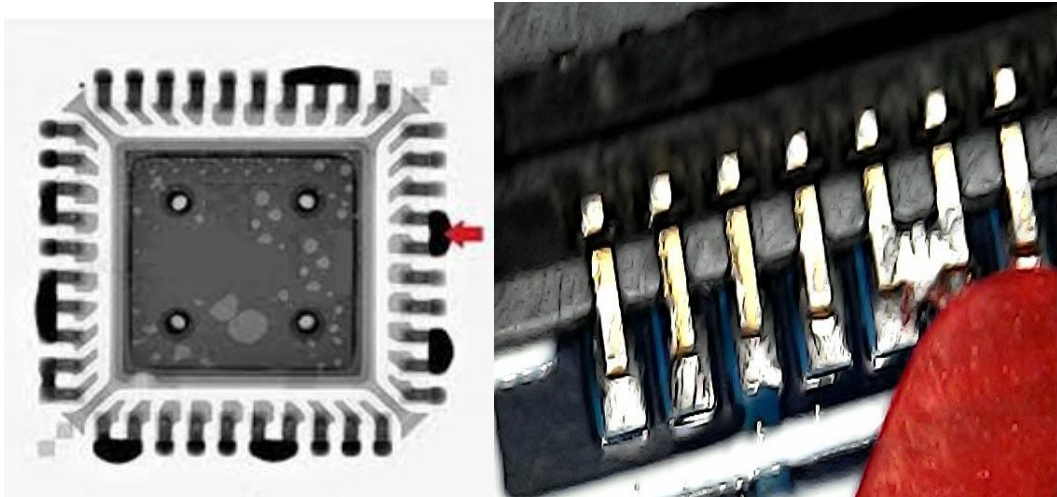


**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

A figura 72 revela a presença de um defeito crítico - um curto de solda - no componente IC por terem o mesmo terminal dos componentes JDIMM1 e JDIMM2 o modo de falha se apresentaria igual. A análise radiográfica destaca claramente a região comprometida, onde terminais do IC estão indevidamente conectados, resultando em um curto-circuito. A visualização proporcionada pela imagem de raio X permite uma identificação precisa da localização do defeito, indicando o ponto

específico onde ocorre a falha na conexão. A presença desse curto de solda é evidenciada pela sobreposição de materiais condutores, interferindo na integridade da conexão elétrica no interior do componente IC. Este defeito é de particular importância, pois pode impactar negativamente o desempenho do componente e muitas vezes interrompendo uma função que pode não ser identificado pelo processo pois a placa não é testada 100% das funções. A análise de raio X se faz necessária principalmente quando as falhas não são detectáveis de forma visível fácil, como por exemplo quando tem um shield em cima do componente ou quando tem qualquer bloqueador da visão de todo o comprimento do terminal do componente impede a visão.

**Figura 72 - Curto de solda**



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

#### 5.1.1.3 C1

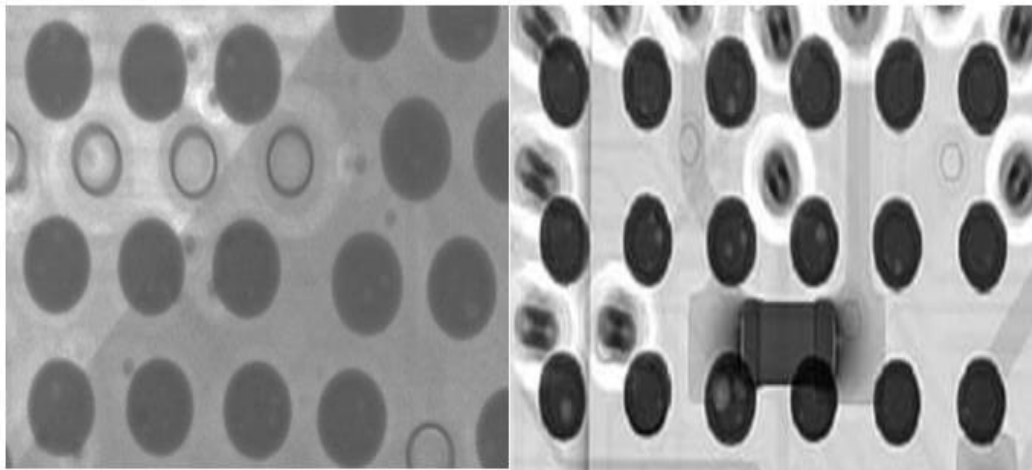
A análise do processador chamado de UC1 consiste na análise dos ball (esferas de solda) pois as imagens de raio X fornecem uma visão interna não invasiva, permitindo a avaliação da qualidade das soldas e a detecção de potenciais defeitos. Ao examinar as esferas de solda, pode-se identificar características como tamanho, forma, distribuição e integridade das ligações. Um aspecto crítico é assegurar que as esferas de solda estejam devidamente alinhadas e conectadas aos terminais dos componentes, sem apresentar falhas como trincas, voids dentro da norma IPC-A-610 ou curtos de solda. A análise de ball por raio X é particularmente útil para identificar



defeitos como "voids" (bolhas de ar na solda) e conexões insuficientes. A qualidade das esferas de solda é essencial para garantir uma conexão elétrica confiável, resistência mecânica e a durabilidade do componente eletrônico.

Para detectar *void* em esferas de solda as imagens de amostra são adquiridas usando o sistema raios-X. *Void*s são definidas como cavidades formadas dentro de uma esfera de solda devido à quantidade de gases que fica preso na solda bola durante o refluxo. Para fazer análise dos voids deve usar critérios de aprovação contidos na figura 73 e tabela 4 também como também medir o tamanho dos *void*s com recurso computacional ou comprar com a IPC respeitando os 30% da área.

**Figura 73 – Void em ball**



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Para análise do BGA utilizamos a IPC – 7095B complementar referente ao critério de inspeção de *Void* pois é referente implementação de design e montagem para tecnologia *Ball Grid Array* (BGA) e *Fine-Pitch BGA* (FBGA), com foco em problemas de inspeção, reparo e confiabilidade associados ao design e montagem de placas impressas usando esses critérios da tabela 4.

**Tabela 4 – Classificação de Void**

Diâmetro do Solder Ball/ Imagem do Raio X	Void 0.20 mm diâmetro	
	% Void Diâmetro	% Void Area
0.85 mm	24%	6%
0.75 mm	27%	7%
0.65 mm	31%	9%
0.55 mm	366%	13%

0.45 mm	44%	20%
0.40 mm	50%	25%
0.30 mm	67%	44%

Fonte: IPC-7095 B Classificação de *Voids*

Grandes *voids* nas juntas de solda e excesso de bolas de solda em à superfície são sintomas de um refusão mal controlado perfil. Os *voids* são nesse caso o resultado da entrada de oxigênio que ficou presa no meio da solda e causados por compostos orgânicos voláteis aprisionados substâncias do fluxo. Eles podem causar solda enfraquecida, tornando-as mais propensas a fraturas. *Void* na superfície podem causar curtos se ficarem alojados entre duas superfícies condutoras. Tempos de rampa e saturação mais lentos podem muitas vezes remediarem esses dois problemas.

Resfriamento inadequado pode resultar em granulados ou “pedras” nas junções dos componentes com a PCB. Capacitores e resistores são mais propensos a isso tipo de defeito. Se o resfriamento for muito rápido, um lado de um componente pode esfriar mais rápido que o outro, fazendo com que a solda congele nessa ponta causando problemas como tombstone ou insuficiência de solda. Componentes com chumbo devem ser coplanares de um lado do componente para o outro pois problemas de coplanaridade são geralmente os resultados de problemas de manipulação errada dos componentes sensíveis a umidade ou com armazenamento incorreto de temperatura e humidade. Problemas de coplanaridade podem ser causam juntas de solda abertas, bolas de solda soltas, componentes dobrados, torcidos ou levantados.

Grandes *voids* nas juntas de solda e excesso de bolas de solda em à superfície são sintomas de um refusão mal controlado perfil. Os *voids* são nesse caso o resultado da entrada de oxigênio que ficou presa no meio da solda e causados por compostos orgânicos voláteis aprisionados substâncias do fluxo. Eles podem causar solda enfraquecida, tornando-as mais propensas a fraturas. *Void* na superfície podem causar curtos se ficarem alojados entre duas superfícies condutoras. Tempos de rampa e saturação mais lentos podem muitas vezes remediarem esses dois problemas.

Resfriamento inadequado pode resultar em granulados ou “pedras” nas junções dos componentes com a PCB. Capacitores e resistores são mais propensos a isso tipo de defeito. Se o resfriamento for muito rápido, um lado de um componente pode esfriar mais rápido que o outro, fazendo com que a solda congele nessa ponta

causando problemas como tombstone ou insuficiência de solda. Componentes com chumbo devem ser coplanares de um lado do componente para o outro pois problemas de coplanaridade são geralmente os resultados de problemas de manipulação errada dos componentes sensíveis a umidade ou com armazenamento incorreto de temperatura e umidade. Problemas de coplanaridade podem ser causam juntas de solda abertas, bolas de solda soltas, componentes dobrados, torcidos ou levantados.

Para a análise do BGA a considera requisitos para inspeção visual: Primeiro quando o método de inspeção visual é usado para verificar a aceitação do produto, os níveis de aumento visual da norma são aplicados critérios de aprovação contidos na tabela 5. Segundo que os terminais de soldagem na linha externa (perímetro) devem ser inspecionados visualmente sempre que possível e prático na figura 1 mostra imagens da norma IPC usada de comparação. Terceiro a matriz da área tem que ser alinhada em ambas as direções, X e Y com os marcadores de canto (pontos de referência) não PCB (se presentes). Quarto que a ausência de um terminal de componente de matriz de área, como esferas de solda ou colunas, é um defeito, a menos que especificado de outra forma pelo projeto. Se for necessário um preenchimento por baixo (Underfilling), os critérios de processamento e aceitabilidade devem ser acordado entre o fabricante e o usuário.

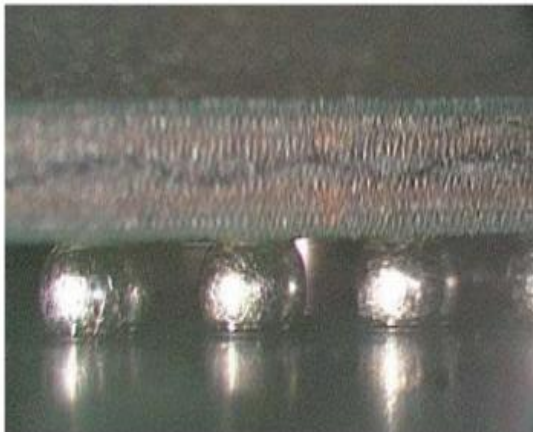
**Tabela 5 – Critérios dimensionais – Componentes BGA com bolas colapsantes**

Características	Cláusula	Classes 1,2,3
Alinhamento	8.3.12.1	O desalinhamento da esfera de solda não viola o espaço elétrico mínimo.
Espaço da esfera de solda (C), Figura 8-161	8.3.12.2	A esfera de solda não viola o espaço elétrico mínimo
Conexões soldadas	8.3.12.3	Não há ponte de solda; as esferas de solda BGA entram em contato e fluem para linha, formando um laço elíptico contínuo ou uma conexão de ilar.
Vazios	8.3.12.4	30% ou menos de vazios em qualquer esfera na área de imagem dos raios X.
Material de enchimento ou retenção inferior	8.3.12.5	Quando for necessário, o material de enchimento abaixo (underfilling) ou retenção está presente e completamente selado.

Fonte: IPC 610

O alinhamento adequado de BGA é crítico para garantir a integridade da conexão entre as esferas de solda da BGA e os pads correspondentes na placa de circuito. A IPC-A-610H como mostra na figura 74 menciona critérios específicos para avaliação visual do alinhamento correto das esferas de solda BGA em relação aos pads classificando como ideal e defeito e na figura 75 apresenta os critérios de montagem.

**Figura 74 – Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) – Alinhamento**



**Ideal – Classe 1,2,3**

- A colocação de esferas de BGA está centralizada e não mostra nenhum desalinhamento da esfera aos centros da faixa.

**Defeito – Classe 1,2,3**

- O desalinhamento da esfera de solda viola o espaço elétrico mínimo.

Fonte: IPC 610

**Figura 75 – Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) – Alinhamento**

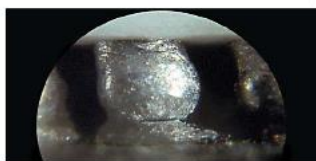


Figura 8-162



Figura 8-163

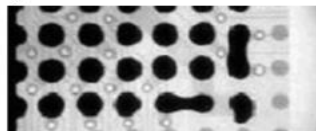


Figura 8-164



Figura 8-165



Figura 8-166

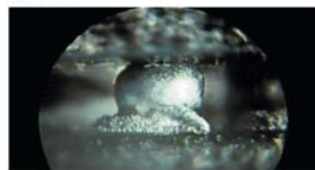


Figura 8-167

**Ideal – Classe 1,2,3**

- As terminais de esferas de solda do BGA são uniformes em tamanho e forma.

**Aceitável – Classe 1,2,3**

- Não há pontes de solda
- As esferas de solda do BGA estão em contato e fluem pela faixa formando uma volta elíptica uniforme ou uma conexão de pilar

**Indicador de processo – Classe 2,3**

- As esferas de solda do BGA não são uniformes em tamanho, forma, coloração e contraste de cor.

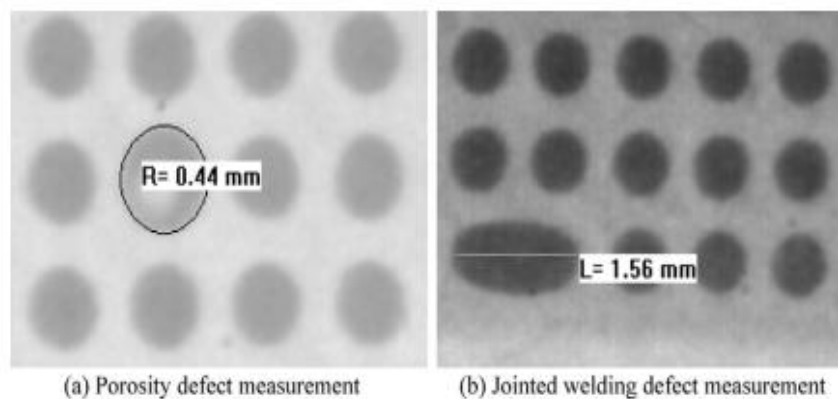
**Defeito – Classe 1,2,3**

- A conexão de solda está fraturada, ver Figura 8-162.
- A esfera não flui com a solda (head in pillow/head on pillow), ver Figura 8-163.
- Há evidência visual o de Raios X de pontes de solda, ver Figura 8-164.
- A conexão de solda mostra uma "cintura" indicando que a esfera de solda e a pasta de solda aplicada não fluíram juntas, ver Figura 8-165.
- Molhagem incompleta na faixa, ver Figuras 8-165 e 166.
- As esferas de solda do BGA tem refluxo incompleto da pasta de solda, ver Figura 8-167.

Fonte: IPC 610

A figura 76 fornece uma visão interna detalhada que permite a realização precisa de medições do tamanho dos balls (esferas de solda). Através desta técnica de inspeção não destrutiva, cada ball é claramente delineada na imagem, permitindo a identificação e marcação de seus contornos mesmo para os ball com má formação. A análise de raio X possibilita a medição exata do diâmetro de cada esfera, sendo um método eficaz para avaliar a uniformidade e consistência das dimensões em toda a superfície do componente eletrônico. A imagem de raio X proporciona não apenas uma visualização qualitativa das esferas de solda, mas também dados quantitativos.

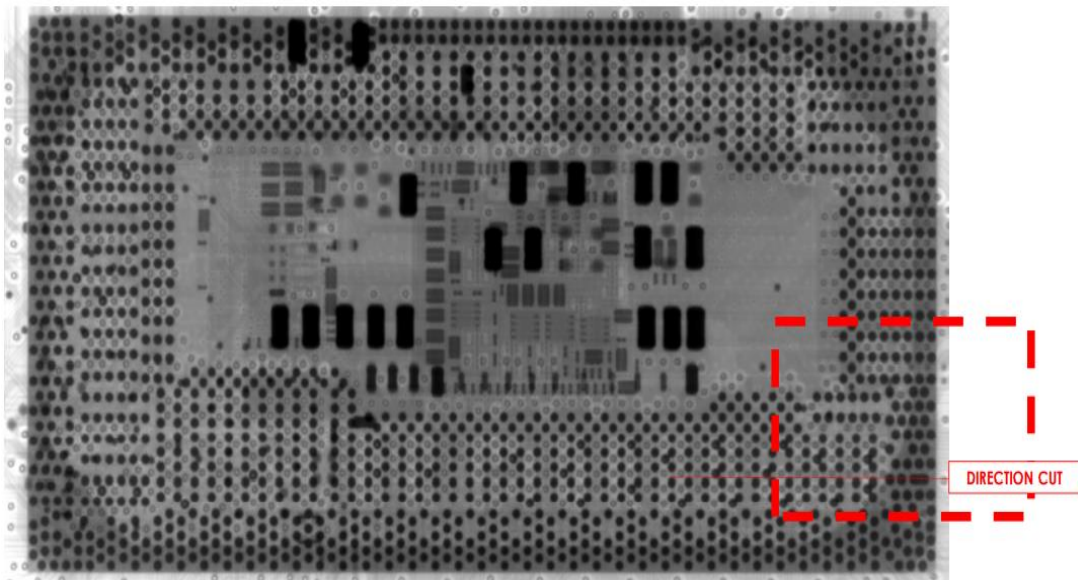
**Figura 76 –** Medições do tamanho do ball com má formação



Fonte: IPC-A-610

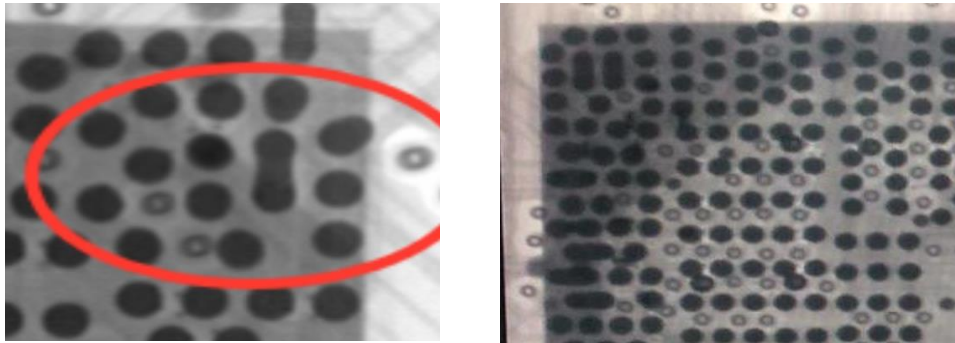
Deve-se notar que na Figura 77 temos uma imagem macro do processador para observar a inspeção real que é realizada no processo no começo na investigação de qualquer placa, na figura 78 a obtenção de figuras de diferentes formatos de curtos e mais aproximadas de ver o defeito somente para fins de demonstração, as imagens são super importantes para a detecção do defeito uma vez que podemos identificar vários causadores de curtos como: perfil de forno incorreto, má formação do *ball*, não conformidades da placa ou do processador, etc...

**Figura 77 – Processador com curto de solda**



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

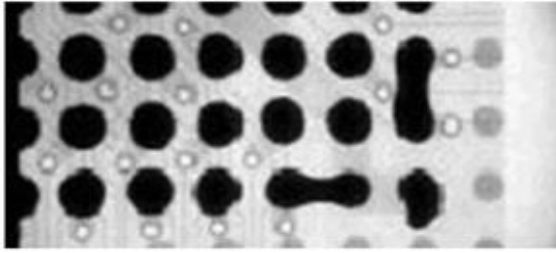
**Figura 78 – Curto de solda**



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

A norma IPC-A-610 define critérios para aceitação ou rejeição de soldas na figura 79 com base em vários parâmetros, incluindo tamanho, forma, posição e integridade. No contexto de curtos-circuitos, a norma especifica que a presença de curtos entre as esferas de solda e outros terminais ou trilhas na placa de circuito impresso é uma não conformidade. Quando se refere a distâncias mínimas, propõe requisitos específicos sobre as distâncias mínimas permitidas entre as esferas de solda e outros componentes ou trilhas para evitar curtos.

**Figura 79** – Defeito curto de solda



**Defeito – Classe 1,2,3**

- Há evidência visual o de Raios X de pontes de solda, ver Figura 8-164.

**Fonte:** IPC-A-610H

## 5.2 CROSS SECCTION

### 5.2.1 LADO TOP

A priorização determinada para proposta de teste para o lado TOP figura 22, levando em conta que é uma técnica de análise metalográfica que permite examinar a qualidade das soldas e das interfaces entre os componentes na PCBA para análise foram escolhidas:

1. JWLAN1 é o conector para acoplar a WLAN módulo sem fio bluetooth com o objetivo de observar a soldas SMD, pois conectam os dispositivos eletrônicos à placa de circuito. Verificar a qualidade das soldas SMD é essencial para garantir conexões sólidas e evitar possíveis falhas de soldagem, como falhas de filamento, trincas ou voids.
2. UC1 BGA os componentes BGA, como processadores ou chips de memória, têm esferas de solda na parte inferior que fazem contato com a placa de circuito. O teste de cross section pode revelar problemas nas esferas de solda, como trincas ou falhas de ligação.
3. JDIMM1 é crítico pela funcionalidade na conexão de com o slot de memória RAM e tem como característica os terminais em formato de "asa de gaivota" (gull wing). Os seguintes aspectos são considerados ao avaliar a qualidade dos terminais: análise ângulo de inclinação, integridade das soldas, distância entre os terminais, orientação e alinhamento, a quantidade adequada de solda e ausência de contaminação
4. JHDM1 como os conectores de alimentação, USB ou HDMI, são cruciais para a funcionalidade do notebook. Verificar a qualidade

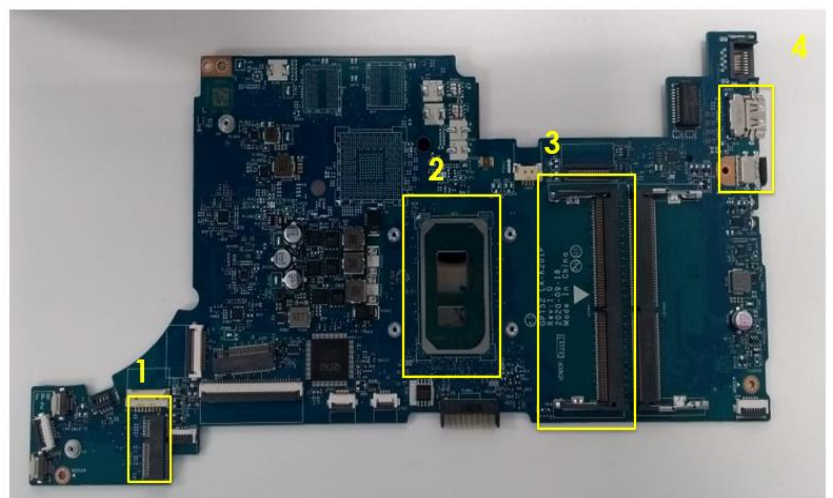


das soldas e das interfaces de contato desses conectores é importante para garantir uma conexão confiável. Com intuito de avaliar a qualidade das conexões PTH e verificar a conformidade com as especificações e padrões através das análises das dimensões e a qualidade das soldas.

**Figura 22** – Proposta de teste TOP

## Proposta de teste – Top

Componentes para Cross Section:	
1.	JWLAN1
2.	UC1 BGA
3.	JDIMM1
4.	JHDMI



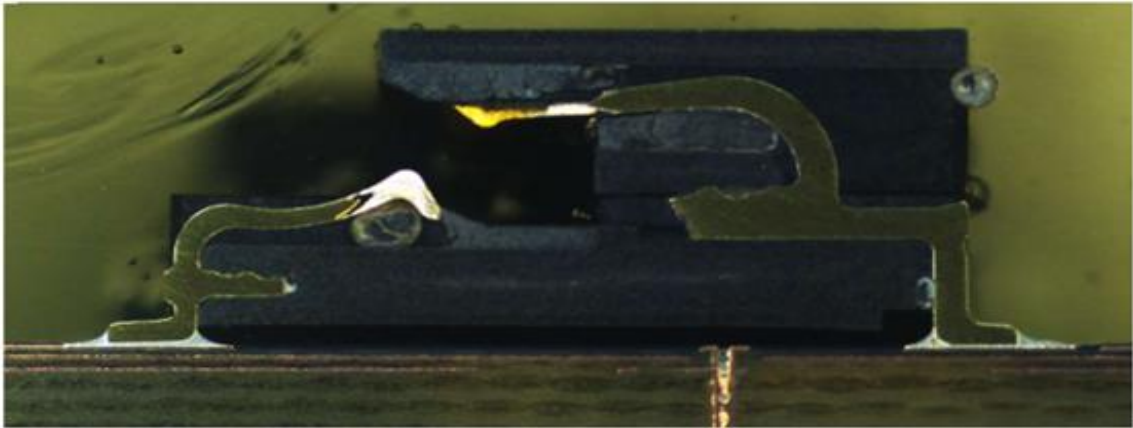
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

### 5.2.1.1 JWLAN1

Para a análise dos conectores a considera requisitos para inspeção visual: Primeiro quando o método de inspeção visual é usado para verificar a aceitação do produto, os níveis de preenchimento de furo de solda são observados. Caso encontrada alguma não conformidade como na figura 23 o processo deve ser parado e feito a análise e deve ser feito a revisão do lote produzido. Segundo que os terminais de soldagem na linha analisada podam não ser identificado o defeito no teste funcional.



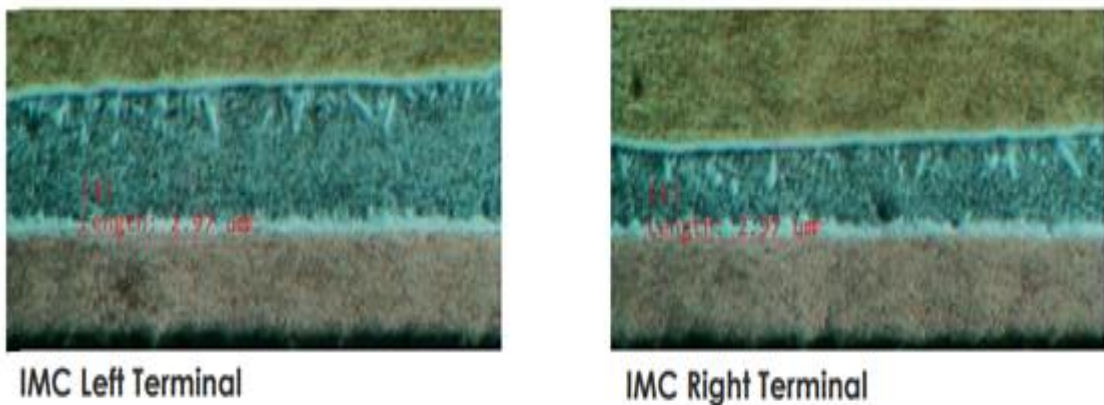
**Figura 23** – Corte JWLAN1



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

As imagens macroscópicas do corte transversal estão mostrando a primeira linha de terminais. A soldagem dos terminais mostrando uma estrutura homogênea e contínua (onde não apresenta rupturas).

**Figura 24** – IMC JWLAN1



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

Um terminal molhado é evidente. O IMC foi encontrado na figura 24 em torno de 2,97  $\mu\text{m}$ . O controle adequado do IMC ajuda a garantir que as soldas sejam duráveis e capazes de resistir a condições operacionais adversas. O IMC (Intermetallic Compound) é um termo comum e usado em análises de solda.

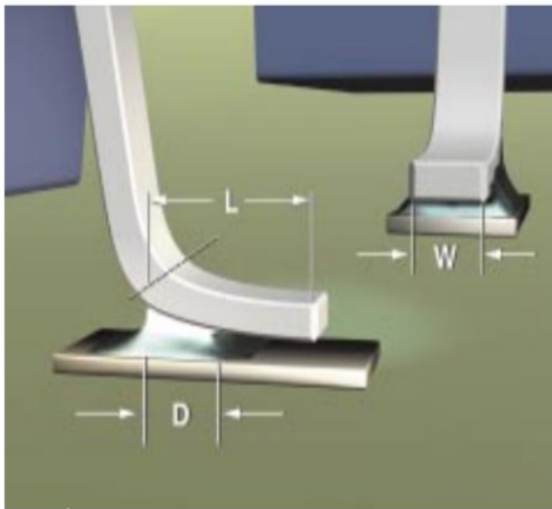
O IMC refere-se a compostos intermetálicos que se formam na interface entre o material de solda (geralmente estanho) e os materiais a serem unidos durante o processo de soldagem. Os compostos intermetálicos são ligas de metais que têm propriedades distintas e diferentes composições em comparação com os materiais de

base. Quando a solda é aquecida durante o processo de soldagem e entra em contato com os materiais de base, ocorre uma reação química entre os átomos dos materiais, levando à formação do IMC. Alguns dos principais pontos a serem considerados em relação ao IMC em análises de solda incluem:

1. Espessura controlada: A espessura do IMC deve ser controlada, pois uma camada excessivamente espessa pode causar problemas, como fragilização da solda.
2. Composição controlada: A composição do IMC deve ser monitorada para garantir que ela esteja dentro de limites aceitáveis. A composição do IMC pode variar dependendo dos materiais de base e da liga de solda usados.
3. Adesão adequada: O IMC deve aderir firmemente tanto ao material de solda quanto ao material de base para garantir uma conexão sólida e confiável.
4. Impacto na confiabilidade: O IMC pode afetar a confiabilidade da solda ao longo do tempo, especialmente em situações de ciclagem térmica e estresse mecânico. Portanto, é importante entender como o IMC pode influenciar o desempenho a longo prazo dos componentes soldados.

Além do IMC podemos observar que o componente segue a norma de referência para a análise é a IPC-610 e considerando o contato aceitável a solda não pode estar fazendo contato com o corpo do componente.

**Figura 25 – Aceitabilidade JWLAN1**



**Aceitável - Classe 1**

- Mínimo comprimento da junta lateral (D) é igual à espessura do terminal (W) ou 0,5 mm [0,02 pol.], a que for menor.

**Aceitável - Classe 2,3**

- Mínimo comprimento da junta lateral (D) é igual à espessura do terminal (W).
- Quando o comprimento do terminal (L) (conforme medido a partir da ponta para o meio ponto do raio de envergadura do calcanhar) for menor do que (W), o mínimo comprimento da junta lateral (D) é de pelo menos 75% do comprimento do terminal (L).

**Defeito - Classe 1**

- Mínimo comprimento da junta lateral (D) é menor do que a espessura do terminal (W) ou 0,5 mm [0,02 pol.], o que for menor.

**Defeito - Classe 2,3**

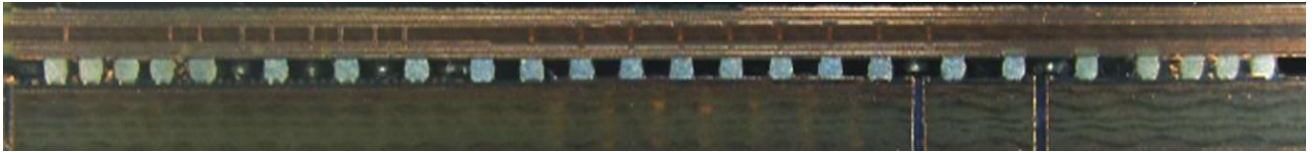
- O comprimento da junta lateral (D) é menor do que a espessura do terminal (W) ou 75% do comprimento do terminal (L), o que for menor.

**Fonte:** IPC-A-610H

### 5.2.1.2 UC1 BGA

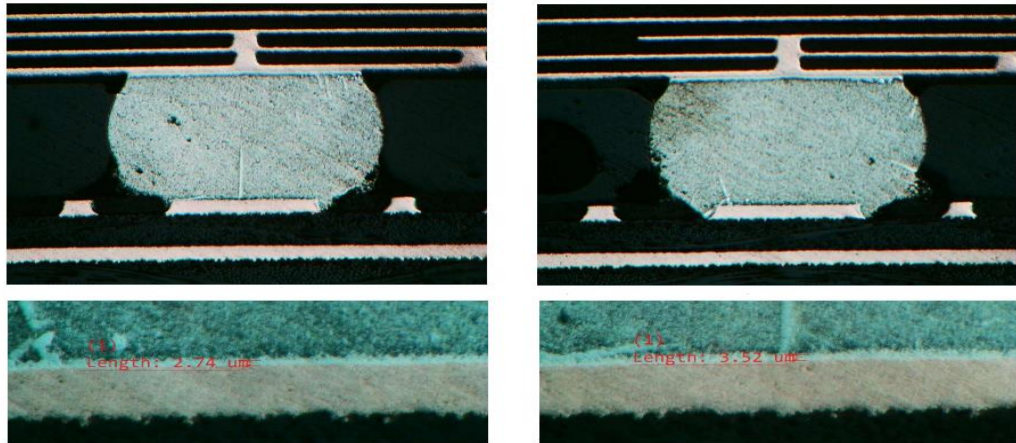
As imagens macroscópicas do corte transversal estão mostrando a primeira linha, existem algumas imagens ao longo da primeira linha de bolas de solda conforme imagem 26. Foram seccionadas 2 balls imagem 27 para revelar uma única fileira de 24 bolas a partir do centro nas condições para demonstrar a conformidade. Essa amostra foi embutida em uma montagem metalográfica a frio e polidas para revelar uma seção transversal sob a área das juntas da matriz do processador, o que deixou evidentes as as esferas de forma arredondada e estrutura homogênea e IMC contínuo. O IMC foi encontrado lado direito 3,52  $\mu\text{m}$  e lado esquerdo em 2,74  $\mu\text{m}$ . Esta soldagem está de acordo com IPC-A-610H

**Figura 26** – Primeira fila BGA processador



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

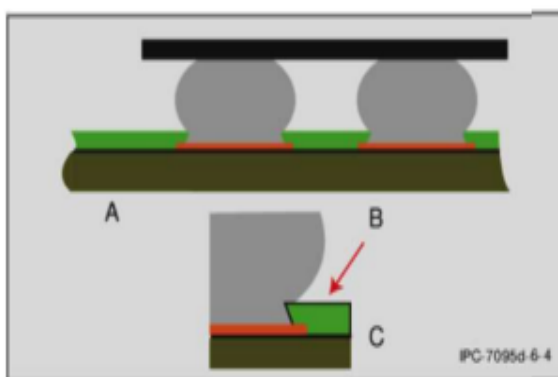
**Figura 27** – BGA e IMC



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

A linha de bolas é centralizada e alinhada e segundo o critério de aprovação da IPC. Na figura 28 pode-se observar que o componente segue a norma de referência para a análise é a IPC-610 e considerando o contato aceitável a solda não pode estar fazendo contato com o corpo do componente.

**Figura 28** – Mascara de solda



A - Área transversal da esfera de solda reduzida

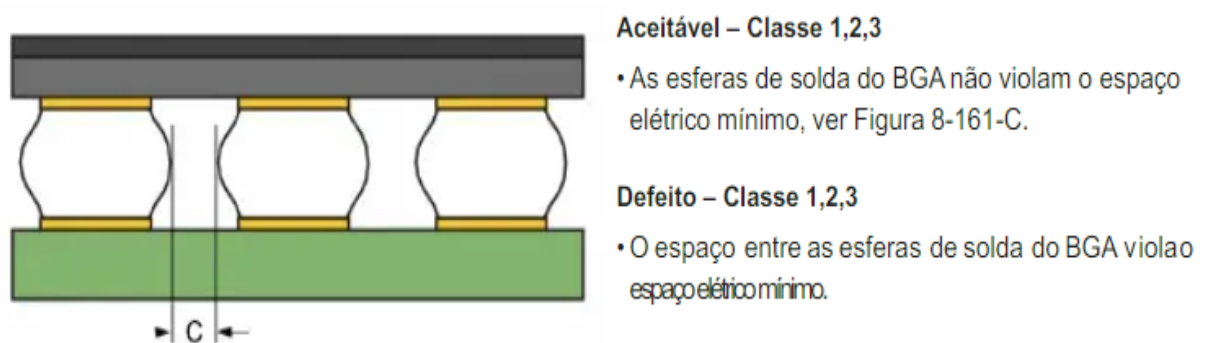
B – Máscara de solda concentra o estresse

C- A expansão térmica no eixo Z é maior para a máscara de solda do que para a bola de solda

Fonte: IPC-7095D

Conforme a figura 29 podemos observar o *void* da figura 1 de um corte metalográfico de cross section essa imagem é feita através do processo de embutimento a Frio com Resina Epóxi do processador onde vamos ver corte de uma fileira e com o auxílio de um microscópio x50 utilizado para avaliar a microestrutura de uma dada amostra, em uma secção determinada, esse processo trata de um teste destrutivo e que leva em torno de 2 dias para o processo completo, o que inviabiliza o uso contínuo no processo produtivo.

**Figura 29** – Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) entre esferas de solda



**Fonte:** IPC-A-610H

A norma IPC-A-610H não fornece especificamente em números o espaçamento entre os BGAs. No entanto, a norma inclui critérios para a aceitação de soldas de BGA e fornece informações gerais sobre a inspeção de BGAs.

Para determinar o espaçamento adequado entre os BGAs, você deve considerar principalmente as especificações de design fornecidas pelo fabricante da PCB e do BGA, bem como as práticas recomendadas na indústria para o espaçamento entre componentes, no caso como estamos falando do processador da Intel, podemos considerar:

1. Espaçamento mínimo entre BGAs: O espaçamento entre BGAs deve ser determinado com base nas especificações de design e nos requisitos de montagem do PCB. O fabricante do PCB geralmente fornecerá informações específicas sobre o espaçamento mínimo recomendado entre os pads de solda de BGA.
2. Alinhamento preciso: A norma IPC-A-610H destaca a importância do alinhamento preciso dos BGAs durante o processo de montagem. Isso



incluir garantir que os pads de solda do BGA estejam alinhados corretamente com os pads correspondentes na PCB.

3. Inspeção de soldas de BGA: A IPC-A-610H inclui critérios de aceitação para inspeção visual de soldas de BGA, incluindo aspectos como a presença de trincas, bolhas, inclusões de solda e outras características que podem afetar a qualidade da solda. Esses critérios ajudam a determinar se a montagem de BGA atende aos padrões de qualidade aceitáveis.

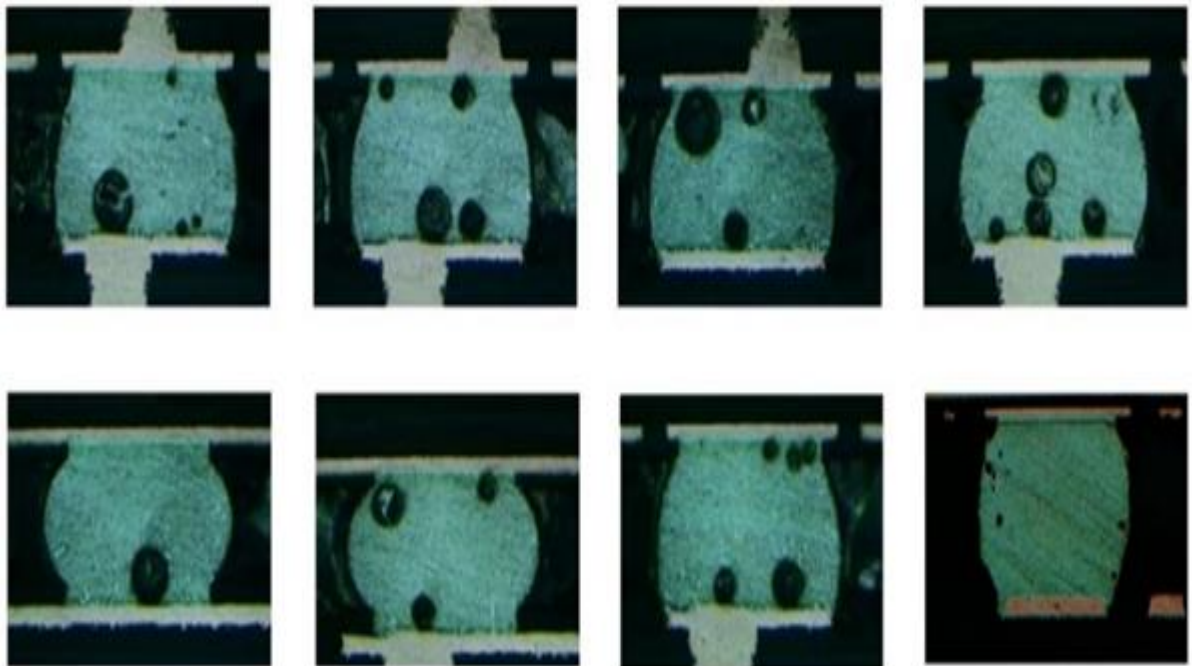
Mostrar imagens de um processador com void em um do corte transversal estão mostrando a primeira linha na figura 30, existem algumas imagens ao longo da primeira linha. Foram seccionadas 8 balls na imagem 31 para revelar as diferentes condições para demonstrar não conformidade.

**Figura 30** – Primeira fila de um processador com void



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

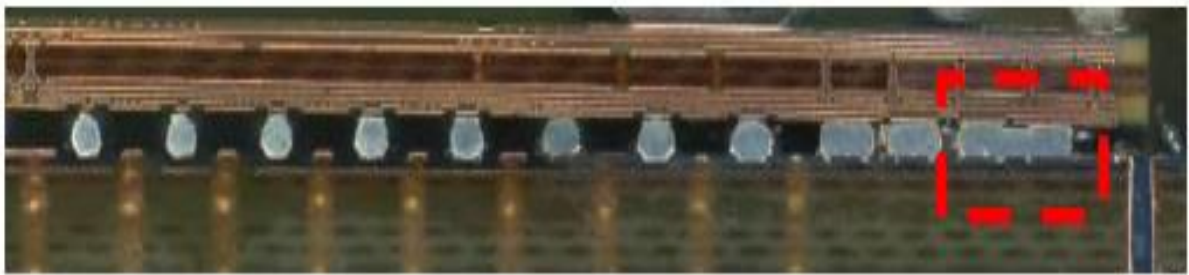
**Figura 31** – cross section de um processador com furos no *ball*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

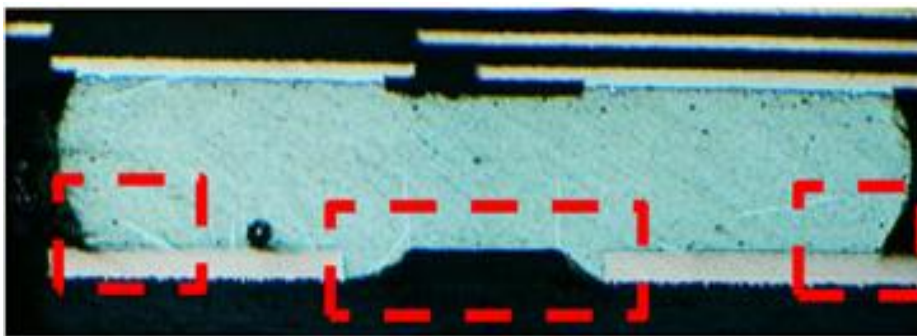
Os void (ou também conhecida como bolas de solda soltas) na superfície podem causar curtos como na figura 32 podemos observar a primeira fila de um processador com curto, se ficarem alojados entre duas superfícies condutoras. Tempos de rampa e saturação mais lentos podem muitas vezes remediam esses dois problemas. Na figura 33 o cross section mais detalhado da área do corte onde é possível ver com detalhes o curto. A figura 34 mostra que a camada intermetálica com a medida da espessura entre 3,20 e 3,28  $\mu\text{m}$ . Demonstrando normalidade

**Figura 32** - Primeira fila de um processador com curto



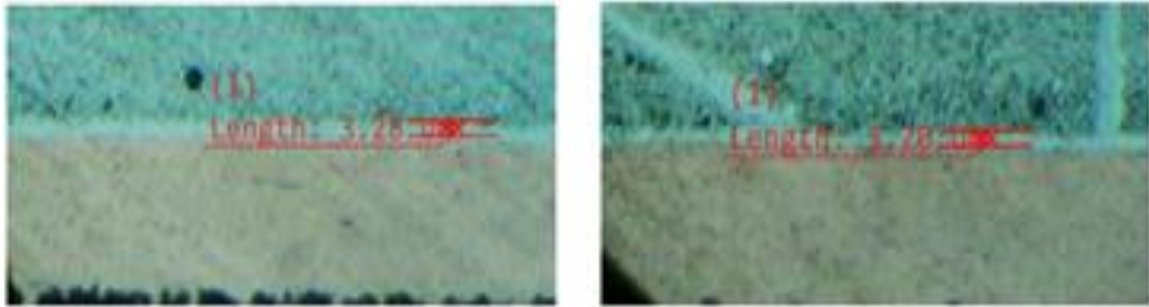
**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

**Figura 33** – Cross section de um curto de solda



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

**Figura 34** – IM da placa com curto de solda



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

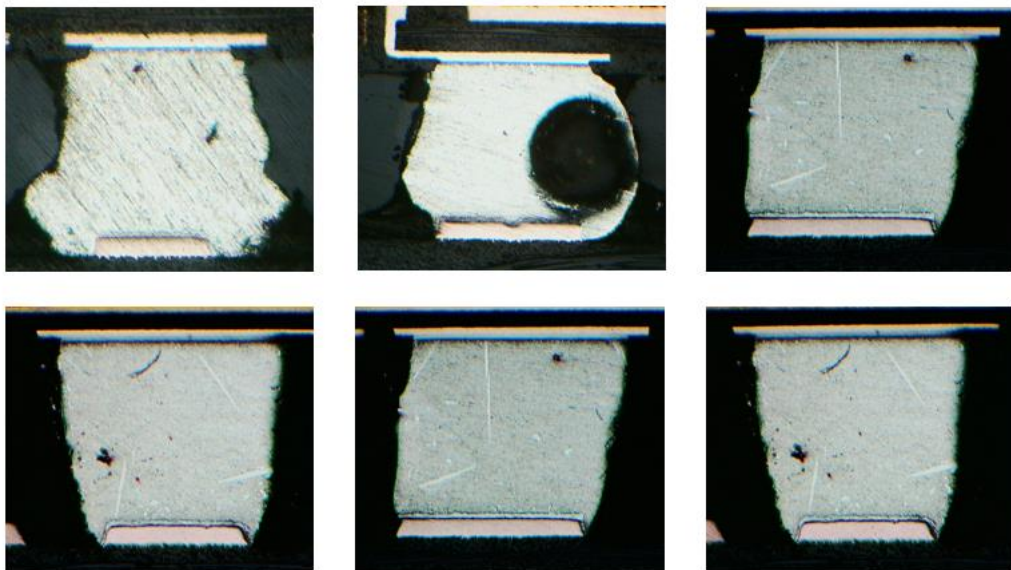
Segundo a IPC-7095 revisão D trata sobre a conformidade das placas com a região da máscara de solda não deve demonstrar estresse ou diferença na formação da bola, incluindo informações importantes sobre o design, aplicação e inspeção da máscara de solda em PCBs, visando garantir que as soldas sejam feitas de maneira confiável e que a integridade do circuito não seja comprometida durante o processo de montagem eletrônica. A norma conta com os seguintes aspectos para análise:

1. Espaçamento entre pads e máscara de solda: A norma fornece orientações sobre a distância apropriada entre as almofadas (pads) de solda e a máscara de solda circundante para garantir que não haja curto circuitos durante o processo de soldagem.
2. Design das aberturas da máscara de solda: A norma descreve como projetar as aberturas na máscara de solda de acordo com o tipo de componente e o processo de soldagem a ser utilizado. Isso inclui informações sobre as dimensões das aberturas e o espaçamento entre elas.
3. Tolerâncias e especificações da máscara de solda: A IPC-7095-D estabelece tolerâncias e especificações para a espessura da máscara de solda e outros parâmetros relacionados à sua aplicação. Isso garante que a máscara de solda seja aplicada de maneira consistente e atenda aos requisitos de qualidade.
4. Inspeção da máscara de solda: A norma também fornece orientações sobre como inspecionar a máscara de solda após a aplicação para identificar possíveis defeitos ou problemas que possam afetar a qualidade da soldagem.



Grandes Voids como na figura 355 nas juntas de solda e excesso de bolas de solda em a superfície são sintomas de uma solda mal controlada com relação ao perfil. Grandes voids (entrada de oxigênio no meio da solda) são causados por compostos orgânicos voláteis aprisionados substâncias do fluxo. Eles podem causar solda enfraquecida, tornando-as mais propensas a fraturas. Visão do cross section de ball com má formação.

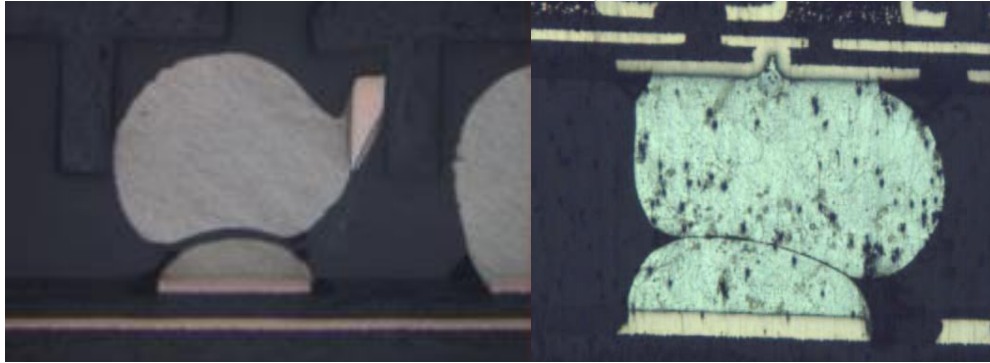
**Figura 35** – cross section de 6 balls de um processador



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

O defeito de head in pillow figura 36 que em português é cabeça no travesseiro é produzido durante o reflow, quando o depósito de pasta impressa não funde de forma correta pois a esfera não colapsa e se funde com a pasta caracterizado pela soldagem incompleto da junta ao conectar um BGA. Existem duas fontes principais de defeitos da cabeça no travesseiro: solda deficiente (problemas com a printer ou stencil) ou empenamento do componente. Solda deficiente pode resultar de uma variedade de fontes, como oxidação da esfera de solda, perfil de refluxo térmico inadequado ou ação de fluxo deficiente.

**Figura 36** – Falha de “HEAD IN PILLOW NO BALL” ou cabeça sobre o travesseiro quando a solda não tem ligação com o PAD



Fonte: IPC-7095D

A norma IPC-A-610 na figura 37, que estabelece critérios para a aceitabilidade de montagens eletrônicas, inclui diretrizes específicas para o defeito conhecido como "head-in-pillow" (cabeça no travesseiro), a classificação do defeito "head-in-pillow" na norma depende da extensão e das características específicas do defeito. Em geral, a norma categoriza os defeitos de solda em classes, sendo a Classe 3 a mais restritiva e a Classe 1 a mais permissiva em termos de aceitabilidade.

**Figura 37** – Montagem de superfícies de matrizes de área (BGA) – Conexões de solda

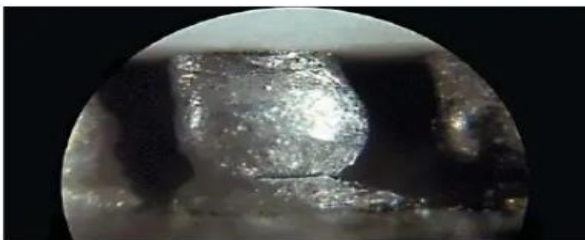


Figura 8-162

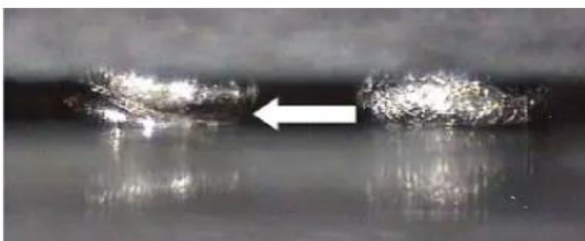


Figura 8-163

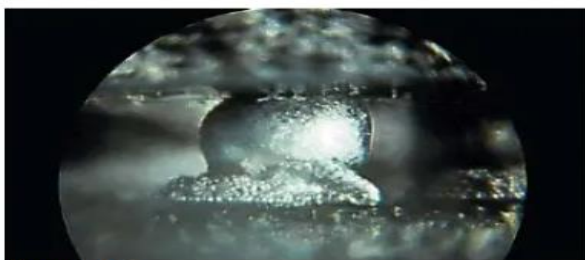


Figura 8-167

**Ideal – Classe 1,2,3**

- As terminais de esferas de solda do BGA são uniformes em tamanho e forma.

**Aceitável – Classe 1,2,3**

- Não há pontes de solda
- As esferas de solda do BGA estão em contato e fluem pela faixa formando uma volta elíptica uniforme ou uma conexão de pilar, ver Figura 8-160.

**Indicador de processo – Classe 2,3**

- As esferas de solda do BGA não são uniformes em tamanho, forma, coloração e contraste de cor.

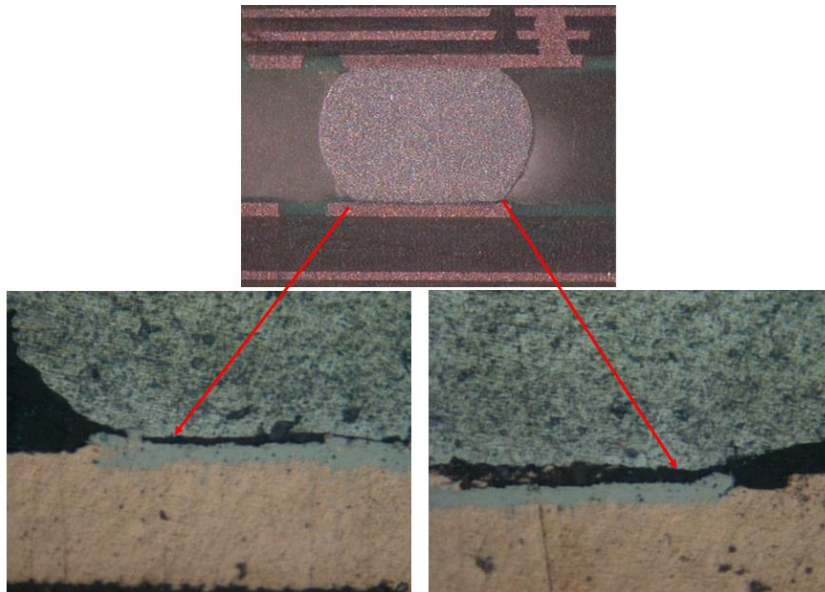
**Defeito – Classe 1,2,3**

- A conexão de solda está fraturada, ver Figura 8-162.
- A esfera não flui com a solda (head in pillow/head on pillow), ver Figura 8-163.
- As esferas de solda do BGA tem refluxo incompleto da pasta de solda, ver Figura 8-167.

Fonte: IPC-A-610H

Análises de falha onde observa-se claramente que a trinca se propaga ao longo da interface, incluindo a análise da seção transversal, foram realizadas na placa testadas pois queda para investigar o modo de falha e compreender o impacto do que ocorreu nas juntas de solda. A Figura 38 mostra a falha que ocorreu em uma placa montada falhou em um teste funcional com mal funcionamento do teclado. Isso indica que a falha está concentrada principalmente nos cantos do ball. Também indica que o modo de falha predominante é a formação de crateras, foram encontrada trinca parcial do IMC e a desconexão da solda com o PAD, mas o modo de falha predominante foi a cratera da almofada, que mostra fratura na placa laminada sob as juntas de solda.

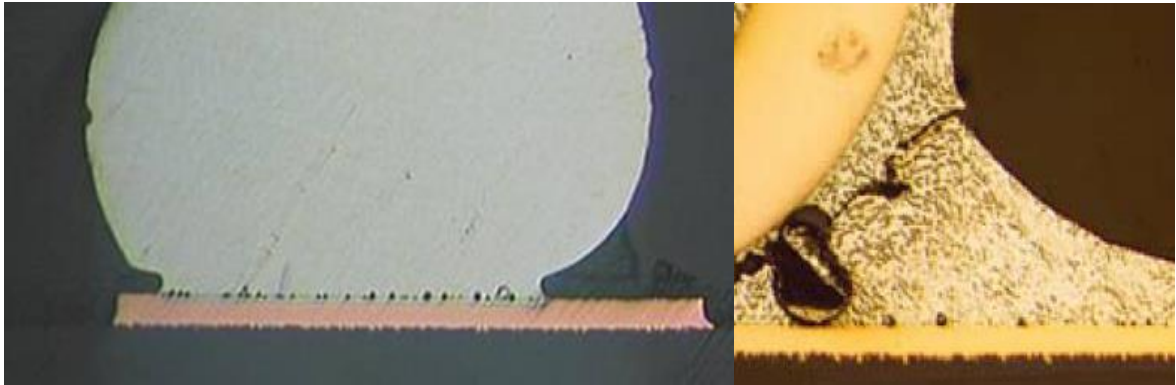
**Figura 38** – Trinca no BGA visão cross section



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

A imagem do cross section na figura 39 revela uma falha significativa na integridade da junta de solda de uma esfera BGA, identificando claramente a presença de um defeito do tipo "void". Este defeito, visível como uma área escura ou vazia na junta de solda, indica a presença de bolhas de ar ou outros contaminantes que impedem uma conexão eficaz entre a esfera BGA e o PAD. A visão oferece uma visão tridimensional detalhada, destacando a extensão do "void" e seus efeitos potenciais na qualidade da conexão inclusive a rachadura que interrompe a conexão.

**Figura 39** - Void no BGA visão cross section



**Fonte:** Intel, 2005

#### 5.2.1.3. JDIMM1

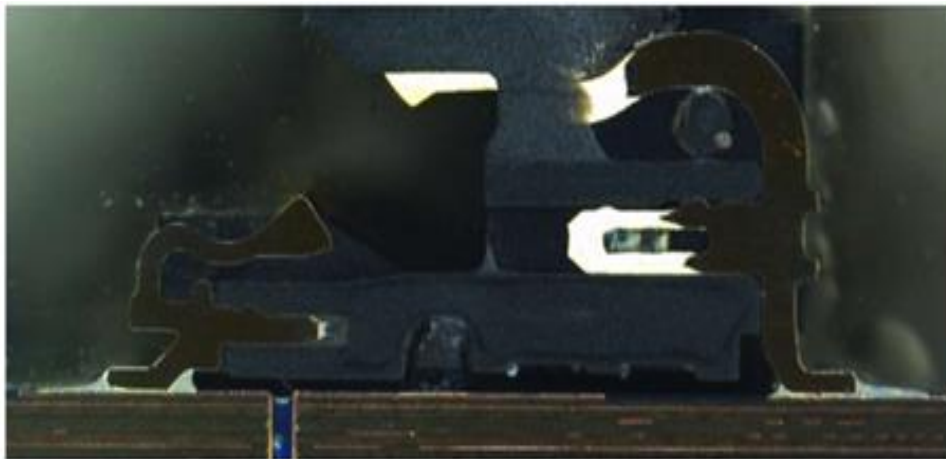
A figura 40 mostra a visão do corte transversal está mostrando a conformidade do material interno e as características da soldabilidade do terminal. A soldagem dos terminais mostrando uma estrutura homogênea e IMC contínuo. Um terminal molhado é evidente. O IMC na figura 41 foi encontrado em torno de 3,08  $\mu\text{m}$ . Os seguintes critérios foram considerados para avaliar a qualidade dos terminais "asas de gaivota":

1. Ângulo de Inclinação: A inclinação das "asas de gaivota" deve estar dentro das tolerâncias especificadas pelo fabricante do componente ou pelas normas da indústria. Desvios significativos podem afetar a qualidade da soldagem.
2. Integridade das Soldas: As "asas de gaivota" devem estar firmemente soldadas à superfície da PCB, sem falhas de solda, trincas ou vazios. A qualidade das soldas é crítica para uma conexão elétrica confiável.
3. Distância entre "Asas de Gaivota": A distância entre as "asas de gaivota" deve ser uniforme e estar dentro das tolerâncias especificadas. Isso garante o correto posicionamento do componente na PCB.
4. Orientação e Alinhamento: O componente SMD deve estar alinhado corretamente com as "asas de gaivota" posicionadas de forma consistente em relação às pads da PCB.



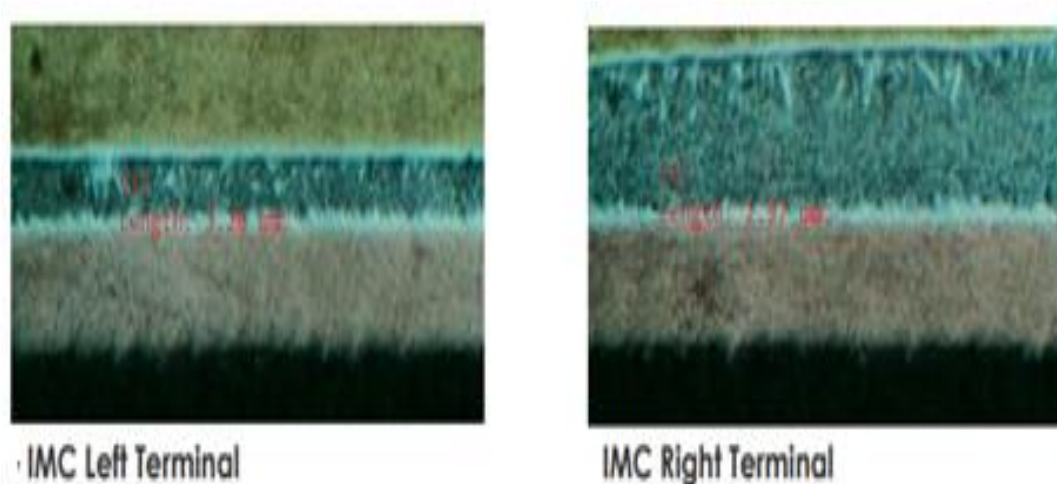
5. Aplicação de Solda: A quantidade adequada de solda deve ser aplicada durante o processo de montagem para garantir uma conexão confiável entre as "asas de gavota" e a PCB.
6. Ausência de Contaminação: As "asas de gavota" não devem estar contaminadas com substâncias estranhas, como fluxos de soldagem.

**Figura 40 – Corte JDIMM1**



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

**Figura 41 – IMC JDIMM1**



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

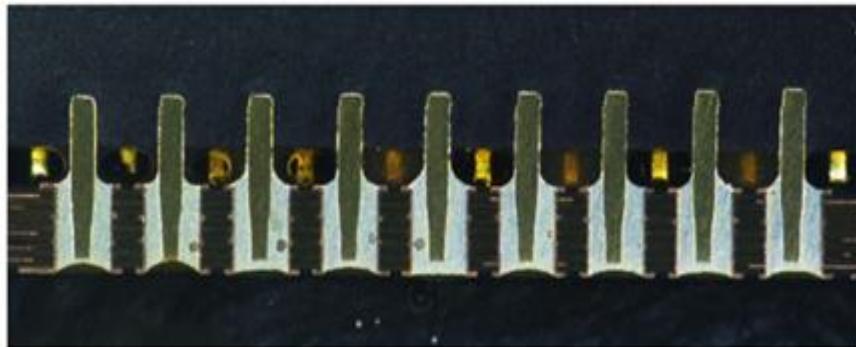
Ao analisar a figura , devemos ter uma atenção especial na formação de camadas intermetálicas refere-se às camadas de ligas metálicas que se formam na interface entre o material de solda e os materiais a serem unidos durante o processo

de soldagem. Essa camada intermetálica tem característica de estar dentro de um parâmetro aceitável encontrando o terminal direito em  $3.28 \mu\text{m}$  e o esquerdo em  $2.97 \mu\text{m}$ .

#### 5.2.1.4. JHDMI1

A imagem obtida por meio de um corte transversal em um conector HDMI com furos PTH (Plated Through-Hole) revela uma visão das conexões internas onde podemos identificar com clareza a estrutura dos furos metalizados PTH que atravessam a placa do conector mensurando as dimensões e a qualidade da solda. A qualidade e a integridade dessas conexões se tornam evidentes, permitindo a detecção de eventuais falhas, como irregularidades nas soldas ou presença de vazios. A figura 42 também proporciona informações valiosas sobre as dimensões e a disposição das conexões PTH, elementos essenciais para a transmissão confiável de sinais de alta definição e áudio em sistemas HDMI.

**Figura 42** – Terminais JHDMI1

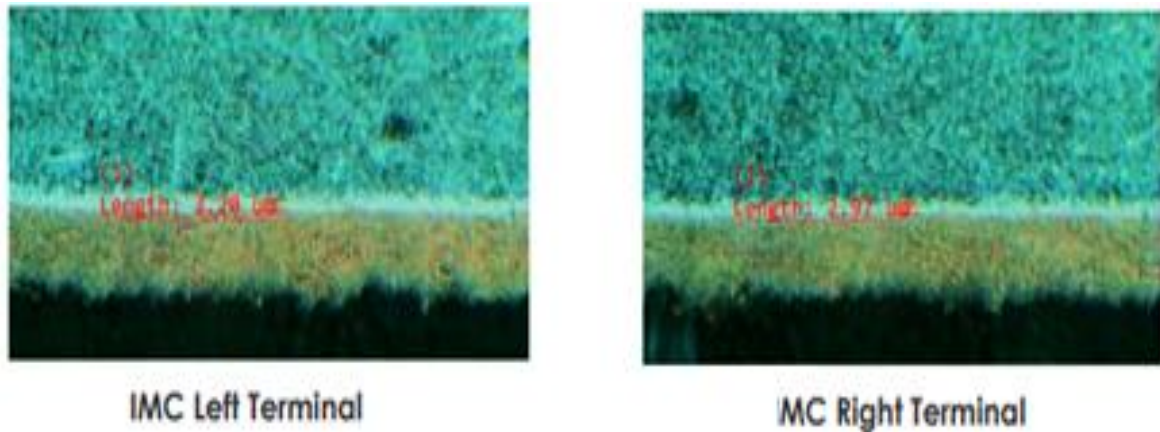


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

A soldagem mostrando uma estrutura homogênea e IMC contínuo. O preenchimento dos furos passantes é 100%. Ao analisar o IMC pode-se observar que o componente segue a norma de referência para a análise é a IPC-610 e considerando o contato entre a e o preenchimento do barril. Também devesse analisar a espessura controlada na figura 43 que está no lado direito  $3,20 \mu\text{m}$  e no lado esquerdo  $2,97 \mu\text{m}$  pois uma camada excessivamente espessa pode causar problemas, como fragilização da solda. A composição do IMC está dentro de limites aceitáveis. Considerando a adesão adequada como observamos o IMC aderiu firmemente tanto

ao material de solda quanto ao material de base para garantindo uma conexão sólida e confiável.

**Figura 43 – IMC JHDMI1**



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

Segundo a norma IPC -610 para garantir o funcionamento do componente aceitabilidade deve 75% do barril preenchido como mostra a figura 44. Isso contribui para garantir a qualidade e a confiabilidade dos conectores HDMI utilizados em dispositivos eletrônicos, assegurando que os consumidores desfrutem de uma experiência de áudio e vídeo impecável. O controle adequado do IMC ajuda a garantir que as soldas sejam duráveis e capazes de resistir a condições operacionais adversas.

**Figura 44 – Aceitabilidade JHDMI1**



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

### 5.2.2 LADO BOTTON

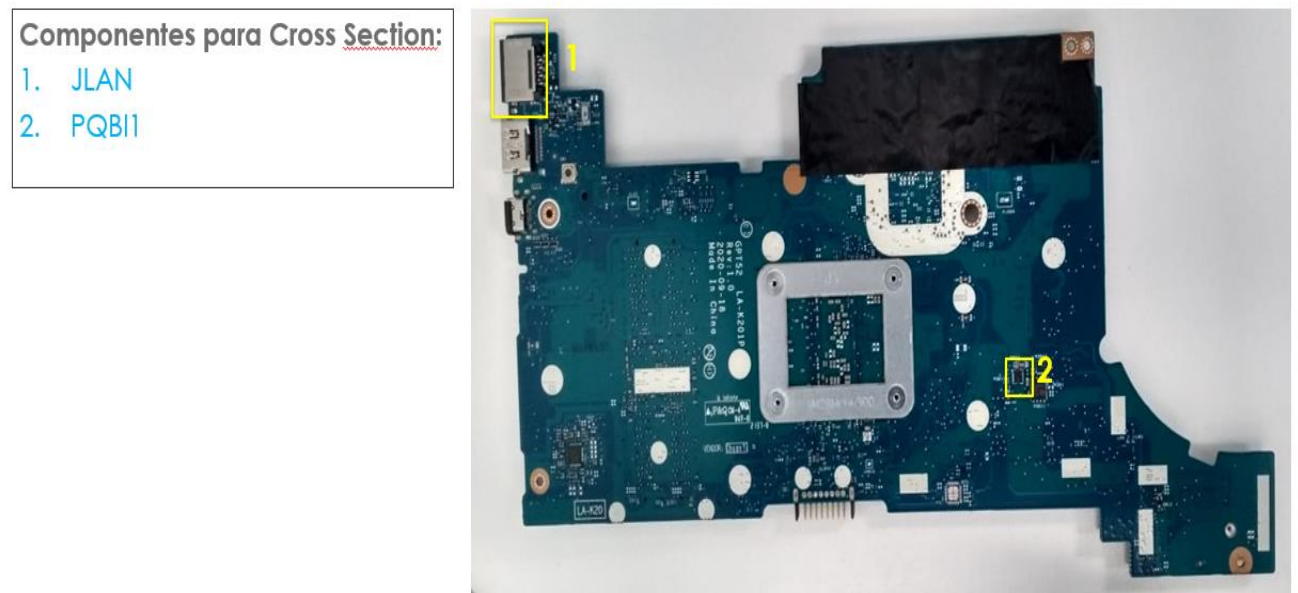
A priorização determinada para proposta de teste para o lado BOTTON figura 45, levando em conta que é uma técnica de análise metalográfica que permite examinar a qualidade das soldas e das interfaces entre os componentes na PCBA para análise foram escolhidas:

1. PQBI1 como os conectores de alimentação, USB ou HDMI, são cruciais para a funcionalidade do notebook. Verificar a qualidade das soldas e das interfaces de contato desses conectores é importante para garantir uma conexão confiável. Com intuito de avaliar a qualidade das conexões PTH e verificar a conformidade com as especificações e padrões através das análises das dimensões e a qualidade das soldas.
2. PQBL1 Um IC é um dispositivo que incorpora vários componentes eletrônicos (como transistores, resistores, capacitores) em um único chip de silício. Os ICs desempenham várias funções essenciais em uma placa de circuito. Nesse caso o IC é responsável pelas funções de microprocessadores e microcontroladores executam funções de processamento de dados. Eles são o cérebro de muitos dispositivos eletrônicos, controlando operações e executando algoritmos.



**Figura 45** – Proposta de teste Botton

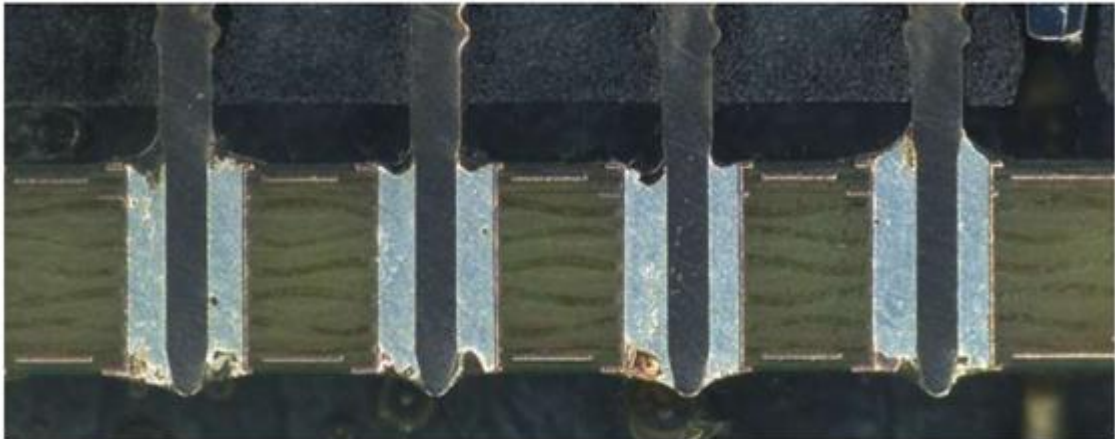
## Proposta de teste – Botton



**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

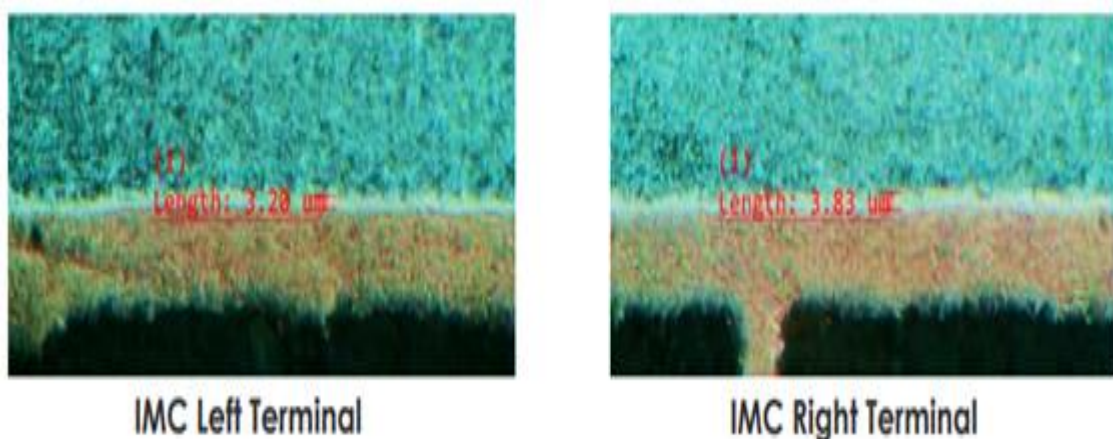
### 5.2.2.1 LAN

As imagens macroscópicas do corte transversal estão mostrando a primeira linha de terminais. com furos PTH revela uma visão conexões internas onde podemos identificar com clareza a estrutura dos furos metalizados PTH que atravessam a placa do conector mensurando as dimensões e a qualidade da solda. A soldagem mostrando uma estrutura homogênea e IMC contínuo. O preenchimento dos furos passantes é 98%. Levando em conta os dados encontrados verificados no cross section a análise do componente no corte transversal de acordo com os critérios de aceitabilidade apresentados na Figura 46, a qualidade e a integridade dessas conexões se tornam evidentes, permitindo a detecção de eventuais falhas, como irregularidades nas soldas ou presença de vazios. Essa imagem também proporciona informações valiosas sobre as dimensões e a disposição das conexões PTH, elementos essenciais para a transmissão confiável de sinais de alta definição e áudio em sistemas HDMI.

**Figura 46 – Corte JLAN**

**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

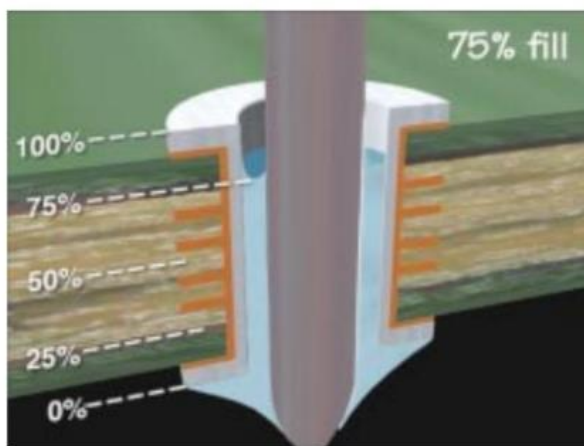
É possível afirmar que a junta soldada analisada foi encontrada em conformidade com as Normas IPC-A-610, portanto, pode ser disse que o processo de soldagem nos terminais atende aos conceitos internacionais de qualidade e considerando o contato entre a e o preenchimento do barril. Na figura 47 deve-se analisar a espessura controlada que está no lado direito 3,20 e no lado esquerdo 3,83 pois uma camada excessivamente espessa pode causar problemas, como fragilização da solda. A composição do IMC está dentro de limites aceitáveis. Considerando a adesão adequada como observamos o IMC aderiu firmemente tanto ao material de solda quanto ao material de base para garantindo uma conexão sólida e confiável.

**Figura 47 – IMC JLAN****IMC Left Terminal****IMC Right Terminal**

**Fonte:** Elaborado pelo autor,2024

A norma IPC-A-610 estabelece que os critérios devem ser superiores a 75% conforme figura 48 para o preenchimento do furo e assim para garantir que os furos sejam preenchidos adequadamente com solda. Isso é crucial para garantir uma conexão elétrica robusta e confiável entre as camadas do PCB. A conexão de solda que não estiver de acordo com os termos citados na tabela 3 será considerado defeito, pois os dados contidos na Tabela 3 é utilizado para as condições mínimas aceitáveis para os diferentes critérios.

**Figura 48** – Critérios de aceitabilidade preenchimento de furo



Aceitável - Classe 1,2,3

- Mínimo de 75% de enchimento. Máximo total de 25% de depressão, incluindo os lados secundário e primário é permitido.

Defeito - Classe 2,3

- O enchimento vertical do furo é inferior a 75%.

**Fonte:** IPC-A-610H

**Tabela 3** – Furos passantes metalizados com terminais de componentes, mínimas condições aceitáveis.

Critérios	Classe 1	Classe 2	Classe 3
A. A molhagem circunferencial no lado primário (lado de destino da solda) do terminal e barril	Não especificado	180°	270°
B. Enchimento vertical da solda <sup>2</sup>	Não especificado	75%	75%
C. Filete e molhagem circunferencial no lado secundário (lado de fonte de solda do terminal e barril <sup>3</sup>	270°	270°	330°
D. Porcentagem da área da ilha coberta com solda com molhabilidade no lado primário da solda (lado de destino da solda)	0	0	0
E. Porcentagem da área de ilha coberta cm solda com molhabilidade no lado secundário (lado de fonte da solda	75%	75%	75%

Nota 1. A molhagem se refere à solda aplicada pelo processo de soldagem.

Nota 2. A altura da 25% não preenchida inclui tanto as depressões do lado de destino como de fonte.

Nota 3. Também se aplica ao terminal e ilha dos furos não metalizados.

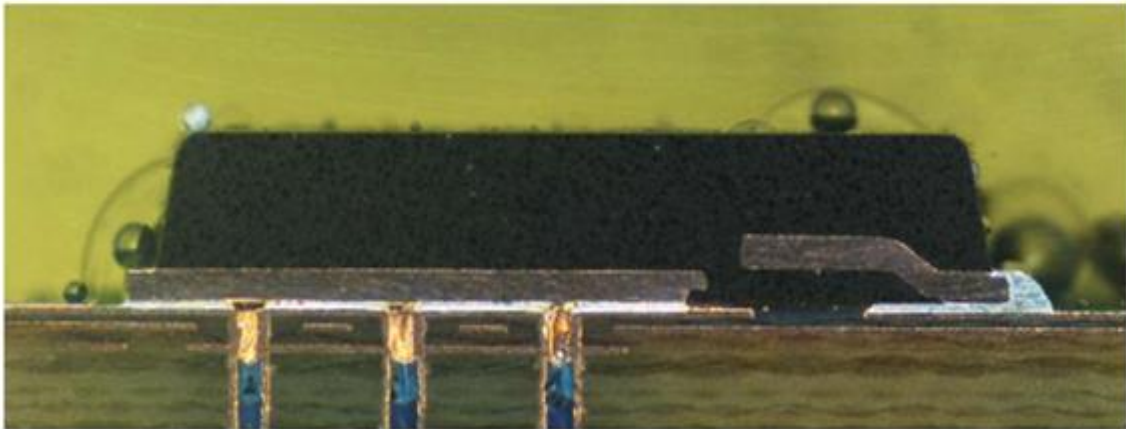
Nota 4. Também se aplica aos furos não metalizados.

**Fonte:** IPC-A-610H

#### 5.2.2.2 PQBL1

Na figura 49 podemos observar um IC chip encapsulado sem terminais é uma característica crucial para garantir o desempenho e a confiabilidade do dispositivo eletrônico. Nesse tipo de encapsulamento, o chip é revestido por um material que não possui pontos de conexão visíveis na superfície externa, tornando essencial a aplicação de técnicas avançadas de soldagem.

**Figura 49** – Cross section PQBL1

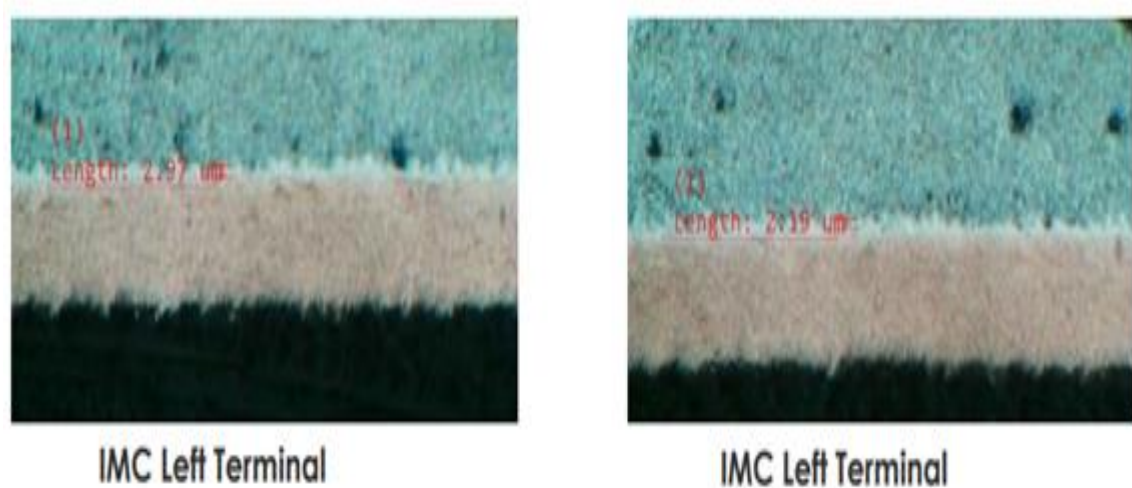


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Ao analisar o IMC pode-se observar que o componente segue a norma de referência para a análise é a IPC-610 e considerando o contato aceitável a solda não pode estar fazendo contato com o corpo do componente. Na figura 50 deve-se analisar a espessura controlada que está no lado direito 2,97  $\mu\text{m}$  e no lado esquerdo 2,19  $\mu\text{m}$ , pois uma camada excessivamente espessa pode causar problemas, como fragilização da solda. A composição do IMC está dentro de limites aceitáveis. Considerando a adesão adequada como observamos o IMC aderiu

firmemente tanto ao material de solda quanto ao material de base para garantindo uma conexão sólida e confiável.

**Figura 50 – IMC PQB11**



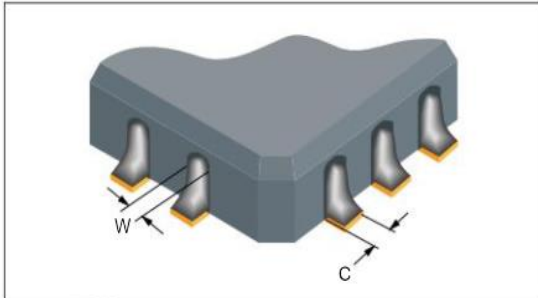
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

A IPC-A-610H reconhece que, em alguns casos, componentes, como os chips encapsulados sem terminais, podem ter características específicas relacionadas às terminações casteladas. É importante referenciar as especificações do componente e os desenhos do fabricante para determinar os requisitos específicos para esses casos. A Figura 51 mostra as características do aceitável e defeito. A norma destaca que as dimensões exatas e configurações específicas podem variar dependendo do projeto e das especificações do componente. Portanto, é crucial consultar as informações fornecidas pelo fabricante do componente ou pelas especificações do projeto.



**Figura 51** -Conjuntos pela tecnologia de montagem em superfície

12.2.4.3 Chip Encapsulado sem Terminais ("Leadless Chip Carriers") com Terminações Casteladas, Mínima Largura da Junta da Extremidade ("End Joint Width") (C)



Condição Alvo - Classe 1,2,3

- A largura da junta da extremidade (C) é igual à largura da castelação (W).

Aceitável - Classe 1,2

- A mínima largura da junta da extremidade (C) é 50% da largura da castelação (W).

Aceitável - Classe 3

- A mínima largura da junta da extremidade (C) é 75% da largura da castelação (W).

Defeito - Classe 1,2

- A largura da junta da extremidade (C) é inferior a 50% da largura da castelação (W).

Defeito - Classe 3

- A largura da junta da extremidade (C) é inferior a 75% da largura da castelação (W).

**Fonte:** IPC-A-610H

## 5.3 DYE PRY

### 5.3.1 PROPOSTA TOP

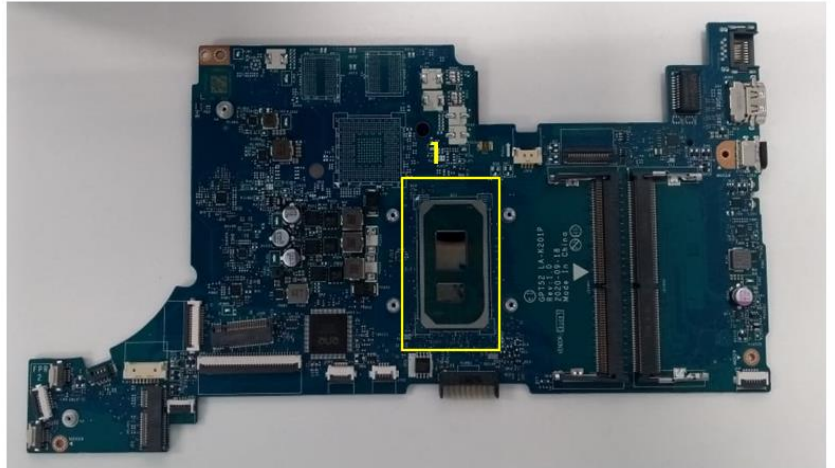
A imagem obtida por meio do teste de dye pry em um processador oferece uma visão intrincada das camadas internas do dispositivo, permitindo a detecção de potenciais falhas de encapsulamento e soldagem. Ao aplicar cuidadosamente um corante penetrante, em seguida, separar as camadas do encapsulamento, essa técnica revela detalhes sobre a qualidade das soldas, bem como a aderência das camadas de encapsulamento. A imagem resultante destaca áreas críticas onde podem ocorrer defeitos, como trincas, falhas de aderência ou inclusões, fornecendo uma análise precisa que é fundamental para a confiabilidade e o desempenho do processador em sistemas eletrônicos complexos. Na figura 52 mostra a proposta de teste para o lado TOP

**Figura 52** – Proposta de teste lado TOP

## Proposta de teste – Top

Componente para Dye Pry:

1. UCI BGA



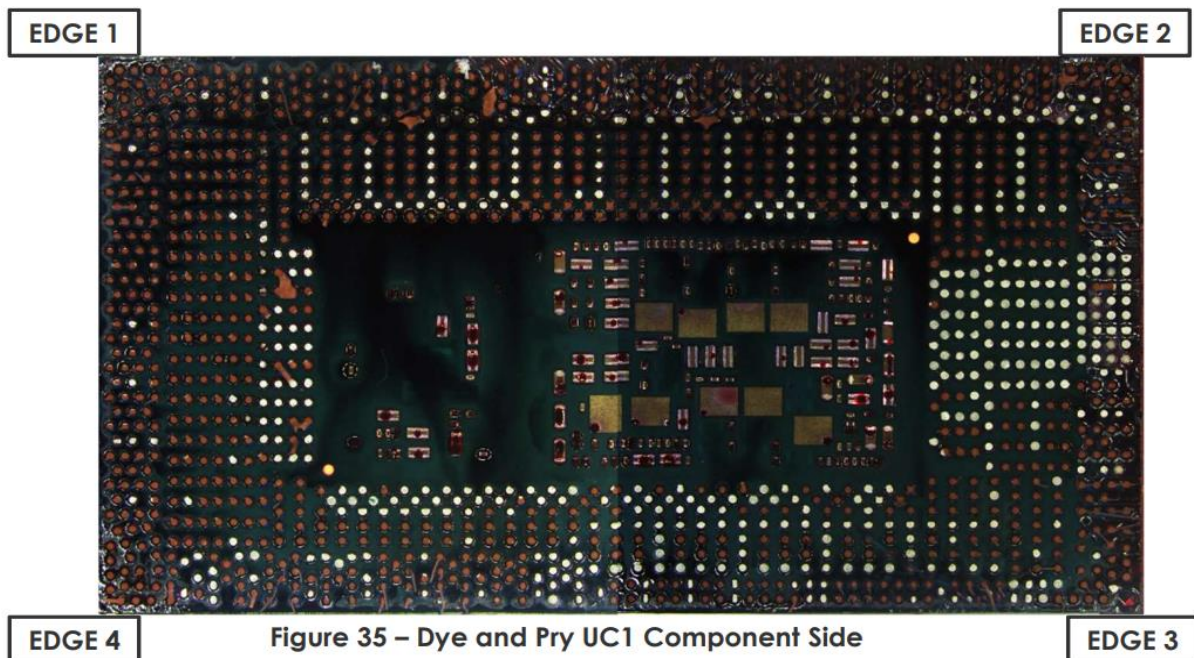
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

O componente escolhido para o teste é o processador Intel como pode ser observado na figura 53 que pode fornecer informações valiosas sobre a qualidade das soldas que conectam o processador à PCB. Isso pode ser particularmente importante em aplicações críticas em que a confiabilidade é essencial. É uma técnica de inspeção que pode ser usada para avaliar a integridade das ligações de solda entre um componente eletrônico, como um processador e PCB. No entanto, é importante observar que o resultado do teste dependerá das características específicas do processador Intel em questão, bem como das condições do teste e da qualidade das soldas. As informações que podem ser obtidas através do teste de "dye and pry" em um processador Intel:

1. Qualidade das Soldas: O teste de "dye pry" pode revelar a qualidade das soldas que conectam o processador à PCB. Ele pode ajudar a identificar possíveis problemas, como inclusões de solda, falta de fusão, trincas ou outras imperfeições nas soldas.
2. Conformidade com Padrões: O teste pode ser usado para verificar se as soldas do processador Intel atendem aos padrões de qualidade especificados pela indústria ou pela fabricante da PCB.

3. Avaliação de Processo: O resultado do teste pode ser usado para avaliar a qualidade do processo de soldagem, permitindo que os fabricantes identifiquem problemas em sua linha de produção e façam ajustes para melhorar a confiabilidade das conexões.
4. Detectar Possíveis Falhas: O teste de "dye pry" pode ajudar a identificar possíveis falhas nas soldas que podem afetar a confiabilidade do processador Intel, especialmente em condições de uso intensivo ou variações de temperatura.
5. Rastreamento de Problemas: Se um processador Intel estiver apresentando problemas de funcionamento intermitente ou falhas de componentes, o teste pode ser usado para verificar se as soldas são a causa desses problemas.

**Figura 53 - Dye pry UC1 Processador**



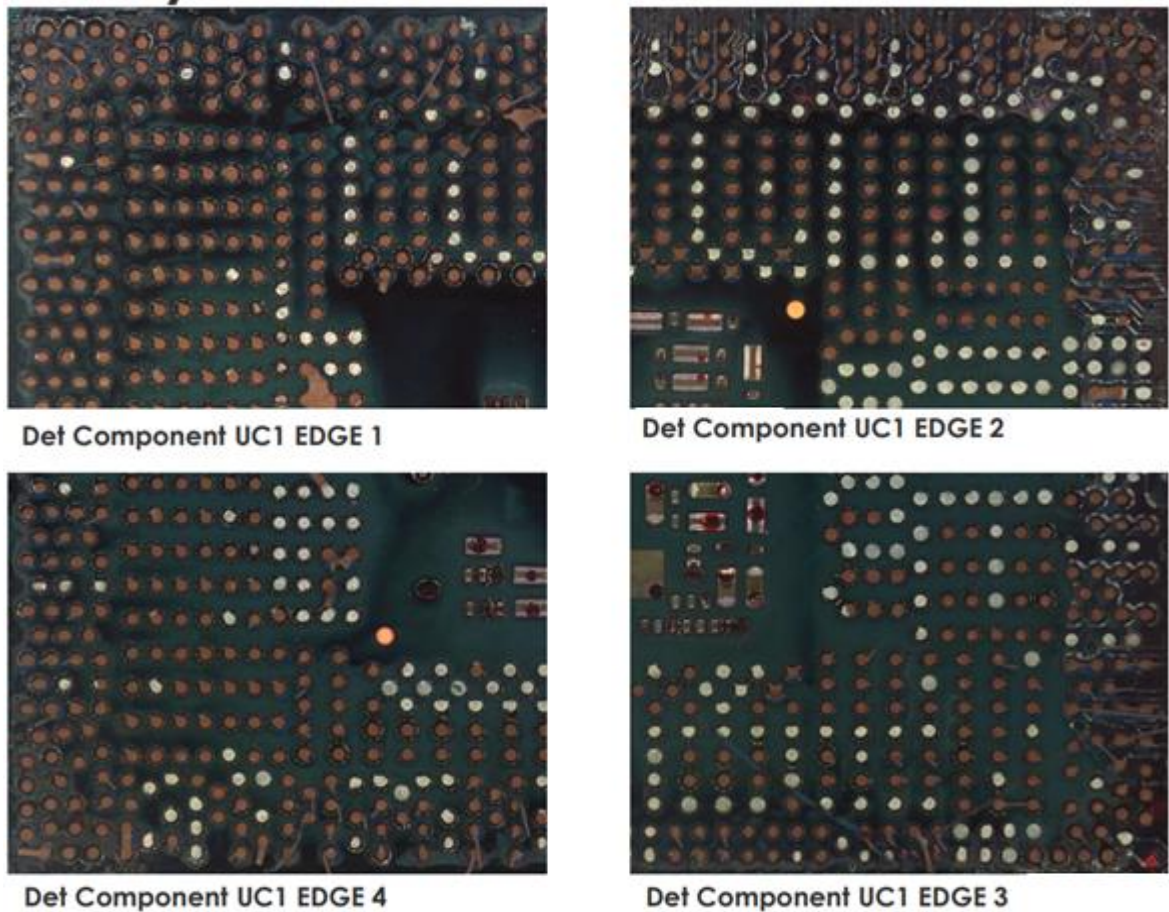
**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Além disso, a imagem obtida por meio do teste de dye pry não apenas identifica possíveis problemas, mas também fornece informações valiosas sobre a qualidade da fabricação e montagem do processador. Isso contribui para aprimorar a qualidade e a durabilidade dos processadores utilizados em dispositivos eletrônicos críticos, a figura 54 mostra os cantos do UC1 assegurando que os componentes estejam livres de defeitos que possam comprometer a integridade do sistema como



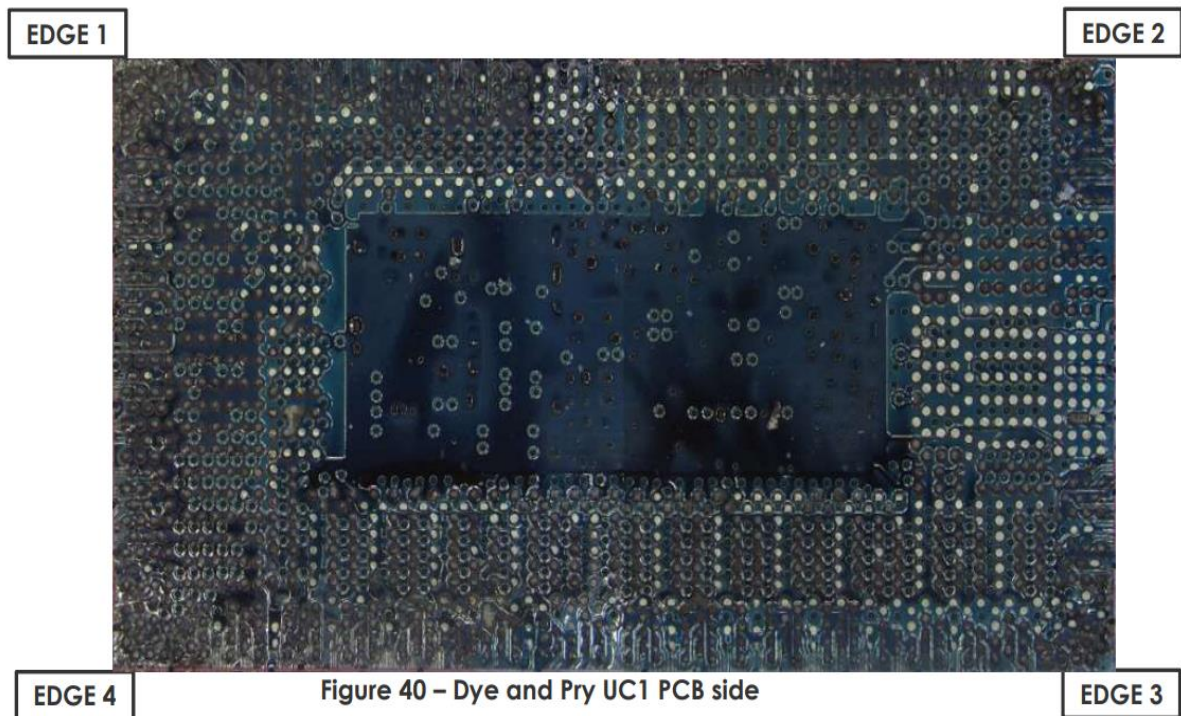
um todo, o que é especialmente importante em aplicações sensíveis, como eletrônicos industriais.

**Figura 54** - Dye pry cantos UC1 processador



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

Deve-se começar a análise por fazer um exame visual detalhado da imagem das soldas do processador com o auxílio de uma ampliação. Use um microscópio para ampliar a imagem e examinar as soldas com maior detalhe. Isso pode revelar problemas que não são visíveis a olho nu. O teste não deve se basear somente na observação em busca da penetração ou não do corante nas soldas, pode procurar por irregularidades visíveis, como trincas, bolhas, inclusões de solda, ou soldas que pareçam estar fora de alinhamento. Um passo importante na análise também é a iluminação e que esteja configurada de forma adequada para destacar qualquer característica suspeita nas soldas. A iluminação oblíqua ou lateral pode ser útil para realçar detalhes como na figura 55 onde olhamos a visão da PCBA.

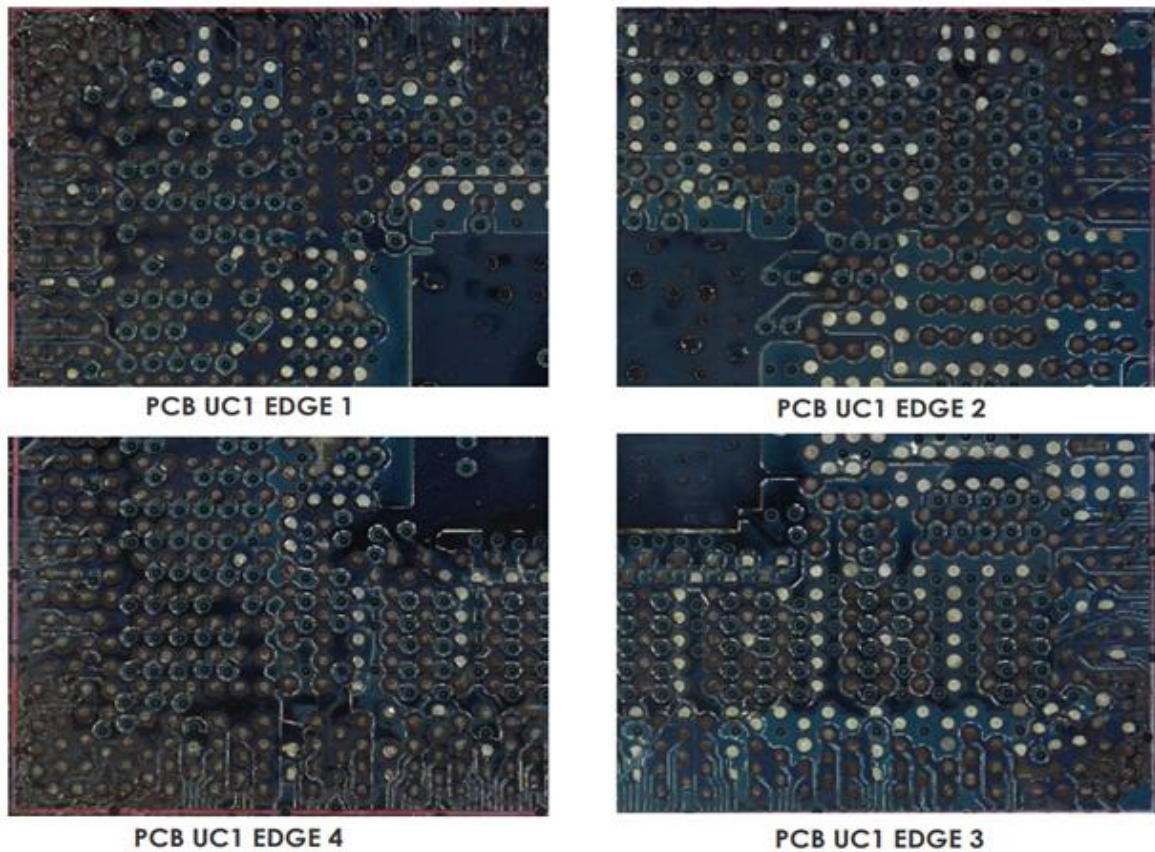
**Figura 55** – Visão PCBA área UC1 processador

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

A Figura 56 mostra o desempenho mais aproximado dos cantos com um zoom maior. As imagens macroscópicas do corte transversal estão mostrando a primeira linha, existem algumas imagens ao longo da primeira linha de bolas de solda (esquerda e certo). A junção entre o die de silício e o encapsulamento está em boas condições e não apresenta falhas visíveis. Isso indica uma boa qualidade no processo. Na imagem também conseguimos observar que não houve penetração de corante na junção entre o die e o encapsulamento, não foram observados defeitos visuais na junção e a junção entre o die e o encapsulamento permaneceu intacta e livre de falhas.



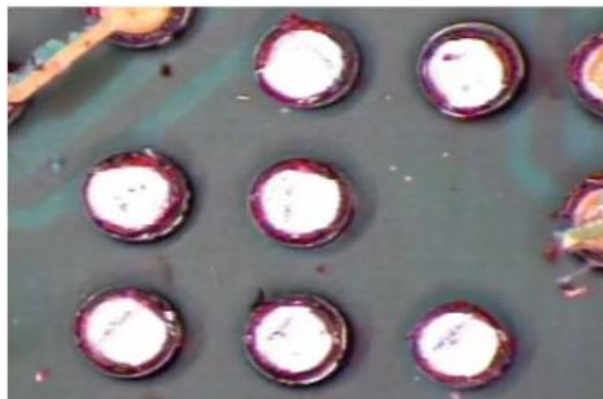
**Figura 56** - Dye pry cantos UC1 processador



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

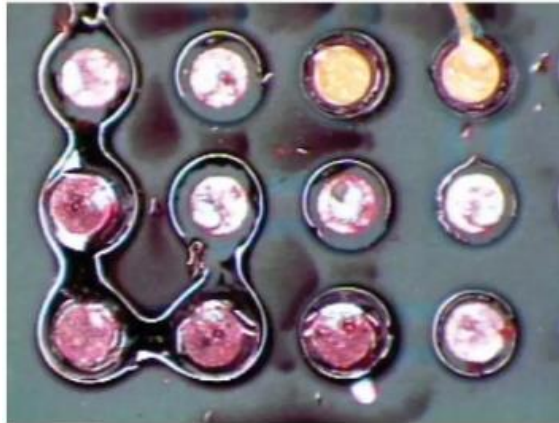
A norma IPC-7095 usam a comparação com padrões para análise e interpretação das imagens com soldas de boa qualidade como figura 57 ou com com defeito conforme mostra na figura 58. Embora a procura pela penetração do corante nas soldas seja o principal ponto a ser analisado deve-se também procurar por irregularidades visíveis, como trincas, rachaduras, bolhas, inclusões de solda, ou soldas que pareçam estar fora de alinhamento.

**Figura 57-** Balls sem penetração de tinta



**Fonte:** IPC-TM-7095

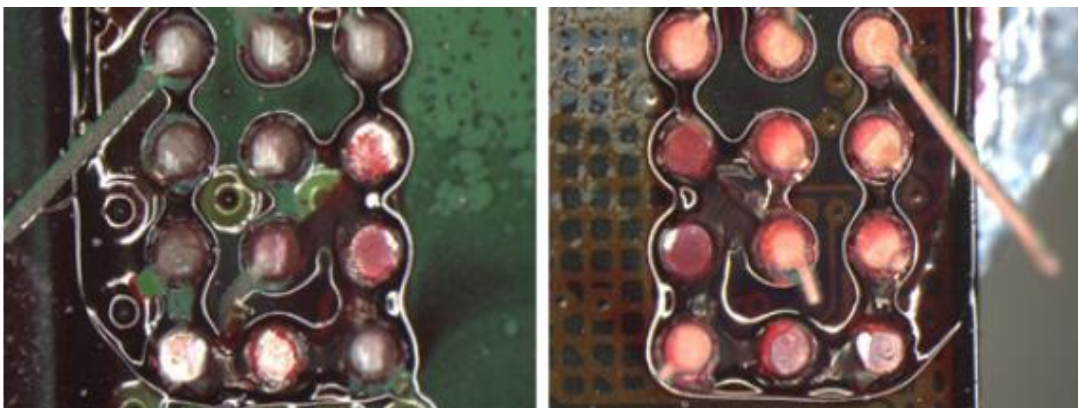
**Figura 58** – Ball que tem 80-100% de penetração de tinta que indica rachadura



**Fonte:** IPC-TM-7095

A figura 59 mostra rachaduras nas juntas de solda IMC da placa e elevações da almofada da placa (crateras). Juntas de solda BGA fraturadas são um defeito de acordo com IPC-A-610G, seção 8.3.12 . Terras Elevadas (Pad Cratering) são um defeito de acordo com IPC-A-610G, seção 10.3.2. Estas imperfeições ocorrem na interface entre os materiais de solda e os terminais do componente, onde a camada intermetálica é formada durante o processo de soldagem. O teste de Dye Pry revela com clareza a existência de rachaduras nessa região crítica, indicando uma falta de coesão e integridade estrutural na junta. Essas rachaduras podem resultar de variáveis como tensões térmicas, inadequada quantidade de fluxo de solda, ou inadequações no perfil térmico durante a soldagem. A identificação precoce dessas rachaduras é essencial, pois elas comprometem a durabilidade e a confiabilidade do componente ao longo do tempo, podendo levar a falhas prematuras.

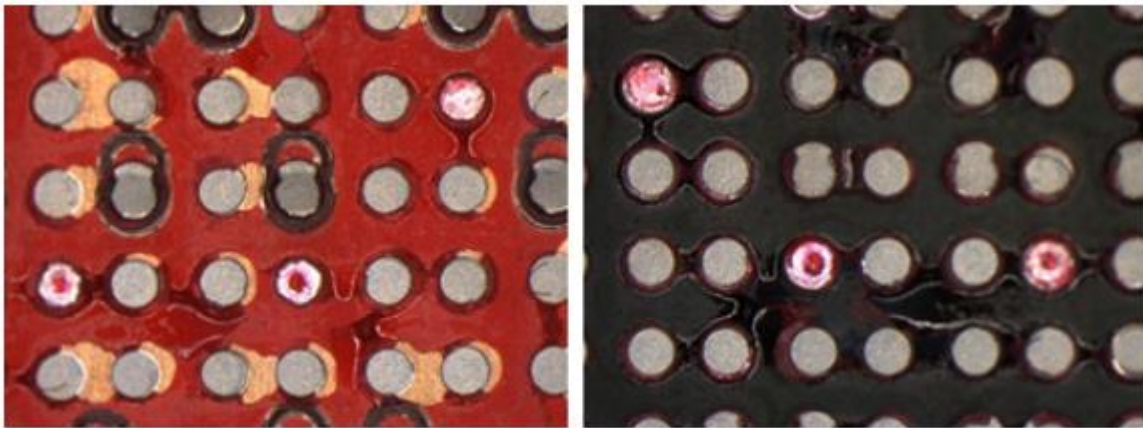
**Figura 59** - Rachaduras nas juntas de solda na camada intermetálica (IMC)



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

O defeito "Head in Pillow" é uma falha de soldagem que ocorre durante o processo de montagem de componentes eletrônicos, especialmente em dispositivos de alta densidade, como placas de circuito impresso (PCBs). Conforme mostra a figura 60 mostra 3 juntas de solda com uma cúpula lisa marcada com tinta vermelha, indicando defeitos "Head in Pillow". Essas juntas de solda (não contínuas) são Defeitos de acordo com IPC-A-610G, seção 8.3.12 . Durante o processo de soldagem, o calor aplicado pode resultar em uma solidificação inadequada da pasta de solda, levando a uma conexão parcial entre o componente e a placa.

**Figura 60** - Defeito "Head in Pillow"

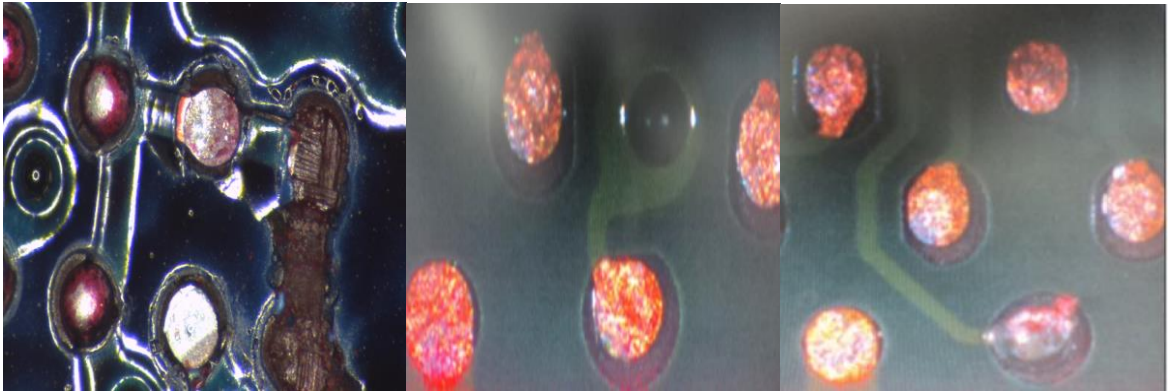


**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

O corante é capilarmente absorvido em qualquer fissura, trinca ou falha presente na solda ou no encapsulamento. Após a aplicação do corante, o excesso é removido, e uma camada de revelador é aplicada. O revelador absorve o corante e cria uma marca visível nas áreas onde ocorre a penetração do corante. Isso permite a detecção visual de quaisquer defeitos ou discontinuidades na região analisada como pode ser constatado na figura 61 a penetração da tinta no PAD. As seções transversais revelam que a fratura é predominantemente de natureza frágil e ocorre na interface entre a esfera de solda e o PCB. Muitas vezes, um modo de fratura misto é observado e o caminho da trinca muda do volume para a interface.



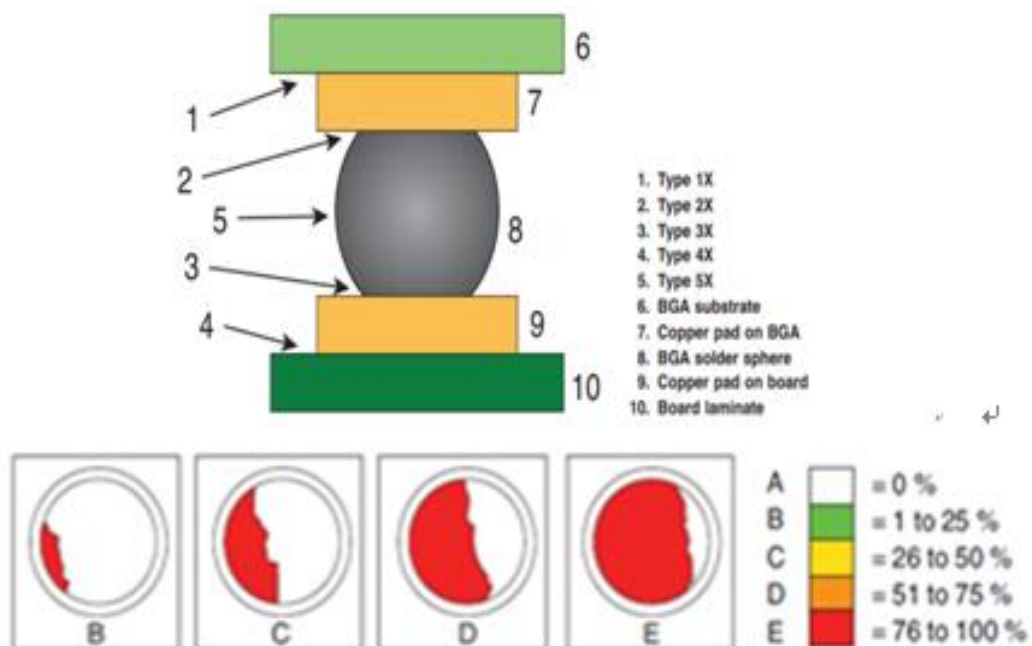
**Figura 61 - Falhas do teste dye pry**



**Fonte:** IPC-TM-650

A forma de classificação da fissura é regida pela norma IPC-TM-650 modelada com base na progressão típica observada em testes como na figura 62. Verifica-se que a resistência aumenta exponencialmente com a área da fissura como na figura 63. As demais combinações de materiais apresentam múltiplos modos de falha, sendo a parte intrínseca, entretanto, comparável para todos com a classificação com as letras de A a E.

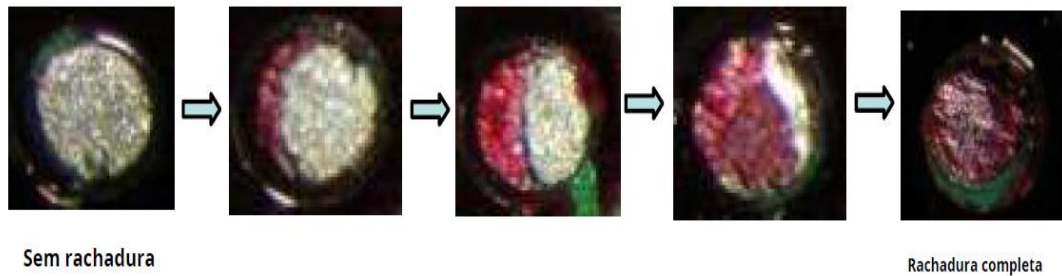
**Figura 62 - Classificações Dye pry**



**Fonte:** IPC-TM-650

Além das trincas no lado da placa de circuito impresso, muitas vezes se formam trincas menores no lado do componente, conforme mostrado na figura 63. Ao levar em consideração os dois tipos de trincas no modelo elétrico, verifica-se que o aumento na resistência devido às trincas no lado do componente é de natureza exponencial, assim como os aumentos devido à trinca no lado da PCB.

**Figura 63** - Classificações real teste de Dye pry



**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2024

A figura 63 revela de forma visualmente evidente a classificação citada na figura 62 das rachaduras nas juntas de solda na IMC identificadas por meio do teste de Dye Pry. A superfície da solda exibe claramente linhas de fratura, indicativas das falhas estruturais que comprometem a integridade da junta. Essas rachaduras, que aparecem como fissuras distintas na interface entre a solda e os terminais do componente, destacam-se de maneira proeminente, sugerindo uma inadequação na formação da camada intermetálica durante o processo de soldagem. A figura proporciona uma visão detalhada das falhas, permitindo uma avaliação precisa da extensão e distribuição dessas rachaduras, fatores cruciais para a determinação do impacto potencial nas propriedades elétricas e mecânicas da junta de solda. Essa representação visual fornece uma valiosa ferramenta para análise e diagnóstico, orientando a implementação de medidas corretivas no processo de fabricação e assegurando a qualidade e confiabilidade dos componentes eletrônicos.

## 6 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi capaz de identificar padrões defeituosos com tempo relativamente curto em comparação com as técnicas convencionais de correspondência de padrões. No entanto, o número de amostras usadas para teste e o fato de que o algoritmo de classificação foi considerado em cima das imagens previamente coletadas. A ferramenta foi implementada para verificar o desempenho da linha de produção e tomada de decisão rápida. O resultado atinge o objetivo do projeto de detecção de defeitos do dispositivo BGA.

O projeto do sistema de imagem e do sistema real foram concluídos, e a medição do defeito é realizada por software e a precisão do modelo depende inerentemente do desempenho da extração das fotos alimentadas. Os resultados experimentais indicam que a precisão da inspeção atinge as expectativas propostas. O sistema apresentado é caracterizado por resolução aceitável e estrutura flexível e é adequado para a maioria dos fabricantes de eletrônicos. Melhorando assim a atuação dos inspetores de qualidade e produção na detecção e análise dos defeitos.

Com base na análise dos resultados apresentados na pesquisa, é possível afirmar que o melhor método para aplicação na detecção de defeitos não visíveis, inserido no processo de fabricação de notebooks, melhorando na qualidade final do produto, porque o estudo de *cross section*, raio X e Dye Pry demonstraram que o processo de soldagem executado atende aos critérios de aceitabilidade das Normas Internacionais IPC, portanto, pode-se concluir que os testes realizados apresentam os defeitos de qualidade no processo de soldagem.

Conhecer a qualidade de seus processos é essencial, para que a empresa possa trabalhar para obter menores custos e melhores condições de competitividade, então, este artigo pôde demonstrar a importância da qualidade nos processos de soldagem de fabricação de placas de notebook e seus processos de fabricação.



Objetivos específicos	Cross section	Raio X	Dye Pry
<p>1. Identificar os fatores que colaboram para o aumento da taxa de falha.</p>	<p>Os defeitos de solda identificados pelos testes propostos a maioria deles acontece após a etapa de refusão, como os defeitos em componentes identificados (pseudo-junta, excesso de solda, solda insuficiente, solda de deslocamento e componentes elevado) conseguimos atuar nos fatores com mais rapidez e segurança como:            Condições de processo inadequadas: Parâmetros de soldagem mal ajustados, como temperatura, tempo de exposição dentro do forno e velocidade de resfriamento.            Qualidade dos materiais e componentes: Influenciar diretamente a qualidade das soldas quando não apresentam as características corretas ou qualquer contaminação na superfície das placas pode interferir na adesão adequada das soldas            Manuseio inadequado durante o processo: Qualquer dano físico ou contaminação durante o manuseio pode comprometer a integridade das soldas.</p>		
<p>2. Avaliar a capacidade de cada técnica metalográfica em identificar e caracterizar defeitos em materiais metálicos, tais como fissuras, trincas, inclusões e descontinuidades.</p>	<p>Com o auxílio de um microscópio utilizado para avaliar a microestrutura de uma dada amostra, em uma secção determinada, encontrando resultados como medidas de espessuras de camadas, presença de voids, curtos, trincas;</p>	<p>Realiza imagens capazes de análises de conexões de balls de BGA para presença de voids e trincas grandes, análise de componentes incapsulados ou embaixo de barreiras, não preenchimento de barris, interconexões e trilhas de placas de circuito.</p>	<p>Realizar análise defeitos de rupturas em superfícies, tais como fendas e trincas, que não são detectáveis a olho nu, através do ensaio com um líquido penetrante</p>
<p>3. Investigar anomalias do material nas diferentes microestruturas causadoras de perda da funcionalidade do produto.</p>	<p>Técnica utilizada para a realização para observação de qualquer tipo de solda, analisando a conformidade, profundidade da penetração, porosidade e a camada intermetálica, assim a identificação de falha prematura, a redução ou perda total da eficiência/funcionalidade do produto e problemas de isolamento térmico ou elétrico</p>	<p>Técnica amplamente utilizada para a realização ensaios não destrutivos, utilizada para observação de componentes com encapsulamento, analisando assim a redução ou perda total da eficiência/funcionalidade do produto</p>	<p>Técnica utilizada para a realização para observação de componente BGA com objetivo de garantir a integridade estrutural do produto, identificado fragilidade, se está suscetível a danos mecânicos, como quebras ou trincas e a redução ou perda total da eficiência/funcionalidade do produto</p>
<p>4. Demonstrar a análises de situações reais de defeitos em componentes industriais para demonstrar a utilidade prática das técnicas metalográficas na resolução de problemas e na prevenção de recorrência de defeitos.</p>	<p>Esta pesquisa foi capaz de identificar void, head in pillow e a conformidade do processo</p>	<p>Esta pesquisa foi capaz de identificar void, não preenchimento do barril e a conformidade do processo</p>	<p>Esta pesquisa foi capaz de identificar trinca através da penetração do líquido e a conformidade do processo</p>

## 7. IMPACTOS DA PESQUISA

### 7.1 ACADÊMICO

A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento na área de engenharia em indústria de eletroeletrônicos, fornecendo insights sobre a utilização de testes metalográficos na análise de causa raiz de defeitos em produtos manufaturados. Ao explorar diferentes técnicas como cross-section, dye pry e raio X, o estudo amplia o entendimento sobre a aplicabilidade dessas metodologias em ambientes industriais específicos, como o da fabricação de placas de computador. Além disso, a dissertação oferece uma oportunidade para a academia aprofundar o debate sobre testes de controle de qualidade e apresentar uma metodologia aplicada à metalografia na solução de problemas de produto e processo.

### 7.2 ECONÔMICO

A implementação dos testes metalográficos para análise de causa raiz de defeitos pode ter impactos significativos na economia da empresa de manufatura de placas de computador. Ao identificar e corrigir os problemas de qualidade de forma mais eficiente, a empresa pode reduzir custos relacionados a retrabalho, descarte de peças defeituosas e perda de reputação no mercado. Além disso, ao otimizar seus processos produtivos, a empresa pode aumentar sua produtividade e competitividade, resultando em benefícios econômicos a longo prazo.

### 7.3 SOCIAL

Nos países emergentes, como o Brasil, a melhoria da qualidade se mostra indispensável para garantir a qualidade de vida da população ao desenvolver produtos que atendam às necessidades dos indivíduos com a melhoria dos atributos de serviços prestados à sociedade. Produtos de melhor qualidade tendem a gerar maior satisfação entre os clientes, garantindo sua confiança na marca e promovendo uma relação mais duradoura. Além disso, ao reduzir a incidência de defeitos, a empresa pode evitar situações em que os consumidores tenham que lidar com produtos defeituosos, o que pode gerar frustração e insatisfação. Isso contribui para uma experiência do cliente mais positiva e fortalece a reputação da empresa no mercado.

## REFERÊNCIA

- ALMEIDA, C. M. V. B. DE *et al.* Substituição das soldas estanho-chumbo na manufatura: efeitos na saúde do trabalhador e no desempenho ambiental. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 1, p. 46–58, mar. 2013.
- ARELLANO, J. ET AL. Thermal Shadow Moiré to Cross-Section Correlation Study. **Proceedings SMTA International**, 2018.
- ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. **ASM handbook**. 7. ed. Materials Park: ASM Handbook, 2004.
- BAI, L.; YANG, X.; GAO, H. A Novel Coarse–Fine Method for Ball Grid Array Component Positioning and Defect Inspection. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 6, p. 5023–5031, jun. 2018.
- BARAJAS, L. G. *et al.* Stencil Printing Process Modeling and Control Using Statistical Neural Networks. **IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing**, v. 31, n. 1, p. 9–18, jan. 2008.
- BOIT, C. New physical techniques for IC functional analysis of on-chip devices and interconnects. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 1, p. 18–23, set. 2005.
- BOSCO, N.; SILVERMAN, T. J.; KURTZ, S. Climate specific thermomechanical fatigue of flat plate photovoltaic module solder joints. **Microelectronics Reliability**, v. 62, p. 124–129, jul. 2016.
- BRADLEY, E.; BANERJI, K. Effect of PCB finish on the reliability and wettability of ball grid array packages. **IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B**, v. 19, n. 2, p. 320–330, maio 1996.
- CAERS, J. F. J. *et al.* **A study of crack propagation in Pb-free solder joints under drop impact** 2008 58th Electronic Components and Technology Conference. **Anais...IEEE**, maio 2008
- CAMILO, E. **Propostas de design de layout da PCI para redução de curto circuito de solda a onda, para processo de montagem de placa eletrônica**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 29 maio 2015.
- CAVALCANTE, M. V. G. MINIMIZE-Método manual para redução de dimensões físicas, peso e dissipação de potência elétrica em sistemas eletrônicos. 2017.
- CHE, F. X.; PANG, J. H. L. Vibration reliability test and finite element analysis for flip chip solder joints. **Microelectronics Reliability**, v. 49, n. 7, p. 754–760, jul. 2009.
- CHEN, Y. *et al.* Failure mechanism of solder bubbles in PCB vias during high-temperature assembly. **Circuit World**, v. 39, n. 3, p. 133–138, 16 ago. 2013.
- CHLENOVA, A. A. *et al.* Nanostructured Magnetoimpedance Multilayers with Different Thickness of FeNi Components. **Solid State Phenomena**, v. 215, p. 342–347, abr. 2014.

- COLEMAN, W. Stencil Considerations for Miniature Components. **Proc of SMTA International**, 2009, 2009.
- COSTA, J. P. DE C. DA. **Desenvolvimento de sistema de irradiação por feixe de elétrons e sua aplicação na modificação de materiais semicondutores e não-metálicos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 8 fev. 2023.
- CURTIN, M. J.; FEENEY, T. B. **Paste printing optimization with dual squeegees and integral wiping system** Proceedings of Pan Pacific Symposium Conference, MA. **Anais...2005**
- DJURFORS, B. *et al.* Electrochemical oxidation of Mn/MnO films: formation of an electrochemical capacitor. **Acta Materialia**, v. 53, n. 4, p. 957–965, fev. 2005.
- DORO, M. M. **Sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- EBAYYEH, A. A. R. M. A.; MOUSAVI, A. A Review and Analysis of Automatic Optical Inspection and Quality Monitoring Methods in Electronics Industry. **IEEE Access**, v. 8, p. 183192–183271, 2020.
- ERINC, M.; SCHREURS, P. J. G.; GEERS, M. G. D. Intergranular thermal fatigue damage evolution in SnAgCu lead-free solder. **Mechanics of Materials**, v. 40, n. 10, p. 780–791, 2008.
- HAMLET, J. R.; MARTIN, M. T.; EDWARDS, N. J. **Unique signatures from printed circuit board design patterns and surface mount passives** 2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). **Anais...IEEE**, out. 2017
- HENDRICKX, N. *et al.* Tolerance Analysis for Multilayer Optical Interconnections Integrated on a Printed Circuit Board. **Journal of Lightwave Technology**, v. 25, n. 9, p. 2395–2401, set. 2007.
- HO TUCK MING; TAN KONG MING; KHOR, L. **Tombstone reduction by reflow profile optimization, SMT stencil design and pad design** 2010 34th IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium (IEMT). **Anais...IEEE**, nov. 2010
- HONG, L.-Y.; LI, Y.-T.; LI, H.-F. **Minimize Bottom Termination Component Voids by Board Assembly Process & Design Optimization** 2022 17th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). **Anais...IEEE**, 26 out. 2022
- HONGTAO MA *et al.* Isothermal Aging Effects on the Mechanical Shock Performance of Lead-Free Solder Joints. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, v. 1, n. 5, p. 714–721, maio 2011.
- HUANG, C. *et al.* The solder paste printing process: critical parameters, defect scenarios, specifications, and cost reduction. **Soldering & surface mount technology**, v. 23, n. 4, p. 211–223, 2011.

HWANG, J. S. **Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing**. 1st. ed. [s.l.: s.n.].

HYUN-JOONG KIM *et al.* A Biaxial Stretchable Interconnect With Liquid-Alloy-Covered Joints on Elastomeric Substrate. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 18, n. 1, p. 138–146, fev. 2009.

IŞILDAR, A. *et al.* Two-step bioleaching of copper and gold from discarded printed circuit boards (PCB). **Waste Management**, v. 57, p. 149–157, nov. 2016.

JAWAID, S.; FERGUSON, J. **Design evaluation and product reliability assessment using accelerated reliability fatigue life tests** Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No.00CH37055). **Anais...IEEE**, [s.d.]

JEONG, H. *et al.* Mechanical Reliability of Epoxy Sn–58wt.%Bi Composite Solder Under Temperature-Humidity Treatment with Organic Solderability Preservatives (OSP) Surface Finish. **Science of Advanced Materials**, v. 12, n. 4, p. 525–530, 1 abr. 2020.

KHADER, N.; YOON, S. W. Online control of stencil printing parameters using reinforcement learning approach. **Procedia Manufacturing**, v. 17, p. 94–101, 2018.

KIM, H.-J.; SON, C.; ZIAIE, B. A multiaxial stretchable interconnect using liquid-alloy-filled elastomeric microchannels. **Applied Physics Letters**, v. 92, n. 1, 7 jan. 2008.

KRAMMER, O. **Investigating the effect of squeegee attack angle on the solder paste pressure during stencil printing** 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). **Anais...IEEE**, maio 2015

KUO, C.-H. *et al.* Interfacial reaction and mechanical reliability of PTH solder joints with different solder/surface finish combinations. **Microelectronics Reliability**, v. 53, n. 12, p. 2012–2017, dez. 2013.

LACASSE, P. M.; OTIENO, W.; MATURANA, F. P. Predicting contact-without-connection defects on printed circuit boards employing ball grid array package types: a data analytics case study in the smart manufacturing environment. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 2, p. 156, 6 fev. 2020.

LALL, P. *et al.* Statistical Pattern Recognition and Built-in Reliability Test for Feature Extraction and Health Monitoring of Electronics Under Shock Loads. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, v. 32, n. 3, p. 600–616, set. 2009.

LAU, J. H. **Solder Joint Reliability: Theory and Applications**. 1st. ed. London: Newnes Publications, 1991.

LIU, A. *et al.* **X-ray inspection methods for controlling PCBA potting process — 2DX and partial angle computer tomography** 2016 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific). **Anais...IEEE**, jan. 2016

MAJCHER, K. *et al.* Methods of Protecting Buildings against HPM Radiation—A Review of Materials Absorbing the Energy of Electromagnetic Waves. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 5509, 3 dez. 2020.

MARTINEK, P.; KRAMMER, O. Analysing machine learning techniques for predicting the hole-filling in pin-in-paste technology. **Computers & Industrial Engineering**, v. 136, p. 187–194, out. 2019.

MEKONNEN, Y.; ABURBU, H.; SARWAT, A. Life cycle prediction of Sealed Lead Acid batteries based on a Weibull model. **Journal of Energy Storage**, v. 18, p. 467–475, ago. 2018.

MORAES, A. L. Otimização do processo produtivo de montagem de placas SMT. **Faculdade de Jaguariúna. Jaguaraina**, 2006.

MOURI, M. *et al.* **A study of using nonnegative matrix factorization to detect solder-voids from radiographic images of solder** 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). **Anais...IEEE**, jun. 2014

NUANPRASERT, S.; BABA, S.; SUZUKI, T. **A Simple Automated Void Defect Detection for Poor Contrast X-ray Images of BGA** The Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Application Engineering 2015. **Anais...The Institute of Industrial Applications Engineers**, 2015

OLIVEIRA, E. F. DE. Otimização do tempo de teste funcional de placa de circuito impresso montada para computador pessoal. 2012.

OLIVEIRA, G.; SILVA, J. Mapa de análise de falha dos ensaios do laboratório mecânico e metalográfico de uma empresa metalúrgica. 2023.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo: Hemus, 2006. v. 1

PENG, S.; NAM, H. DO. Void defect detection in ball grid array X-ray images using a new blob filter. **Journal of Zhejiang University SCIENCE C**, v. 13, n. 11, p. 840–849, 8 nov. 2012.

PINHEIRO, M. A.; BRACARENSE, A. Q. Crescimento de Camada Intermetálica na Soldagem por Fricção Rotativa de Alumínio e Aço, Assistida com Preaquecimento por Indução Eletromagnética. **Soldagem & Inspeção**, v. 26, 2021.

PINTO, R. H. DE M. **Avaliação da camada intermetálica em placas de circuito impresso com acabamento superficial HASL com diferentes processos de 81 soldagem**. Portugal: Universidade do Minho, 2015.

PRABAHARAN, G.; BARIK, S. P.; KUMAR, B. A hydrometallurgical process for recovering total metal values from waste monolithic ceramic capacitors. **Waste Management**, v. 52, p. 302–308, jun. 2016.

PUTTLITZ, K. J.; GALYON, G. T. Impact of the ROHS Directive on high-performance electronic systems: Part II: key reliability issues preventing the implementation of lead-

free solders. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 18, p. 347–365, 2007.

QASAIMEH, A.; LU, S.; BORGESSEN, P. **Crack evolution and rapid life assessment for lead free solder joints** 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). **Anais...IEEE**, maio 2011

RENBI, A.; DELSING, J. Reflection Phase Shift for PWB and PCBA Production Testing. **Journal of Microelectronics and Electronic Packaging**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 1 jan. 2012.

SAID, A. F. *et al.* Automated Void Detection in Solder Balls in the Presence of Vias and Other Artifacts. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, v. 2, n. 11, p. 1890–1901, nov. 2012.

SEO, W. *et al.* Void fraction of a Sn–Ag–Cu solder joint underneath a chip resistor and its effect on joint strength and thermomechanical reliability. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 30, n. 17, p. 15889–15896, 12 set. 2019.

SHABANY, Y. **Component size and effective thermal conductivity of printed circuit boards** Therm 2002. Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Cat. No.02CH37258). **Anais...IEEE**, [s.d.]

SHI, H.; UEDA, T. **Thermal cycling reliability of lead-free package stackable very thin fine pitch ball grid array assemblies with reworkable edge and corner bond adhesives** 2011 12th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. **Anais...IEEE**, ago. 2011

SHILOH, P. J.; MALBOEUF, J. How to Profile a PCB. **SMT SURF MOUNT TECHNOL MAG**, v. 14, n. 2, p. 3, 2000.

SIERVO, A. DE. **Determinação Estrutural de Ligas Metálicas de Superfície via Difração de Fotoelétrons**. Campinas: Universidade estadual de Campinas, 2002.

SONG, J.-D.; KIM, Y.-G.; PARK, T.-H. SMT defect classification by feature extraction region optimization and machine learning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 101, n. 5–8, p. 1303–1313, 17 abr. 2019.

SOUZA, K. P. DE. **A influência do Ferro e do óxido de Cério sobre a condutividade elétrica e a resistência à corrosão do Alumínio Anodizado**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 16 maio 2006.

SPOLAORE, P. *et al.* Relationship between bioleaching performance, bacterial community structure and mineralogy in the bioleaching of a copper concentrate in stirred-tank reactors. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 89, n. 2, p. 441–448, 3 jan. 2011.

TZ-CHENG CHIU *et al.* **Effect of thermal aging on board level drop reliability for Pb-free BGA packages** 2004 Proceedings. 54th Electronic Components and Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37546). **Anais...IEEE**, [s.d.]

- UHLMANN, I. R. Aplicacao De Ferramentas do Lean Manufacturing em um Processo de SMT: Estudo de Caso. **Universidade Federal do Para**, 2015.
- VASILYEV, F. The influence of the PCB design and the process of their manufacturing on the possibility of a defect-free production. **PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY**, v. 1, n. 3, p. 93–98, 1 mar. 2021.
- VIEIRA, A. DA S. *et al.* Analysis of quality hdmi connector component welding in mother board laptop. **ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)**, v. 1, n. 2, 2015.
- WANCHUN, T.; HUI, X.; CHAOHUI, L. **Application of strain test technology in PCBA process**2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). **Anais...IEEE**, ago. 2020
- WANG, Y.; WANG, M.; ZHANG, Z. Microfocus X-ray printed circuit board inspection system. **Optik**, v. 125, n. 17, p. 4929–4931, set. 2014.
- WASSINK, R. J. K. **Soldering in Electronics: A Comprehensive Treatise on Soldering Technology for Surface Mounting and Through-hole Techniques**. 2nd. ed. [s.l.] Electrochemical Publications Limited, 1989.
- WHITAKER, J. C. **Electronic Systems Maintenance Handbook**. 2nd ed ed. [s.l.] CRC Press, 2017.
- WILD, P. *et al.* Effect of voids on thermo-mechanical reliability of chip resistor solder joints: Experiment, modelling and simulation. **Microelectronics Reliability**, v. 85, p. 163–175, jun. 2018.
- XU, L. *et al.* Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples. **Materials Science and Engineering: A**, v. 435–436, p. 638–647, nov. 2006.
- XU, Y. *et al.* Effects of iron-carbon materials on microbial-catalyzed reductive dechlorination of polychlorinated biphenyls in Taihu Lake sediment microcosms: Enhanced chlorine removal, detoxification and shifts of microbial community. **Science of The Total Environment**, v. 792, p. 148454, out. 2021.
- YAMAMOTO, T.; TSUBONE, K. Assembly technology using lead-free solder. **Fujitsu scientific and technical journal**, v. 43, n. 1, p. 50–58, 2007.
- YOUSAF, M.; IQBAL, J.; AJMAL, M. Variables affecting growth and morphology of the intermetallic layer (Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>). **Materials Characterization**, v. 62, n. 5, p. 517–525, maio 2011.
- ZHOU, B. *et al.* Crack Development in a Low-Stress PBGA Package due to Continuous Recrystallization Leading to Formation of Orientations with [001] Parallel to the Interface. **Journal of Electronic Materials**, v. 39, n. 12, p. 2669–2679, 29 dez. 2010.
- ZHOU, Z. *et al.* Failure Analysis of Printed Circuit Board Solder Joint under Thermal Shock. **Coatings**, v. 13, n. 3, p. 572, 7 mar. 2023.