

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DA ENGENHARIA METALÚRGICA**

**Estudo sobre envelhecimento de soldas Sn/Pb**

Said Salomão Neto

São Paulo  
2019

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DA ENGENHARIA METALÚRGICA**

**Estudo sobre envelhecimento de soldas Sn/Pb**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Graduação em Engenharia.

Said Salomão Neto

Orientador: Eduardo Franco de Monlevade

Área de Concentração:  
Engenharia Metalúrgica

São Paulo  
2019

**Catalogação-na-Publicação**

**Neto, Said Salomão**

Estudo sobre envelhecimento de soldas Sn/Pb / S. Salomão Neto – São Paulo, 2019.

32 p.

Orientador: Prof. Eduardo Franco de Monlevade.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia Metalúrgica.

1. Solda. 2. Chumbo. 3. Envelhecimento I. Universidade de São Paulo.  
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica.

## Resumo

Nesse trabalho, foi realizado um estudo da microestrutura das bolas de solda Pb-Sn de celulares com mais de 10 anos de uso, avaliando as condições de operação da solda. Foram verificados o avanço da camada intermetálica, a formação de bolhas no interior das bolas de solda devido ao encapsulamento de fluxantes durante o procedimento de solda e a presença e desenvolvimento de trincas, bem como seu caminho de propagação. A microestrutura encontrada nas bolas de solda de celulares comuns se encontrava em melhor estado do que nas bolas de solda de smartphones, o que pode sugerir uma possível diferença nas condições de trabalho da solda dos diferentes aparelhos.

**Palavras-chave:** Solda, Chumbo, Envelhecimento

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de celular Nokia2610 (Canumalla & Viswanadham, 2014)	12
Figura 2 – Processador, com bolas de solda já fixadas para posterior fixação a uma placa de circuito integrada. (Canumalla & Viswanadham, 2014).....	13
Figura 3 – Simulação de elementos finitos, apresentando o conjunto placa de circuito integrado – solda – chip. (Li et al., 2019) adaptada.....	14
Figura 4 – Gráfico de aquecimento do conjunto placa de circuito integrado – solda – chip. (Canumalla & Viswanadham, 2014) .....	14
Figura 5 – Microestrutura de uma bola de solda recém soldada (Sn-3.8%Ag-0.7%Cu).(Eduardo Franco De Monlevade & Peng, 2007) .....	16
Figura 7 – Microestrutura de uma bola de solda envelhecida por 200h a 150°C (Sn-3.8%Ag-0.7%Cu) (Eduardo Franco De Monlevade & Peng, 2007).....	17
Figura 8 – Amostra, expondo o conjunto placa de circuito integrado – solda – chip já embutido.....	19
Figura 9 – Amostra finalizada, pronta para estudo. ....	19
Figura 10 – Picos de difração por EDS.....	21
Figura 11 – Aspecto geral amostra, estrutura chip-solda-placa 50x .....	22
Figura 12 – Capacitor de placas paralelas 100x.....	23
Figura 13 – Fio de ouro resolução 200x .....	23
Figura 14 – Bola de solda – Micrografia MEV – 750x.....	24
Figura 15 – Defeito estrutural bola de solda, formação de bolhas no interior da bola de solda 100x.....	25
Figura 16 -- Defeito estrutural bola de solda, formação de bolhas no interior da bola de solda 500x.....	25
Figura 17 – Bola de solda integra. 200x .....	27
Figura 18 – Bola de solda com fratura. 200x .....	28
Figura 19 – Bola de solda com fratura. 500x .....	28
Figura 20 – Bola de solda com descolamento parcial. 500x .....	29

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Espectro e grau de portabilidade de diversos equipamentos eletrônicos (Canumalla & Viswanadham, 2014) .....	10
--	----

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	7
2	OBJETIVO .....	8
3	REVISÃO LITERATURA.....	9
3.1	Estudo De Impacto Dos Aparelhos Microeletrônicos .....	9
3.1.1	Possível definição de portabilidade.....	9
3.2	Componentes De Um Celular .....	11
3.2.1	Composição geral de um celular.....	11
3.2.2	Placa de circuito impresso .....	12
3.3	Categoria E Classificação Da Solda .....	12
3.4	Crescimento De Intermetalílico .....	15
4	METODOLOGIA .....	18
4.1	Seleção Das Amostras.....	18
4.2	Preparação Da Amostra.....	18
4.3	Análise Química .....	20
4.4	Registro Da Superfície Da Amostra .....	20
5	RESULTADOS.....	21
5.1	Caracterização Química Do Material .....	21
5.2	Caracterização Geral Do Material .....	21
6	CONCLUSÕES .....	31
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da indústria eletrônica, vive-se hoje (2019), uma era em que bens de consumo eletrônico são extremamente popularizados, expondo nossa sociedade a diversos materiais. Entre eles, destaca-se a importância das soldas para fixação de componentes microeletrônicos em conjunto com placas de circuitos impressos.

Com o intuito de gerar proteção contra certas substâncias nocivas, a União Europeia adotou a diretiva RoHS, restringindo, entre outros, o uso das soldas Sn/Pb a partir de 01 de julho de 2006.

Nos anos seguintes, seja devido à adoção do padrão europeu ou por desenvolver legislação restritiva semelhante, a sociedade moderna passou a requisitar em escala global a restrição do Pb em componentes eletrônicos, desencadeando um processo de transição da composição química de soldas utilizadas em componentes microeletrônicos.

Nesse ambiente, onde a substituição de um material é exigida em um curto intervalo de tempo, levantam-se questões sobre o desempenho a longo prazo do material, seu processo de envelhecimento e em qual estágio de degradação se encontra no fim da sua vida útil.

Para que possamos responder a essas perguntas devemos acompanhar a presença e evolução de alguns mecanismos de degradação tais como: a evolução da camada de intermetálico, as consequências da contaminação de cobre nas estruturas de chumbo-estanho e a presença de bolhas no interior das gotas de solda, entre outros.

## 2 OBJETIVO

Com base nos pontos levantados, este trabalho tem como objetivos:

- 1) Fazer uma breve caracterização da estrutura das placas de circuito de dispositivos eletrônicos quanto aos seus vários componentes e características de construção;
- 2) Buscar amostras que ainda contenham a composição Sn/Pb, registrar suas microestruturas em seu final de vida, pontuando possíveis defeitos encontrados, assim como avaliar qualitativamente as condições operacionais da solda.

### 3 REVISÃO LITERATURA

#### 3.1 Estudo De Impacto Dos Aparelhos Microeletrônicos

Em “Portable Consumer Electronics Packaging, Materials and Reliability” por Sridhar Canumalla e Puligandla Viswanadham (Canumalla & Viswanadham, 2014) é discutido o fenômeno de penetração social que a tecnologia eletrônica portátil descreveu na sociedade, tendo como seu utilitário de maior destaque o aparelho celular, peça que trouxe a integração digital para o cotidiano da humanidade.

A velocidade de assimilação social do aparelho celular convencional, seguido por suas versões smartphone é espantosa, mesmo competindo com o já instalado sistema de telefonia fixa. Atualmente, os aparelhos celulares dominam o mercado mundial apesar de oferecerem uma relação muito desfavorável de custo por minuto de ligação.

É importante também ressaltar o impacto que a portabilidade desses aparelhos apresenta nos critérios de decisão do consumidor moderno, suprindo necessidades pré-existentes à sua chegada, tais como a possibilidade de comunicação instantânea independente de sua localidade, mas também permitindo a criação de novas manifestações sociais, como o surgimento das mídias sociais e até mesmo revolucionando o método de ação de instituição clássica, vivido na radical intensificação de coletas de dados, uma vez que a imersão no ambiente digital é realizada em caráter pessoal as práticas de coletas de dados atingiram um patamar completamente novo quanto a profundidade e especificidade de suas pesquisas.

Por esses e por outros diversos motivos hoje a manufatura de consumo de eletrônico é a indústria que mais cresce no mundo, não dando sinais de desaceleração.

##### 3.1.1 Possível definição de portabilidade

Sridhar Canumalla e Puligandla Viswanadham (Canumalla & Viswanadham, 2014) tentam através da Equação (1) a seguir avaliar o grau de portabilidade (P) dos aparelhos eletrônicos disponíveis no mercado.

$$P = \frac{T \times U^I}{w} \quad (1)$$

Onde:

- $T$  = tempo de uso do aparelho após uma carga;
- $U^I$  = classe de portabilidade, sendo 1 para usados dentro de espaços fechados e 5 para qualquer espaço;
- $w$  = peso do componente.

Aplicando essa métrica Sridhar Canumalla e Puligandla Viswanadham conseguiram relacionar os dados apresentados na Tabela 1 a seguir, onde pode-se analisar o espectro de utilitários eletrônicos, assim como seu grau de portabilidade.

**Tabela 1 – Espectro e grau de portabilidade de diversos equipamentos eletrônicos**  
(Canumalla & Viswanadham, 2014)

Produto	Peso (g)	T (horas)	$U^I$	P
Laptop 17"	3,311	2	1	0,00060405
Laptop 15"	3,084	6	1	0,00194553
Laptop 12"	1,497	9	1	0,00601202
DVD player	1,225	6	1	0,00489796
Netbook	1,134	5,25	1	0,00462963
Câmera Digital (SLR)	690	650 fotos	5	0,04347826
Leitores Digitais (E-reader)	625	10	1	0,016
4.5" UMPC	499	2	1	0,00400802
Celular mobile grande	499	2	5	0,13574661
Vídeo projetor portátil (MEMS)	220	1.5	1	0,00681818
GPS portátil	210	2	5	0,04761905
Tablet com internet	193	6	1	0,03108808
MP3 player	139	36	5	1,29496403
Câmera Digital	135	200 fotos	5	0,03703704
Smartphone	133	10	5	0,37593985
Media player portátil	104	9	5	0,43269231
Fone de ouvido BT	12	11	5	4,58333333

Nesta tabela, é possível observar o intervalo de variação dos smartphones, desde celulares maiores com portabilidade  $P = 0,13574661$  até smartphones mais compactos com portabilidade  $P = 0,37593985$ . Ou seja, dentro de uma mesma categoria de consumíveis eletrônicos encontramos uma relação de aumento de portabilidade de até, aproximadamente, três vezes. Isso indica que mesmo que a categoria smartphone tenha encontrado sua forma em questão de dimensão, a variação de peso dos seus componentes e de autonomia de cada aparelho demonstram que esse equipamento ainda está se desenvolvendo, impulsionando a indústria de peças e componentes microeletrônicos.

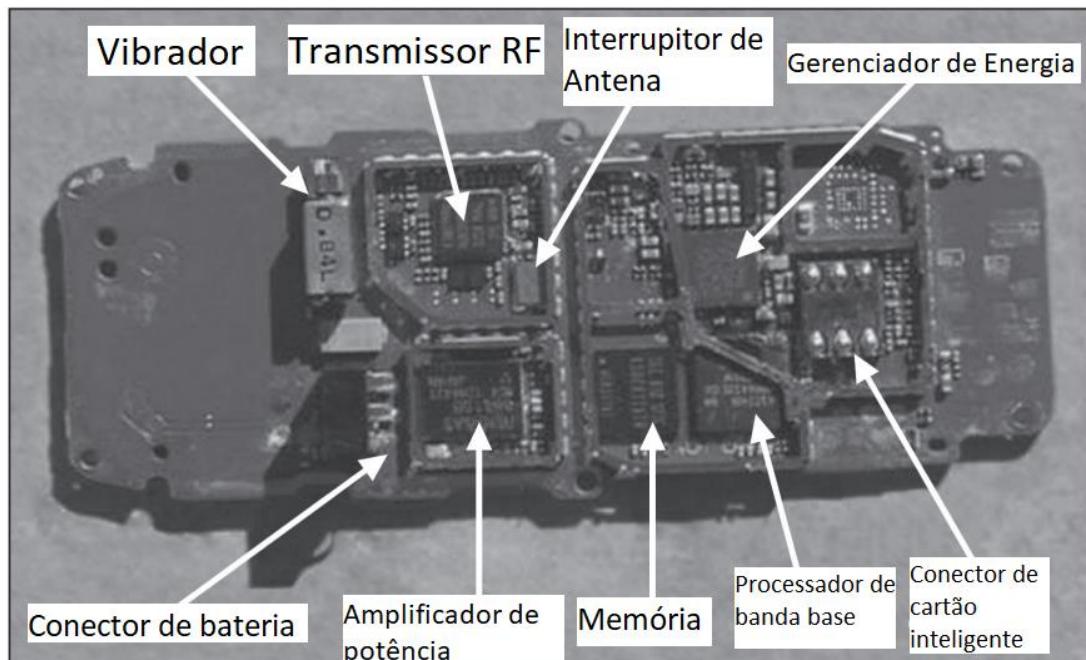
### **3.2 Componentes De Um Celular**

#### **3.2.1 Composição geral de um celular**

Para melhor descrever um aparelho celular, pode-se separar as suas partes básicas em três categorias:

- Radiofrequência: Categoria que reúne os dispositivos que permitem a operação do sinal, sendo responsáveis pela transmissão e recepção dos sinais do aparelho celular.
- Interface usuário: Constitui as vias de comunicação entre o usuário e o aparelho. É composta basicamente por teclado, já ausente em diversos smartphones, e monitor.
- Banda principal: É constituída principalmente pelo gerenciador de energia, memória e microprocessador, entre outros.

Na Figura 1 a seguir é possível observar a estrutura de um celular Nokia 2610 desmontado.



*Figura 1 – Estrutura de celular Nokia2610 (Canumalla & Viswanadham, 2014)*

### 3.2.2 Placa de circuito impresso

Como peça central da montagem do celular está a placa de circuito impresso, que tem como principal função a conexão de componentes do aparelho, tais como processador, memória, resistores e capacitores.

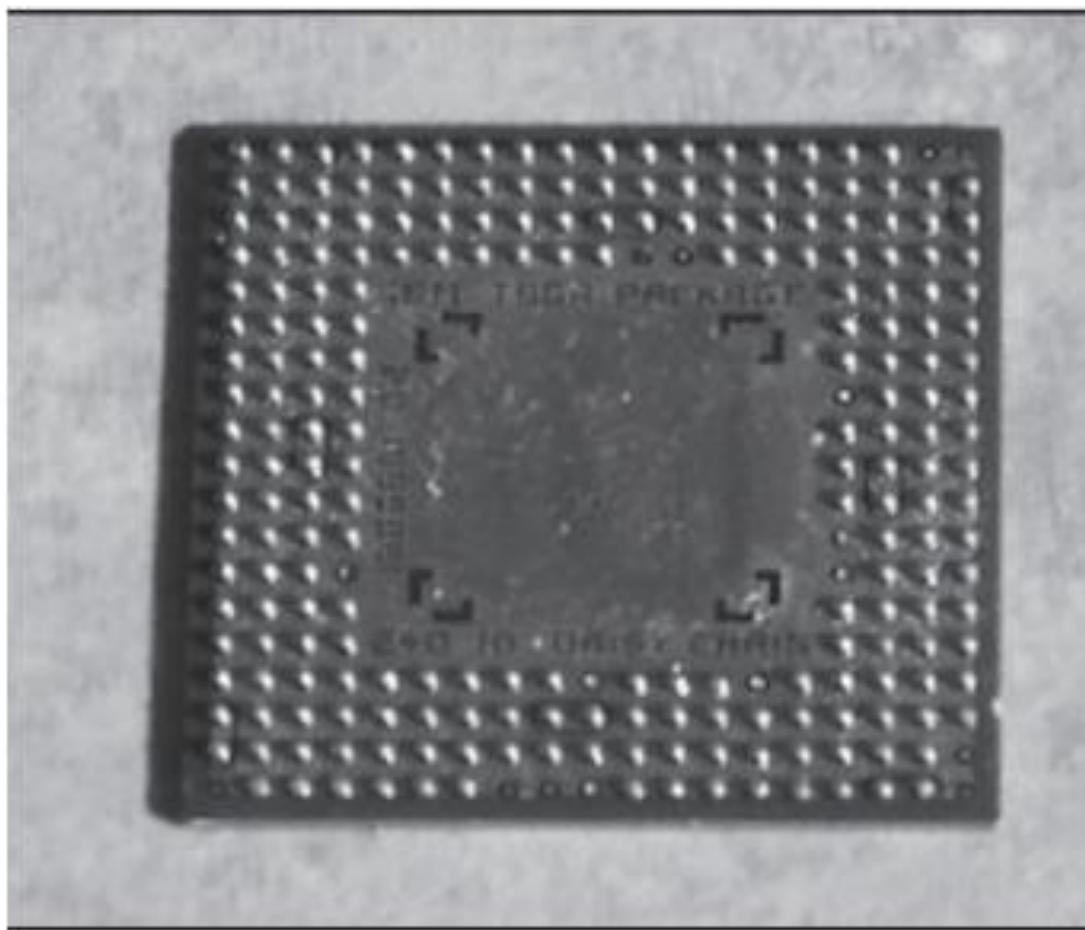
As placas de circuito impresso podem assumir diversas composições a fim de se ajustarem às necessidades dos componentes a serem conectados. Para se referir à composição de uma placa de circuito impresso utilizamos o modelo de nomenclatura “xSyP”, onde x se refere ao número de camadas de sinal e y se refere ao número de camadas de energia. Completando a composição da placa de circuito impresso estão as placas base, placas térmicas e as chamadas “preparei”, que são formadas por camadas constituídas de um tecido de vidro impregnado com resina orgânica apropriada e desempenham a função de isolamento elétrico entre as demais camadas.

### 3.3 Categoria E Classificação Da Solda

Atualmente o processo de soldagem mais utilizado na indústria é a interconexão por ligas metálicas, que consiste na adição de uma liga metálica

que será fundida a fim de estabelecer uma ligação metálica em seu processo de solidificação entre as partes que devem ser unidas.

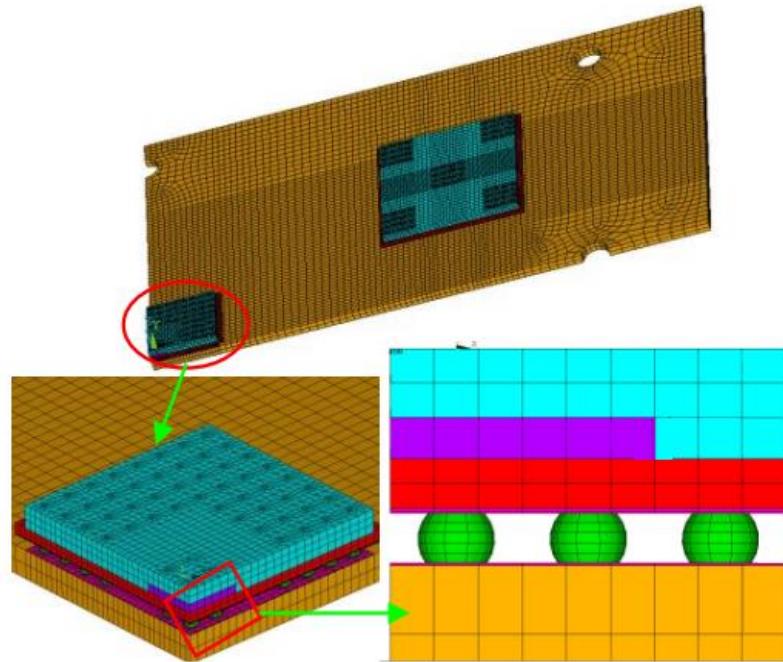
No ramo de microeletrônica foi desenvolvida a técnica BGA (ball-grid array), com o objetivo de superar os limites de superfície de conexão, possibilitando o aumento do número de terminais de ligação entre o chip e a placa de circuito integrado. Esse procedimento é uma evolução das técnicas de soldagem no perímetro externo, sendo executada através da adição de bolas de solda na superfície inferior do componente a ser fixado. Com o auxílio de um soprador de ar quente, as esferas de solda se fundem e aderem os receptores do componente.



*Figura 2 – Processador, com bolas de solda já fixadas para posterior fixação a uma placa de circuito integrada.* (Canumalla & Viswanadham, 2014)

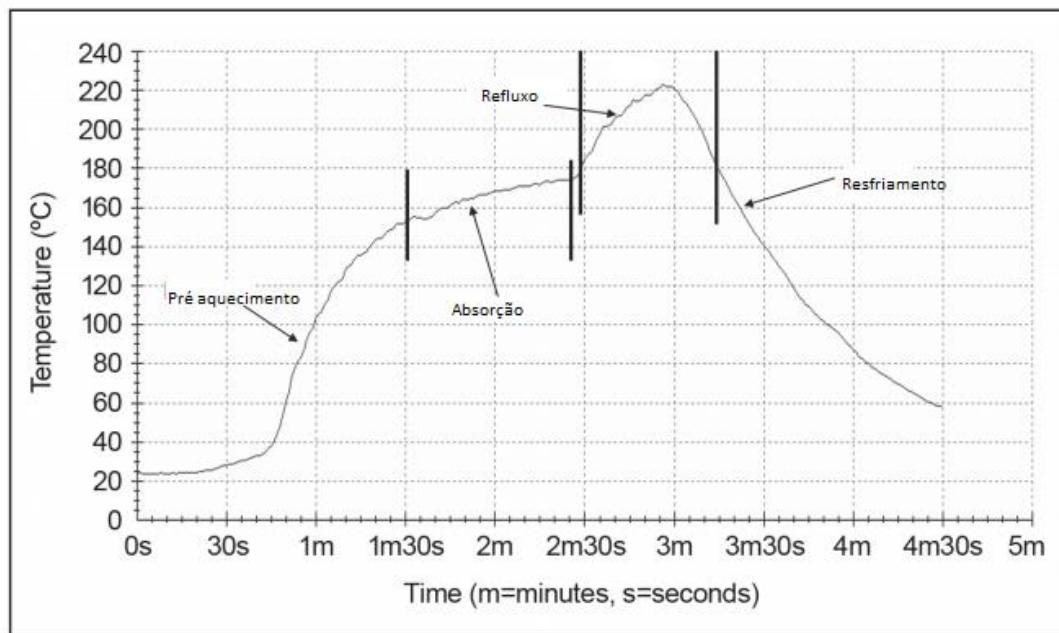
Uma vez que as esferas foram aderidas ao componente, o conjunto é sobreposto aos receptores da placa de circuito impresso, como mostrado na

Figura 3 (Li, Li, Zhang, Chen, & Liu, 2019), e então é iniciado um novo processo de aquecimento.



**Figura 3 – Simulação de elementos finitos, apresentando o conjunto placa de circuito integrado – solda – chip.** (Li et al., 2019) adaptada

O processo de aquecimento do conjunto apresenta uma curva característica, que pode ser observada no gráfico a seguir (Figura 4).



**Figura 4 – Gráfico de aquecimento do conjunto placa de circuito integrado – solda – chip.** (Canumalla & Viswanadham, 2014)

O processo de soldagem leva poucos minutos para ser realizado e possui intervalos bem definidos. Ele se inicia através de um lento processo de aquecimento denominado pré-aquecimento (Preheat), em cujo intervalo o conjunto é levado da temperatura ambiente para temperaturas próximas de 150°C.

Então o fluxante começa a agir, molhando todas as superfícies e reduzindo os óxidos presentes nas superfícies dos metais, de forma a gerar conectores de metais puros. O aquecimento é ainda mais lento nessa região devido a sensibilidade da pasta de solda, que pode vir a secar se for mantida a temperaturas elevadas por um longo período. Essa etapa é denominada etapa de absorção (Soak), sendo mantida entre 150°C ~180°C de 30s a 90s de duração. (Anjard, 1984)

A etapa crítica do processo é a etapa de Reflow, onde um pico de aquecimento é imposto, forçando a temperatura do conjunto acima da temperatura de líquido da solda, em torno de 210°C a 225°C. Essa temperatura é mantida de 30s a 60s, garantindo assim que todos os conectores sejam fundidos localmente, assegurando a formação de uma ligação metálica.

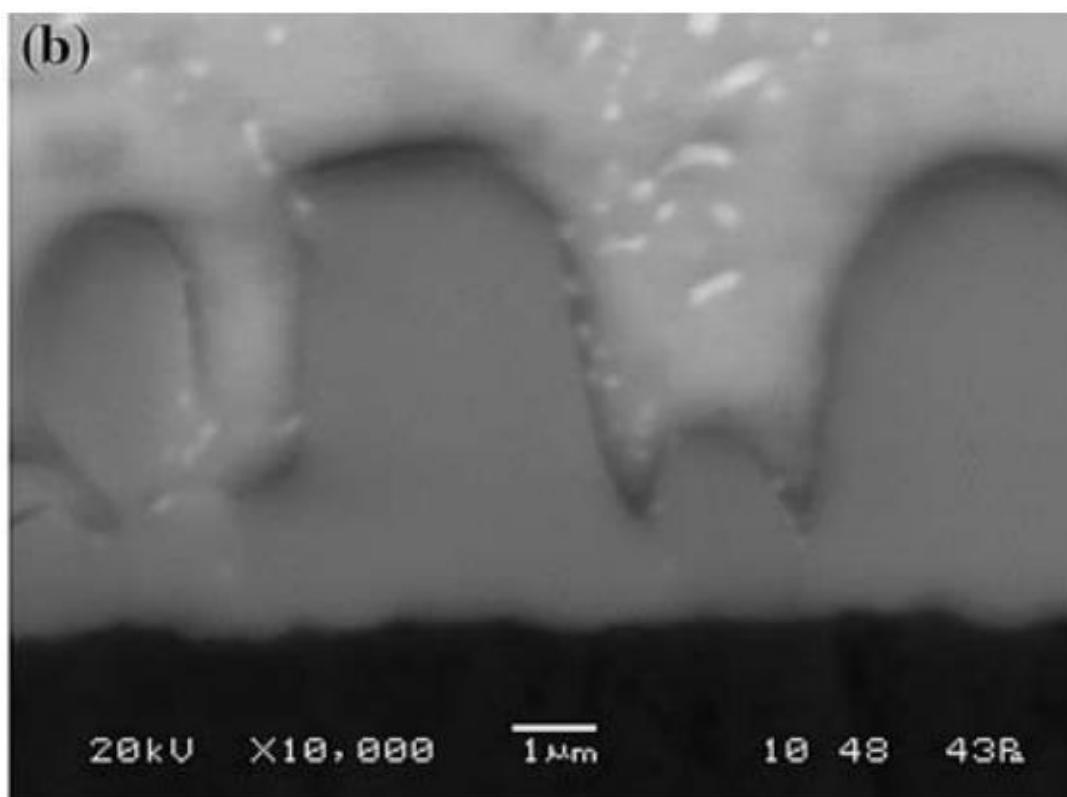
Por fim, tem início a etapa de resfriamento (Cool). Nessa fase a taxa de resfriamento é mantida abaixo de 4°C/s, a fim de evitar a retenção de tensões de resfriamento. A taxa de resfriamento ideal auxilia na formação de grãos mais finos, garantindo uma melhor propriedade mecânica aos componentes.

### 3.4 Crescimento De Intermétálico

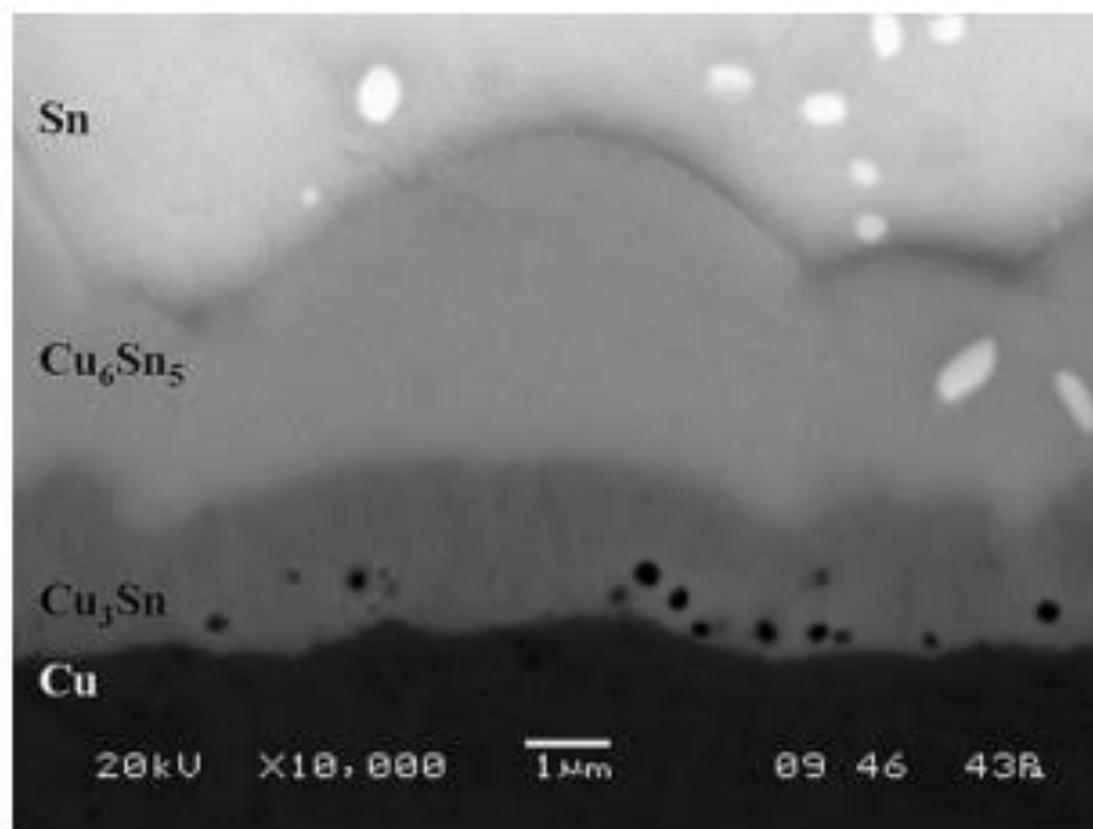
Em seu trabalho "Failure Mechanisms and Crack Propagation Paths in Thermally Aged Pb-Free Solder Interconnects" (Eduardo Franco De Monlevade & Peng, 2007) Eduardo Franco de Monlevade e Weiqun Peng realizam um estudo relacionando o envelhecimento de soldas Pb-Free com a redução de desempenho das soldas no teste de queda.

Comparando as micrografias da superfície de fratura de uma amostra envelhecida pós teste de queda Figura 6, com a superfície de uma bola de

solda recém soldada Figura 5, foi possível notar que o caminho de propagação de trincas ocorre preferencialmente através da camada intermetálica e que a intensidade da temperatura bem como o tempo de exposição à temperaturas elevadas influenciam no avanço da camada intermetálica, pois favorecem a difusão de Cu, provenientes dos conectores da placa de circuito integrado, na matriz de Sn das bolas de solda.(Peng, Monlevade, & Marques, 2007)



**Figura 5 – Microestrutura de uma bola de solda recém soldada (Sn-3.8%Ag-0.7%Cu). (Eduardo Franco De Monlevade & Peng, 2007)**



*Figura 6 – Microestrutura de uma bola de solda envelhecida por 200h a 150°C (Sn-3.8%Ag-0.7%Cu) (Eduardo Franco De Monlevade & Peng, 2007)*

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Seleção Das Amostras

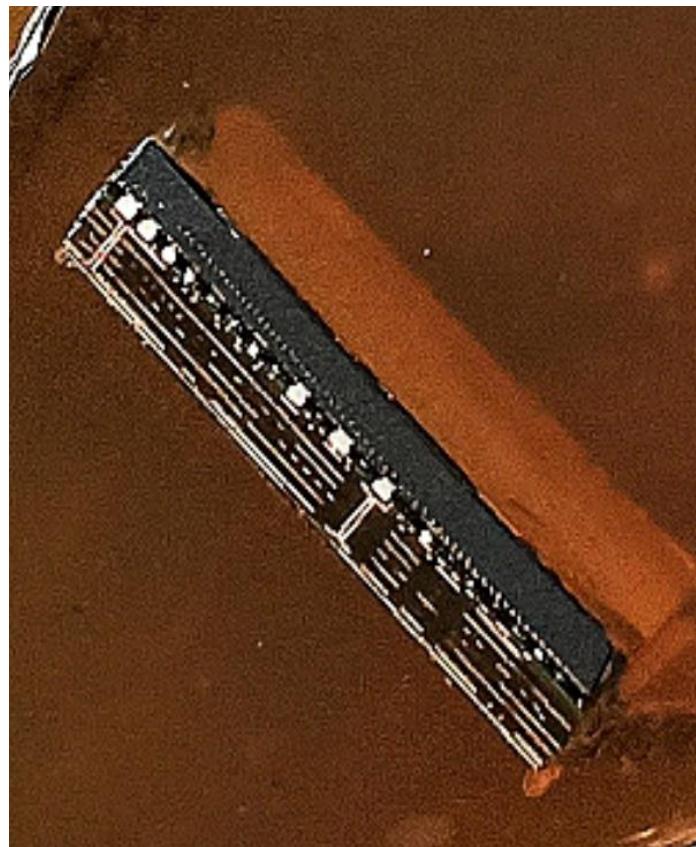
Visando selecionar amostras que se aproximem das condições operacionais dos aparelhos celulares mais modernos, as que já demonstrassem sinais de envelhecimento, foram selecionados para a fase experimental desse trabalho aparelhos celulares que entraram no mercado aproximadamente no ano de 2007 e que estivessem próximos às datas limites de substituições.

Assim, foram selecionados para realização do estudo dois celulares que atendiam aos parâmetros estabelecidos.

### 4.2 Preparação Da Amostra

Para que fossem preparadas as amostras a serem analisadas, os aparelhos foram abertos mecanicamente de forma a expor a placa de circuito. Em seguida, o chip foi destacado do restante da placa através do uso de uma serra, obtendo-se assim um conjunto chip-solda-placa.

Para análise, as amostras retiradas da placa precisaram ser embutidas em resina polimérica para observação de sua secção transversal. Uma vez que o ponto de fusão das soldas é bem baixo (182°C para as soldas Sn-Pb, e 217°C para as soldas Sn-3,7Ag-0,5Cu), é necessário que o embutimento seja feito a frio de forma a evitar a fusão das soldas, assim como a ocorrência de danos microestruturais causados pela alta temperatura. É possível observar um conjunto já embutido para análise na Figura 7 a seguir.



**Figura 7 – Amostra, expondo o conjunto placa de circuito integrado – solda – chip já embutido.**

A amostra foi submetida à um processo de pré-lixamento (lixa 1200mm), sendo posteriormente embutida com resina Poliéster Orto-Tereftálica (L120), que passou pelo processo de cura a frio. (Figura 7).



**Figura 8 – Amostra finalizada, pronta para estudo.**

Em seguida, a superfície da amostra foi lixada progressivamente até lixa 600, tendo o tratamento de sua superfície finalizado com polimento de 3  $\mu\text{m}$  até 1  $\mu\text{m}$  (Figura 8).

#### **4.3 Análise Química**

A análise da composição química das amostras foi realizada por Espectroscopia por energia dispersiva (EDS) no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de marca Fei, modelo Inspect f50.

#### **4.4 Registro Da Superfície Da Amostra**

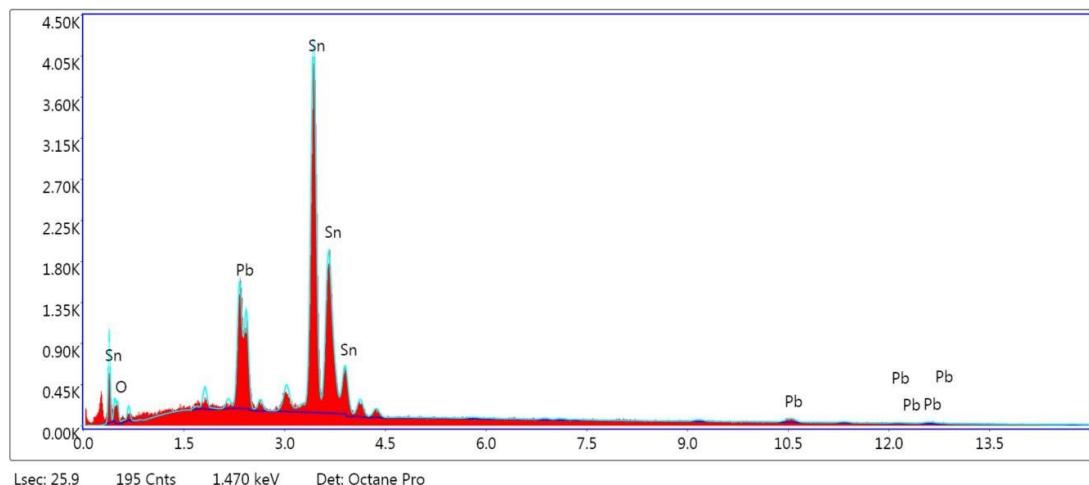
As superfícies das amostras foram fotografadas ao microscópio óptico, de marca Zeiss, modelo Axio Scope A1.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Caracterização Química Do Material

A caracterização do material se inicia pela confirmação da composição química da solda. Através do exame de Espectroscopia por energia dispersiva (EDS), realizado no Microscópio Eletrônico de Varredura (Figura 9), foi possível observar os picos de chumbo e estanhos destacados.

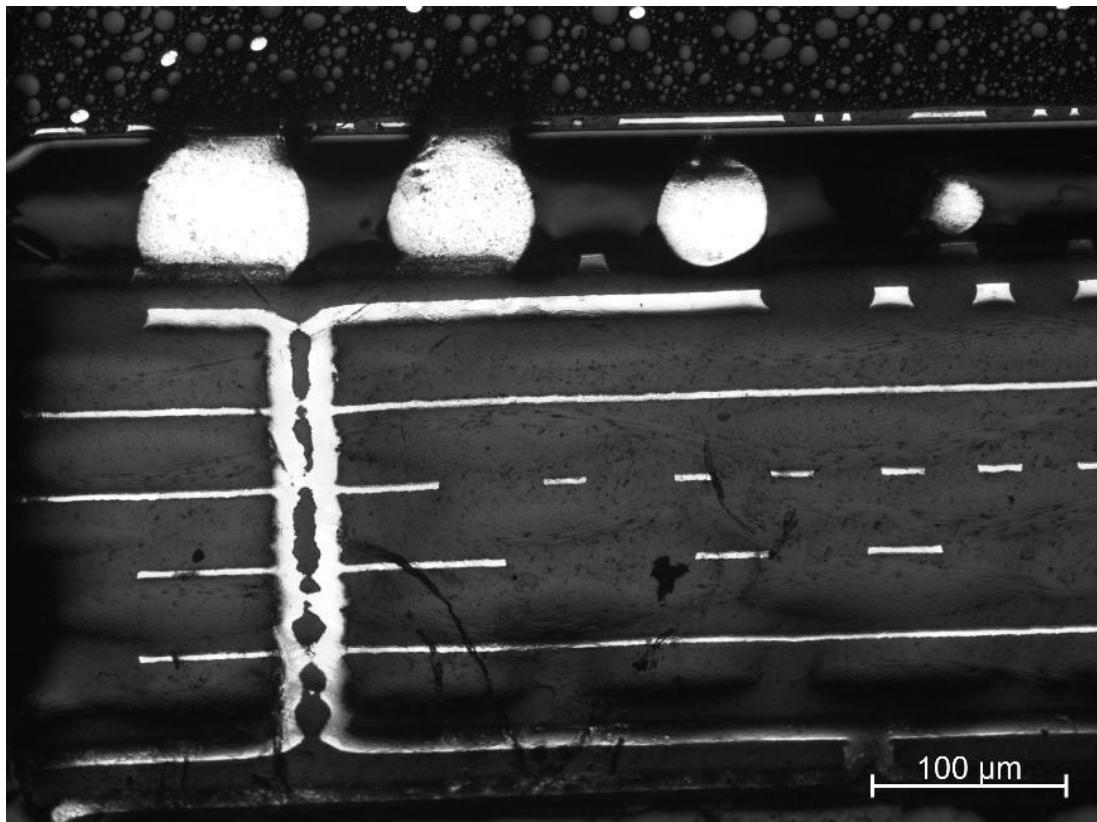
Ao cruzar as informações obtidas no exame de EDS com a literatura (Li, Li, Zhang, Chen, & Liu, 2019) e (Lin, Bi, Ju, Wang, & Wei, 2011), foi possível podemos assumir com razoável confiabilidade que as amostras estudadas possuem uma estrutura clássica de uma matriz de Sn com regiões de Pb dispersas na matriz.



**Figura 9 – Picos de difração por EDS**

### 5.2 Caracterização Geral Do Material

Ao examinar-se a Figura 10 a seguir, o aspecto geral da estrutura em estudo é ressaltado. Dessa forma, é possível observar claramente a estrutura chip-solda-placa, mencionada anteriormente na seção 4.2 - Preparação Da Amostra, bem como os terminais de comunicações entre as camadas da placa de circuito integrado. É possível observar as várias camadas de trilhas de cobre da placa, bem como uma via, conectando 6 camadas de trilhas de cobre. Dado que essa via conecta diversas camadas, é muito possível que se trate de uma conexão de aterramento.



*Figura 10 – Aspecto geral amostra, estrutura chip-solda-placa 50x*

Ao prosseguir com a investigação da superfície das amostras, foi possível encontrar outros componentes, tais como os capacitores de placas paralelas registrados na Figura 11 e os fios de ouro da Figura 12, que são estruturas que constituem respectivamente a placa de circuito e o chip de processamento.

Na Figura 11, é possível observar a estrutura interna do capacitor. Esses capacitores são tipicamente compostos de placas alternadas de prata, usando titanato de bário como dielétrico. Na imagem, não é possível ver a conexão das placas com os terminais, o que indica que as placas do capacitor estão perpendiculares ao plano da imagem.

Na Figura 12, podem-se observar as junções entre fios de ouro e terminais de cobre dentro do encapsulamento do componente. Esses fios de ouro fazem as ligações entre terminais elétricos na bolacha de silício e os terminais de cobre que serão ligados às bolas de solda.

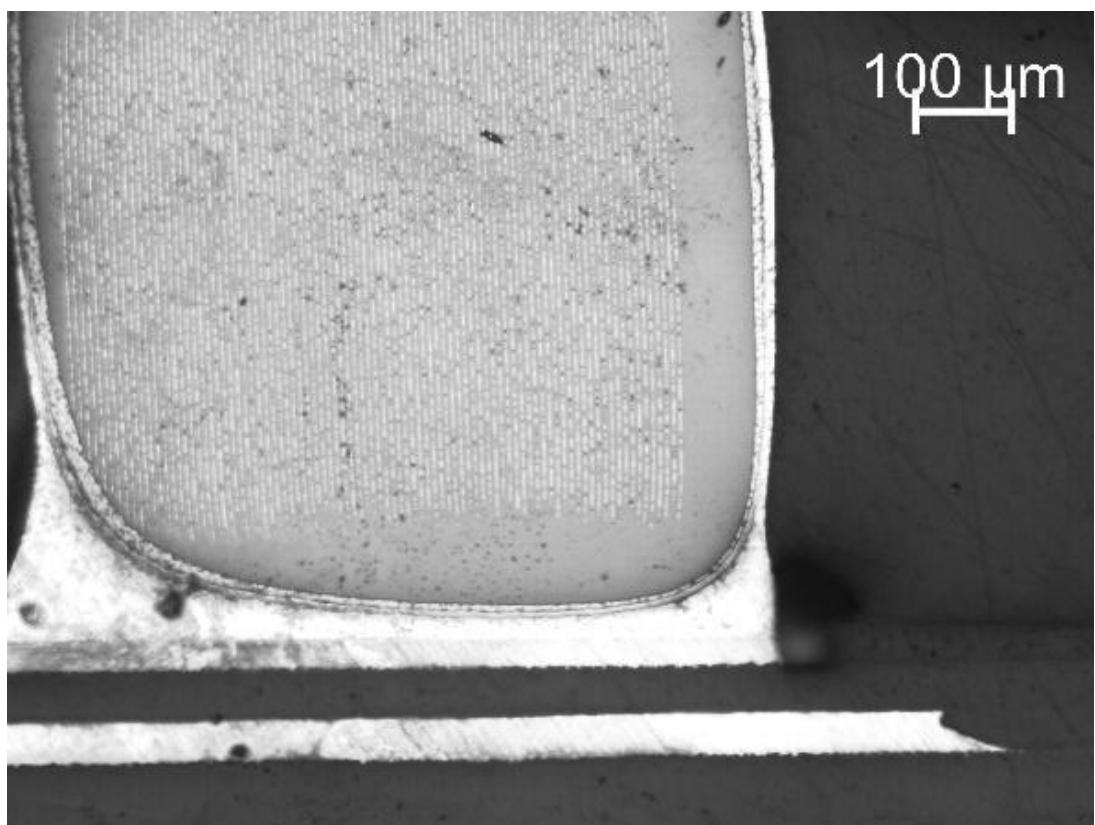


Figura 11 – Capacitor de placas paralelas 100x

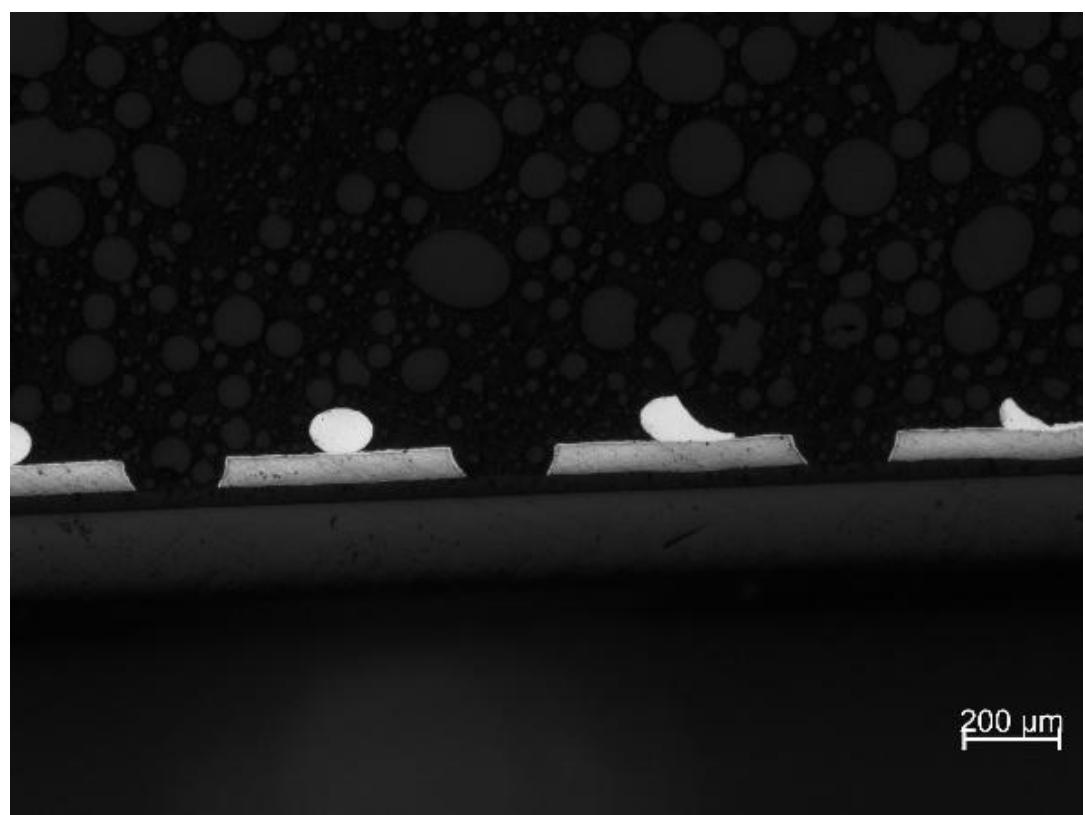
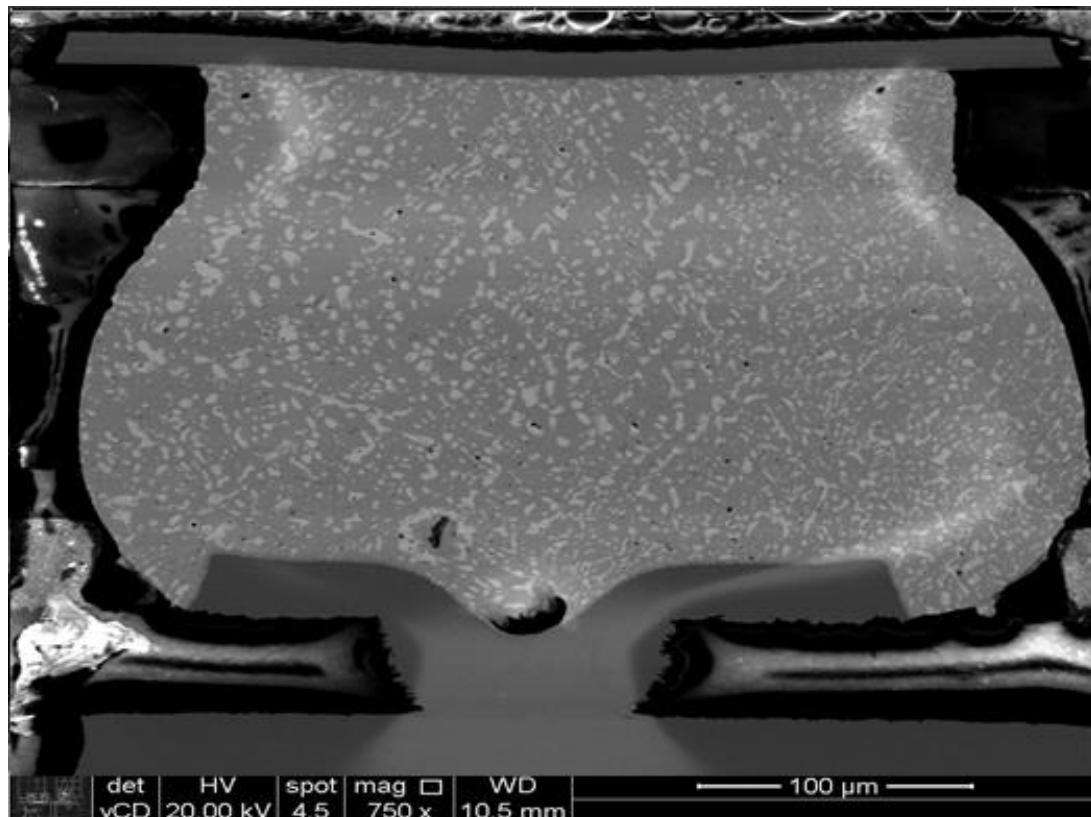
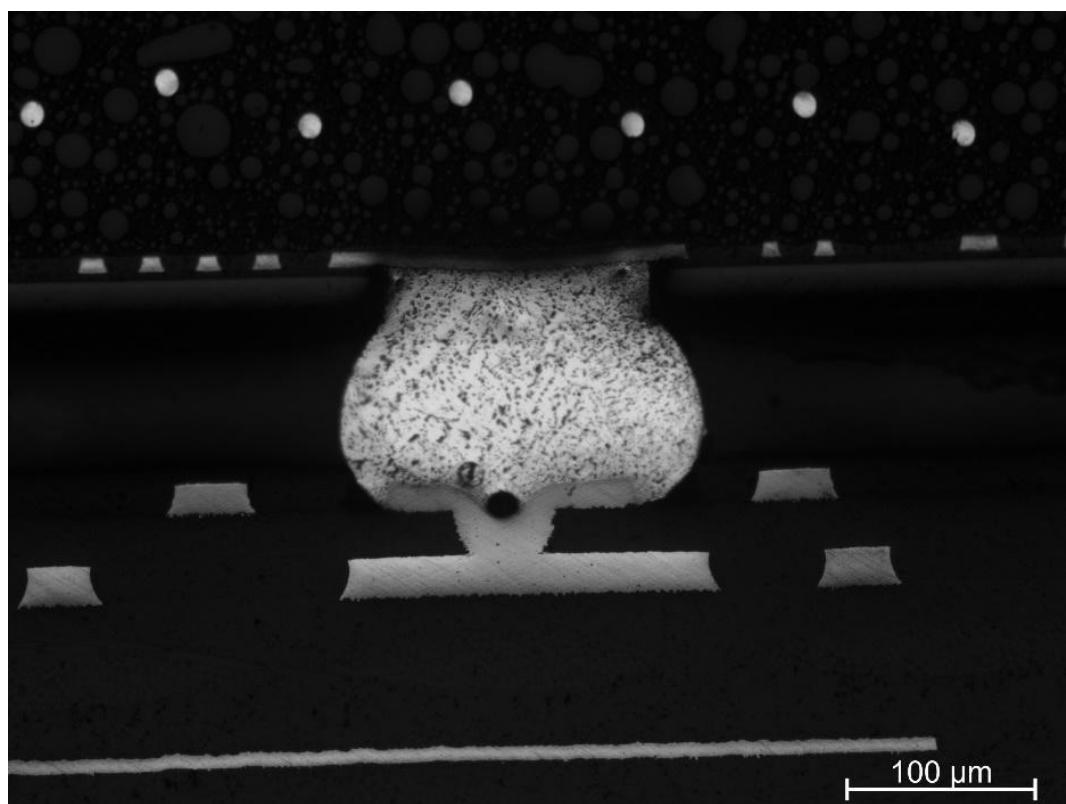


Figura 12 – Fio de ouro resolução 200x

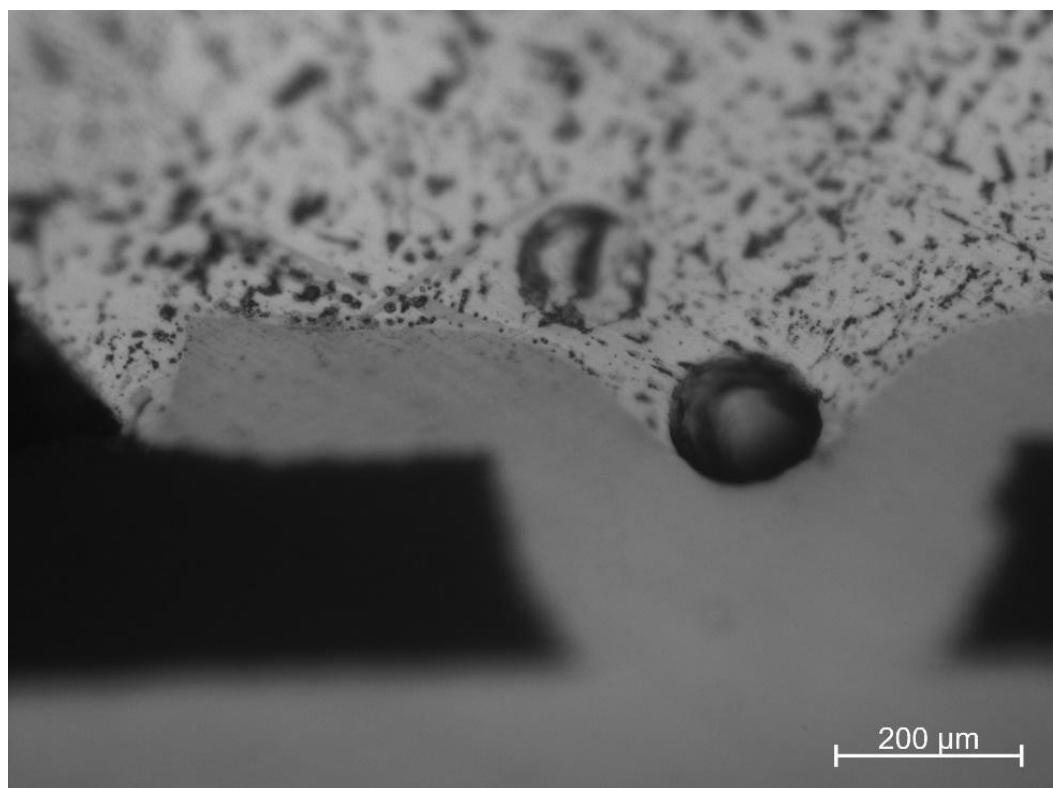


*Figura 13 – Bola de solda – Micrografia MEV – 750x*

Observando as Figura 13, Figura 14 e Figura 15 é possível notar a formação de bolhas no interior da gota de solda. Essas bolhas são causadas por enclausuramento de gases oriundos do fluxo que compõe a parte de solda. Uma parte do fluxo, ao evaporar, é aprisionado dentro do metal fundido e não consegue escapar, formando assim os vazios observados. Esse efeito é praticamente impossível de ser eliminado, de forma que esses poros são sempre esperados. No entanto, eles não devem apresentar tamanhos exagerados (superiores a 30% da secção transversal da solda), uma vez que isso pode causar a diminuição da resistência mecânica da solda ou interferir em sua resistência elétrica. (Laurila, Vuorinen, & Kivilahti, 2005) (Carl & Brook, 1985).



**Figura 14 – Defeito estrutural bola de solda, formação de bolhas no interior da bola de solda 100x**



**Figura 15 – Defeito estrutural bola de solda, formação de bolhas no interior da bola de solda 500x**

Observa-se também nas Figuras 11 a 13 uma via de comunicação entre camadas localizada no próprio terminal de cobre onde está a bola de solda. Essa via é chamada de “via-in-pad”, e é utilizada quando o terminal tem uma comunicação direta com a camada de trilhas de cobre logo abaixo da superfície da placa.

No processo de soldagem, o estanho fundido reage com o terminal de cobre, na ausência de outros elementos como a prata, comum em soldas livres de chumbo, e o níquel, ocasionalmente usado em revestimentos de terminais da placa de circuito, dando origem a dois compostos intermetálicos. Esses compostos são o  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , que forma pequenas protuberâncias chamadas de “escalopes”, e o  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , que forma uma camada fina entre o terminal de cobre e o outro intermetálico. Esses compostos são bastante frágeis isoladamente, porém conferem resistência mecânica à solda em espessuras baixas. Com o uso do dispositivo, o aquecimento por efeito Joule pode causar a ocorrência de fenômenos de difusão, fazendo com que a espessura dessas camadas intermetálicas aumente. Na Figura 14, pode-se observar essa camada intermetálica após a soldagem e após 1000 horas a 150°C.

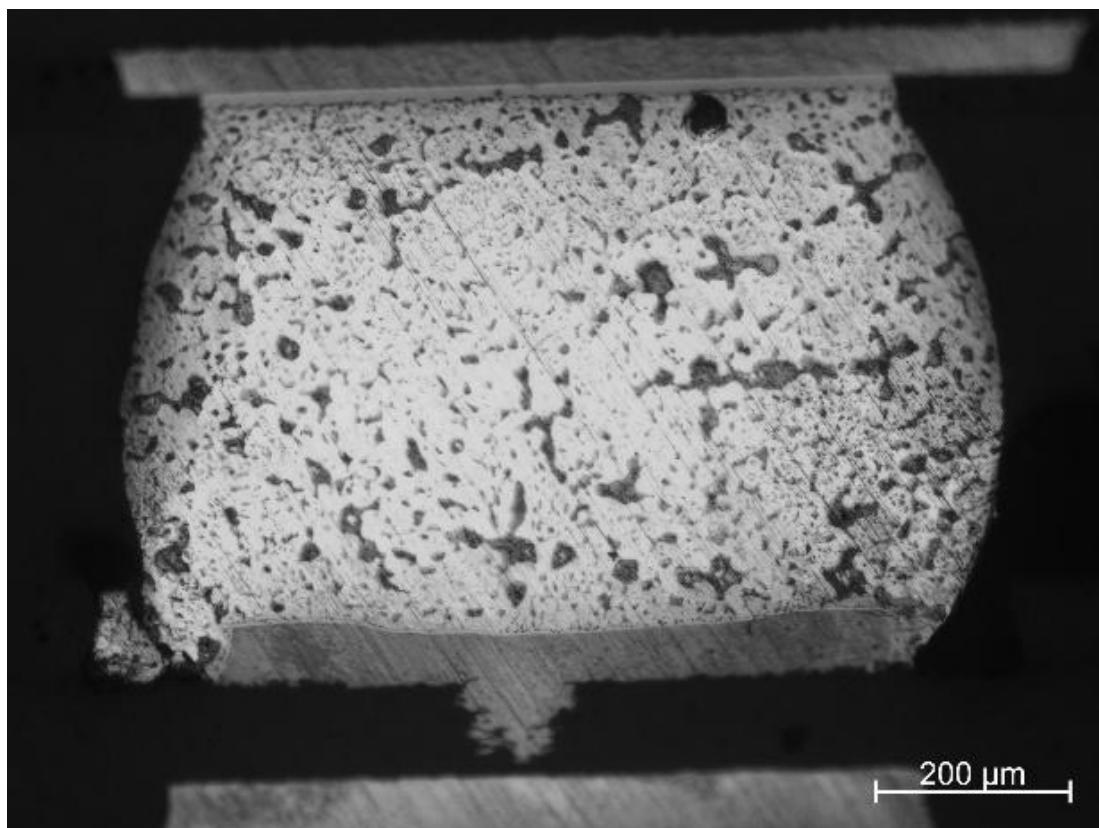
A Figura 16 apresenta uma bola de solda sem descolamento ou propagações aparentes de trinca. Já as Figura 17 e Figura 18 apresentam uma bola de solda com a propagação de uma trinca. Por fim, a Figura 19 retrata a bola de solda em um Smartphone onde pode-se observar o estado mais crítico na degradação da solda chegando a ocorrer um descolamento parcial entre a solda e a placa de circuito impresso.

Durante a vida de um dispositivo eletrônico, ele pode sofrer diversas quedas e impactos acidentais, assim como sofrer solicitações mecânicas enquanto se encontra no bolso do usuário, por exemplo. Em geral, essa solicitação vai se traduzir em uma flexão da placa de circuito, causando esforços de tração nas esferas de solda. Esses esforços de tração serão maiores nas extremidades dos componentes, devido ao maior momento fletor nessa região. Assim, espera-se que as soldas localizadas nos extremos sejam mais afetadas e suscetíveis a trincas de separação total da placa.

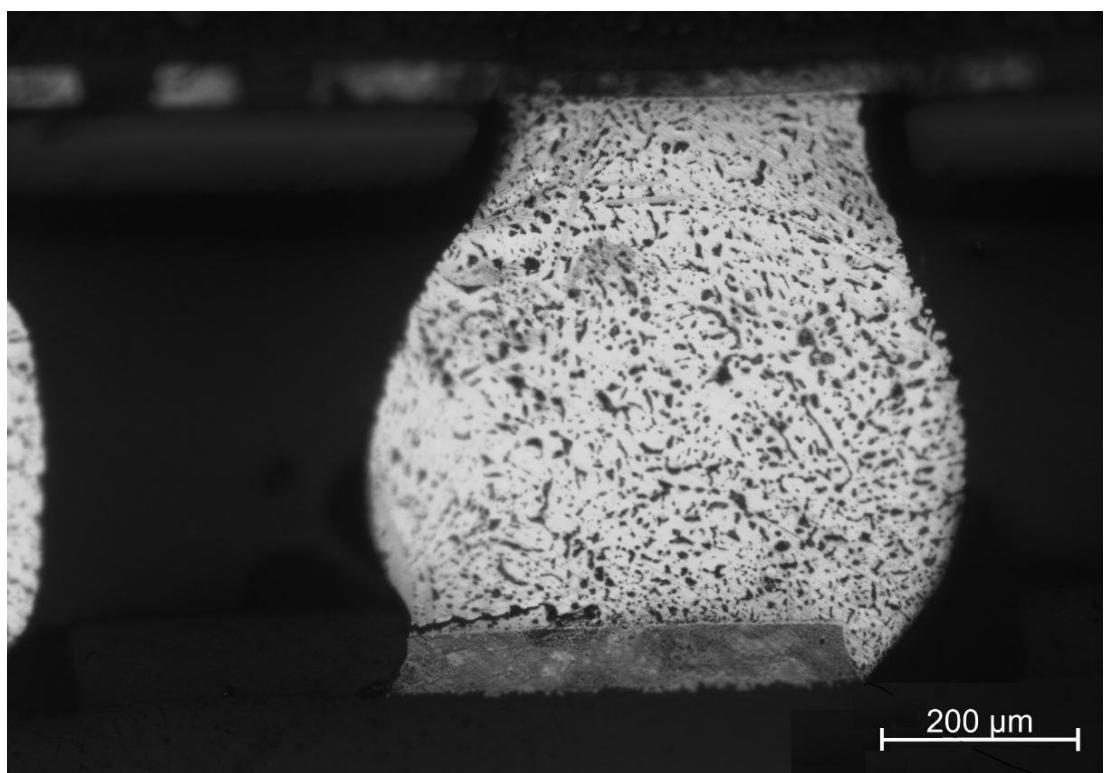
Em conjunto com as solicitações mecânicas, o desenvolvimento de uma camada intermetálica devido a difusão de Cu, provenientes dos conectores da placa de circuito impresso do chip, na matriz de Sn, gera fragilidade no conjunto devido ao baixo desempenho mecânico da camada intermetálica, uma vez que geralmente os compostos  $Cu_xSn_y$  apresentam alta fragilidade.(E. F. Monlevade & Reinikainen, 2006)

O avanço da camada intermetálica é acelerado quando o material é exposto a intensos ciclos térmicos, favorecendo a difusão de Cu. (De Monlevade & Peng, 2007) (Li et al., 2019)

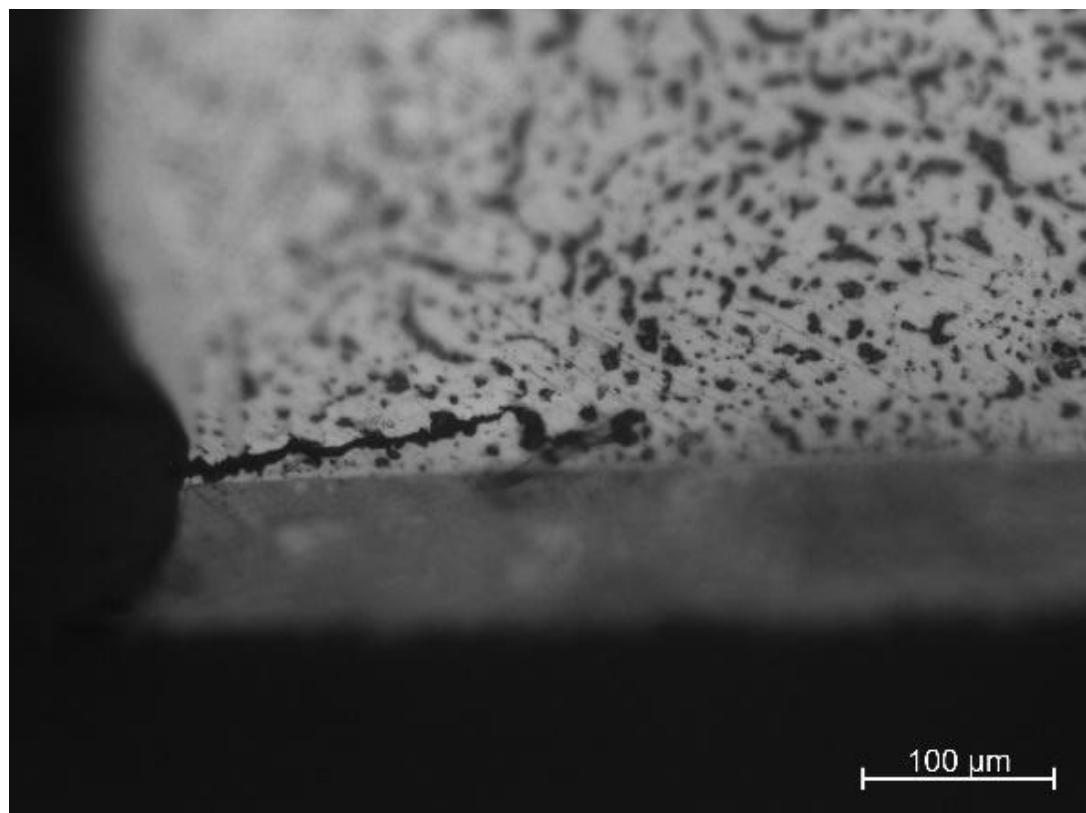
Somando-se o stress mecânico causado pelas solicitações de uso ao o avanço prematuro da camada intermetálica, desenvolvemos um ambiente onde o avanço de uma trinca pode encontrar na camada intermetálica um caminho preferencial de propagação, levando assim o componente a falha mecânica.



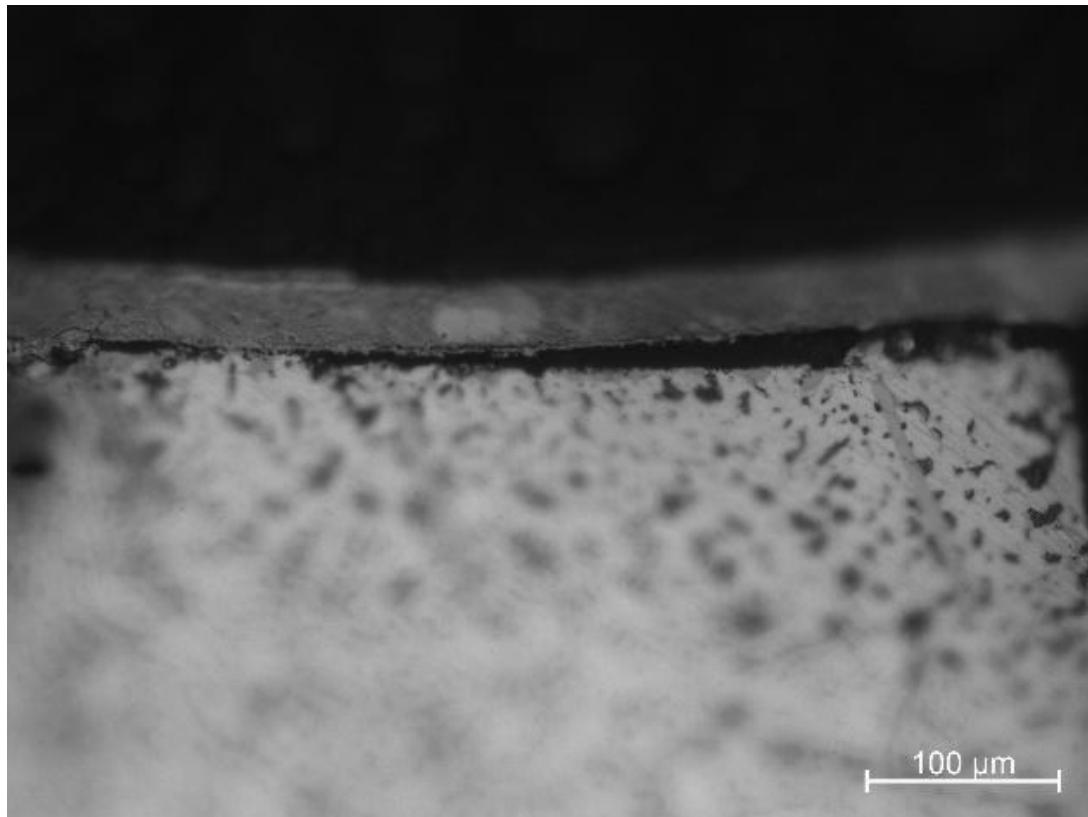
**Figura 16 – Bola de solda integral. 200x**



*Figura 17 – Bola de solda com fratura. 200x*



*Figura 18 – Bola de solda com fratura. 500x*



**Figura 19 – Bola de solda com descolamento parcial. 500x**

Por fim, é muito interessante observar a condição da camada intermetálica nessas soldas dos dispositivos em fim de vida. Nas Figuras 16 e 17, pode-se notar que não há crescimento significativo da camada intermetálica. A camada de  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  mantém sua morfologia similar à de uma solda recém realizada. Isso indica que o tempo real em alta temperatura ao longo de toda a vida útil do dispositivo não deve ter excedido 100 ou 150 horas. Apesar de esse dado parecer absurdo, deve-se considerar que a passagem de corrente elétrica pelas soldas não é constante, mas sim composta de diversos pulso de frações de segundos. Mesmo ao longo de um ou dois anos, a duração total desses pulsos somada não atingiu tempos significativos para o crescimento de intermetálico. Deve-se ainda levar em conta o fato de os telefones analisados não serem “smartphones”, e, portanto, serem caracterizados por uma solicitação muito menos severa das soldas em termos de passagem de corrente e ciclagem térmica.

Ainda assim, o fato de algumas trincas serem encontradas nas soldas pode indicar que o usuário desses telefones tenha derrubado o aparelho diversas vezes ou deixado o telefone em situações em que o aparelho tenha sofrido flexão ou torção (como, por exemplo, levar o aparelho no bolso).

## 6 CONCLUSÕES

Durante os estudos realizados, foi possível observar que as microestruturas em bolas de solda apresentaram diversos defeitos e imperfeições, que porém não devem comprometer o desempenho da solda, além de progredir com o envelhecimento do componente como brevemente resumido em resultados.

Também foi detectada uma linha de tendência, em que celulares comuns apresentaram menores escalas de dano nas suas microestruturas do que em Smartphones que foram produzidos em períodos similares.

Essa evidência pode colaborar com a teoria (Eduardo Franco De Monlevade & Peng, 2007) da influência de ciclos térmicos no envelhecimento das soldas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anjard, R. P. (1984). Solder pastes for microelectronics. *Microelectronics Journal*, 15(2), 53–64. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(84\)80034-8](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(84)80034-8)
- Canumalla, S., & Viswanadham, P. (2014). *Portable Consumer Electronics & Games*. PennWell Corporation.
- De Monlevade, Eduardo Franco, & Peng, W. (2007). Failure mechanisms and crack propagation paths in thermally aged Pb-free solder interconnects. *Journal of Electronic Materials*, 36(7), 783–797. <https://doi.org/10.1007/s11664-006-0062-8>
- Li, Q. hai, Li, C. F., Zhang, W., Chen, W. wei, & Liu, Z. Q. (2019). Microstructural evolution and failure mechanism of 62Sn36Pb2Ag/Cu solder joint during thermal cycling. *Microelectronics Reliability*, 99(June), 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.05.015>
- Lin, F., Bi, W., Ju, G., Wang, W., & Wei, X. (2011). Evolution of Ag3Sn at Sn-3.0Ag-0.3Cu-0.05Cr/Cu joint interfaces during thermal aging. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(23), 6666–6672. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.03.134>
- Monlevade, E. F., & Reinikainen, T. (2006). Fracture surface analysis of aged and drop tested Sn-Ag-Cu solder joints. *2006 Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, HDP'06*, 254–259. <https://doi.org/10.1109/hdp.2006.1707602>
- Peng, W., Monlevade, E., & Marques, M. E. (2007). Effect of thermal aging on the interfacial structure of SnAgCu solder joints on Cu. *Microelectronics Reliability*, 47(12), 2161–2168. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2006.12.006>