

Fernando Maccari

**Estudo da interação entre ligas de soldagem branda e substratos
de Ni e Cu**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr. -Ing.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Maccari, Fernando

Estudo da interação entre ligas de soldagem
branda e substratos de Ni e Cu / Fernando Maccari ;
orientador, Paulo Antonio Pereira Wendhausen - SC,
2016.

117 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais,
Florianópolis, 2016.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2.
Soldagem branda. 3. Compostos intermetálicos. 4.
Metalurgia. I. Antonio Pereira Wendhausen, Paulo.
II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais. III. Título.

Fernando Maccari

**Estudo da interação entre ligas de soldagem branda e substratos
de Ni e Cu**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 25 de maio de 2016.

Prof. Antônio Pedro Novaes de Oliveira, Dr. – Ing.
Coordenador do Curso

Prof. Paulo A. P. Wendhausen, Dr.- Ing.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. José Carlos Boareto, Dr.
Fundação CERTI

Prof. Marcos Marinovic Doro, Dr.
Instituto Federal de São Paulo

Prof. Leonardo Ulian Lopes, Dr
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha namorada e companheira
Kamila Almeida de Oliveira

Agradecimentos

Ao Prof. Paulo A. P. Wendhausen pelo apoio nestes desafios em busca de conhecimento e consolidação da minha trajetória profissional.

Aos colegas de trabalho do grupo de materiais magnéticos MAGMA pela colaboração nestes anos, em especial a Leandro Lima Evangelista, Bruno Eggert, Cristiano Teixeira, Frederico Keller, Juliano Baron, Leonardo Ulian Lopes, Luiz Henrique Justo, Daniel Àvila, Marina Hoffman, Gabriela Eller, Sewin Horita.

À Deise Rebelo Consoni, técnica do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC, pela ajuda durante as análises de microscopia realizadas. Ao Sergio Yesid Gómez González (Laboratório de Materiais Cerâmicos – CERMAT/UFSC) pelo auxílio nas análises no microscópio eletrônico. Aos amigos do Laboratório de Materiais (LABMat/UFSC), Renan Giacomelli e Guilherme Neves, pelo auxílio nas análises de microscopia ótica e nas simulações no *software* ThermoCalc.

Aos colegas da Fundação CERTI, Saulo Felisberto Longo, Anderson Marcelo, Rafael Nischiguti e Pedro Nunes pela ajuda e disponibilidade durante a realização do trabalho. Em especial o Dr.Eng. José Carlos Boareto pelos ensinamentos e confiança ao longo dessa jornada, e à Carlos Fadul por permitir a parceria para execução do trabalho.

Aos amigos de longa data, Gustavo Oliveira, Jonas Augusto Hoinaski, Vagner Luiz Hoinaski, William Emerick, Cauê Correa da Silva, Antonio Itamar Ramos Filho e Vitor Abel Fragnani, pela ajuda e apoio durante todo esse tempo.

À CAPES pelo financiamento durante o período da pesquisa.

À minha família, pelo apoio e ajuda em todos os momentos para que essa conquista fosse possível.

E também à minha namorada e companheira, Kamila Almeida de Oliveira, por todo apoio em todos os momentos.

A todos que direta ou indiretamente me auxiliaram na finalização deste trabalho.

RESUMO

As reações existentes entre as ligas de solda e os terminais de componentes e placas eletrônicas possuem grande interesse industrial, fato este decorrente da ligação existente entre a confiabilidade, os materiais utilizados e processos de montagem de placas eletrônicas. Dentro desse contexto, o uso de diferentes ligas de solda e metalizações está sendo amplamente estudado em decorrência de diretivas ambientais que visam banir o uso do chumbo, o qual era muito utilizado pela indústria de montagem de placas eletrônicas. Porém, a utilização desses novos materiais necessita de adequações das janelas de processos adotadas, no intuito de adequá-las para obtenção de uma junta de solda com boas propriedades e que atendam aos requisitos necessários à aplicação. Tendo em vista este conjunto de questões, neste trabalho foram avaliadas duas ligas de solda comerciais, 63%Sn-37%Pb e Sn-0.3%Ag-0.7%Cu-0.1%Bi (SACX0307) e duas metalizações utilizadas em componentes eletrônicos do tipo THT (*Through Hole Technology*), cobre e níquel, adotando como base o processo de soldagem por onda seletiva e seus parâmetros controláveis – tempo de contato entre a solda fundida e o terminal do componente e a temperatura do processo. A processabilidade, a qual foi avaliada em termos do ângulo de molhamento, apresentou melhores resultados para a combinação: liga SnPb, metalização de cobre e na maior temperatura avaliada, 300°C. Estes resultados foram utilizados para inferir, através da equação de Young, que a tensão superficial da liga SnPb apresentou menores valores que a SACX0307 e também que o cobre possui menor tensão de superfície que o níquel nas condições avaliadas. As análises de microscopia revelaram que os filamentos de níquel, utilizados para simular terminais de componentes, não sofreram molhamento completo na área exposta à solda, influenciando na homogeneidade e na altura máxima de molhamento. Já para o filamento de cobre não foi observado este comportamento, sendo possível estabelecer uma otimização de parâmetros para a aplicação de ambas as ligas no processo de montagem de placas eletrônicas. No tocante as reações envolvendo as ligas de solda e as metalizações, os resultados de análise química na interface dos materiais revelaram a formação dos compostos Ni_3Sn_4 e Cu_6Sn_5 , sendo mais pronunciada em altas temperaturas e maiores tempos de contato, já que a reação está diretamente ligada à dissolução da metalização conforme avaliado.

PALAVRAS CHAVE: Soldagem Branda, Metalização, Ligas Sem Chumbo, Compostos Intermetálicos

ABSTRACT

The reaction between solder alloys and printed circuit boards (PCB) and component leads have great industrial interest due to the relation between reliability, materials and the assembly processes. In this context, the use of different solder alloys and lead metallization are being widely studied in virtue of environmental policies that aim to ban the use of lead element, which was widely used for PCI assembly industries. However, the use of these new materials require adjustments of the adopted processes windows in order to adapt them to obtain a solder joint and good properties that meet the requirements necessary for the application. Given this issues, in this study were evaluated two commercial soldering alloys, 63%Sn-37%Pb e Sn-0.3%Ag-0.7%Cu-0.1%Bi (SACX0307) and two metallizations used in THT (Through Hole Technology) components lead, copper and nickel. This study will take as a basis the selective wave soldering process and its controllable parameters - contact time between the molten solder and the component lead and the process temperature. The solderability, which was evaluated in terms of the wetting angle, showed the best results for the combination: SnPb alloy, copper metallization and the higher temperature tested, 300°C. These results were used to infer by Young's equation, that the surface tension of SnPb alloy showed lower values than SACX0307 and also that copper has lower surface tension than nickel under the evaluated conditions. The microscopy analysis revealed that the nickel filaments, used to simulate component lead, not suffer complete wetting during the soldering process, influencing the homogeneity. As for the copper filament, this behavior was not observed and an optimization is possible to establish parameters to be used for both alloys in the soldering process. Regarding the reactions involving solder alloys and metallizations, the results of chemical analysis on the interface revealed the formation of Ni_3Sn_4 and Cu_6Sn_5 compounds, being more pronounced at higher temperatures and longer dwell times, since the reaction is directly linked to the dissolution of metallization as assessed.

KEYWORDS: Soldering, Finishing, Lead-Free Solder Alloys, Intermetallic Compounds

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faturamento brasileiro da indústria eletrônica por ano.	1
Figura 2 - Camadas da PCI e a junção por pressão e temperatura.	5
Figura 3 - Exemplo de um componente TH.....	9
Figura 4 - Exemplo de um componente de montagem sobre superfície.	9
Figura 5 - Exemplos de componentes das duas tecnologias de montagem.	10
Figura 6 - Processo de deposição de pasta de solda.	12
Figura 8 - Exemplos de pré-forma de componentes THT.....	13
Figura 9 - Processo de soldagem branda THT manual.	14
Figura 10 - Diagrama esquemático mostrando a etapa de soldagem no processo por onda.....	16
Figura 11 - Representação de uma máquina de soldagem por onda.	16
Figura 12 - Fluxo do processo de soldagem seletiva.....	17
Figura 13 - Diferentes bocais que podem ser utilizados em máquinas de soldagem seletiva.....	18
Figura 14 - Possibilidades de montagem de componentes em placas eletrônicas.....	21
Figura 15 - Influência do alinhamento e disposição dos componentes SMT durante a soldagem por onda.	22

Figura 16 - Diagrama de fases em equilíbrio de Sn-Pb. A região destacada indica a faixa típica de composições utilizadas para interconexão entre componentes e a PCI.	23
Figura 17 - (a) Diagrama ternário de equilíbrio Sn-Ag-Cu e (b) ampliação da região rica em estanho.....	25
Figura 18 - Diagrama esquemático mostrando as tensões existentes no espalhamento das ligas de solda em uma superfície horizontal (a) e vertical (b).....	28
Figura 19 - Representações de diferentes ângulos de molhamentos e a sua respectiva denominação.	28
Figura 20 - Ângulo de molhamento em função da composição química. (a) Pb puro, (b) 5Sn-95Pb, (c) 10Sn-90Pb, (d) 40Sn-60Pb, (e) 63Sn-37Pb, (f) 80Sn-20Pb.....	29
Figura 21 - Efeito da temperatura no ângulo de contato de diferentes ligas e fluxos em um substrato de cobre.....	30
Figura 22 - Influência do tempo no ângulo de contato.	31
Figura 23 - Diferentes níveis de preenchimento de componentes THT, a) 100% - ideal, b) 75% - aceitável e c) 50% - é aceito em determinadas aplicações nas quais não é necessário alta confiabilidade.....	33
Figura 24 - Janela de processo genérica destacada (hachurada) para soldagem por onda seletiva utilizando a liga eutética SnPb.	34
Figura 25 - Aumento da área (destaque em vermelho) de dissolução pelo processo de difusão do substrato de cobre para a liga de solda no estado líquido, a) sem dissolução, b) pouca dissolução e c) aumento do tempo ocasiona uma maior região afetada pela dissolução e aumento da concentração de cobre no metal líquido.....	35

Figura 26 - Diagrama de equilíbrio Sn-Cu.....	36
Figura 27 – Micrografia evidenciando o crescimento da camada de intermetálico após o processamento (a) e surgimento do Cu_3Sn após envelhecimento a 135°C durante 400 dias (b).....	37
Figura 28 - Surgimento de vazios de Kirkendall após envelhecimento em alta temperatura.	38
Figura 29 - Diagrama de equilíbrio Ni-Sn.	39
Figura 30 - Dissolução de cobre após 10 segundos na temperatura de 255°C em contato com a liga SnPb (a) e Sn-0,7Cu (b). O gradiente de cores representa a concentração em massa.....	41
Figura 31 - Concentração de cobre próximo à interface em relação ao tempo.	41
Figura 36 - Arranjo utilizado para o ensaio de ângulo de molhamento.	44
Figura 32 - Combinação de parâmetros avaliados no teste de imersão.	46
Figura 33 - Representação esquemática da imersão em fluxo (a), montagem na PCI (b) e imersão (c).....	47
Figura 34 - Arranjo utilizado para aferição da temperatura de pré-aquecimento.	48
Figura 35 - Equipamento de soldagem seletiva (a) mostrando os dois tanques de solda (b) e os irradiadores térmicos (c).	49
Figura 37 – Resultado da análise térmica de calorimetria diferencial exploratória das ligas Sn-Pb e SACX0307.	51

Figura 38 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de cobre e liga SnPb em diferentes temperaturas.....	52
Figura 39 - Espalhamento da liga SnPb no substrato de cobre após o ensaio de ângulo de molhamento em diferentes temperaturas.	54
Figura 40 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de cobre e liga SACX0307 em diferentes temperaturas. .	55
Figura 41 - Espalhamento da liga SACX0307 no substrato de cobre após o ensaio de ângulo de molhamento nas temperaturas de 250°C e 300°C.....	56
Figura 42 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de níquel e liga SnPb em diferentes temperaturas.....	57
Figura 43 - Espalhamento da liga SnPb no substrato de níquel após o ensaio de ângulo de molhamento em diferentes temperaturas.	58
Figura 44 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de níquel e liga SACX0307 em diferentes temperaturas .	59
Figura 45 - Espalhamento da liga SACX0307 no substrato de níquel após o ensaio de ângulo de molhamento nas temperaturas de 250°C e 300°C.....	60
Figura 46 - Micrografia eletrônica evidenciando a influência da temperatura na altura de molhamento para a liga SnPb no fio de cobre com 20 segundos de contato.	62
Figura 47 - Micrografia eletrônica evidenciando a influência da temperatura na altura de molhamento para a liga SACX0307 no fio de cobre com 0 segundos de contato.	63

Figura 48 - Micrografia eletrônica evidenciando a influência da liga de solda na altura de molhamento para as ligas SnPb e SACX0307 no fio de cobre.....	64
Figura 49 – Micrografia eletrônica evidenciando a influência do tempo de contato entre a altura de molhamento para a liga de solda SnPb a 200°C em fios de cobre.....	65
Figura 50 - Altura de molhamento para a liga SACX0307 na temperatura de 250°C e em diferentes tempos de contato.....	66
Figura 51 - Procedimento utilizado neste trabalho para avaliação de soldabilidade utilizando como base o processo de soldagem branda seletiva.	67
Figura 52 - Micrografia ótica mostrando o acúmulo de solda em pontos isolados do filamento de Ni para a liga SnPb nas temperaturas de 200°C e 300°C.....	68
Figura 53 - Micrografia eletrônica mostrando as regiões que ficaram sem molhamento (em vermelho) e a altura máxima de molhamento observada para a liga SnPb nas temperaturas de 200°C e 300°C. ...	69
Figura 54 - Micrografia eletrônica evidenciando a existência de regiões sem molhamento (em vermelho) e a altura máxima de molhamento para a liga SACX0307 a 300°C.....	70
Figura 55 - Fotografia dos fios de Ni após o processo de imersão em diferentes condições. Estão destacados regiões onde foi possível perceber ausência de molhamento.	71
Figura 56 - Fotografia de 03 filamentos de cada material após a imersão na liga SnPb a 250°C por 20s.....	73

Figura 57 - Diagrama de Ellingham para óxidos, com destaque para a faixa de temperatura avaliada neste trabalho.	74
Figura 58 - Diagrama de energia livre de Gibbs em função da temperatura para a formação dos compostos intermetálicos de Cu-Sn.	75
Figura 59 - Diagrama de energia livre de Gibbs em função da temperatura para a formação dos compostos intermetálicos de Ni-Sn.	76
Figura 60 - Medidas de composição química próximo à interface de Cu com as ligas SnPb e SACX0307 em diferentes condições.....	77
Figura 61 - Medidas de composição química próximo à interface de Ni com as ligas SnPb e SACX0307 em diferentes condições	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de revestimento de PCIs e algumas características.	8
Quadro 2 - Taxa de dissolução de diferentes metalizações na liga eutética Sn-Pb.....	11
Quadro 3 - Comparativo entre as principais técnicas de soldagem de componentes THT.....	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ag	Prata
BGA	<i>Ball Grid Array</i> – encapsulamento com terminais esféricos em arranjos de área
CI	circuito integrado
Cu	Cobre
ENIG	<i>Electroless Nickel Immersion Gold</i> – Imersão de Ouro sobre Níquel Eletrolítico
HASL	<i>Hot Air Solder Level</i> – Nivelamento de Solda por Ar Quente
Ni	Níquel
OSP	<i>Organic Solderability Preservative</i> – Acabamento Orgânico que Preserva a Solderabilidade
Pb	Chumbo
PCI	Placa de circuito impresso
Pd	Paládio
RMA	Rosina moderadamente ativada
RoHS	<i>Restriction of Certain Hazardous Substances</i> – Restrição ao Uso de Substâncias Perigosas
SAC	Liga para interconexão eletrônica à base de estanho-prata-cobre
SACX	Liga SAC com um quarto elemento modificador de propriedades
SACX0307	liga para interconexão eletrônica com Sn-0.3%Ag-0.7%Cu-0.10%Bi em peso
SMT	<i>Surface Mounted Technology</i> – Tecnologia de Montagem na Superfície
Sn	Estanho
Sn-Pb	Liga eutética de estanho e chumbo
THT	<i>Through Hole Technology</i> – Tecnologia Através de Furos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVOS	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	PLACAS ELETRÔNICAS.....	5
2.1.1.	<i>Revestimentos de placas eletrônicas.....</i>	<i>6</i>
2.2.	COMPONENTES ELETRÔNICOS.....	8
2.2.1.	<i>Revestimentos de componentes eletrônicos</i>	<i>10</i>
2.3.	MONTAGEM DE PLACAS ELETRÔNICAS	11
2.3.1.	<i>Processo de montagem SMT</i>	<i>11</i>
2.3.2.	<i>Processo de montagem THT.....</i>	<i>13</i>
2.3.2.1	Processo manual de soldagem THT	13
2.3.2.1	Processo automático de soldagem THT.....	14
	2.3.2.1.1 Soldagem por onda	15
	2.3.2.1.1 Soldagem por onda seletiva	17
2.3.3.	<i>Processo de montagem mista</i>	<i>20</i>
2.4.	LIGAS DE SOLDAGEM BRANDA	22
2.4.1.	<i>Ligas Sn-Pb</i>	<i>22</i>
2.4.2.	<i>Ligas SAC (Sn-Ag-Cu)</i>	<i>24</i>
2.4.3.	<i>Ligas SACX</i>	<i>26</i>
2.5.	METALURGIA DA SOLDAGEM BRANDA	27
2.5.1.	<i>Ângulo de molhamento.....</i>	<i>27</i>
2.5.1.1	Relação entre molhamento no processamento de THTs	32
2.5.2.	<i>Reações entre a liga de solda e terminais</i>	<i>34</i>
2.5.2.1	Reação entre ligas de solda e cobre	34
2.5.2.2	Reação entre ligas de solda e níquel	38
2.5.2.3	Reação durante a soldagem THT.....	40
3.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	43
3.1.	ANÁLISE TÉRMICA DAS LIGAS DE SOLDA	43
3.2.	PROCESSO DE SOLDAGEM BRANDA POR ONDA SELETIVA.....	45
3.2.1.	<i>Materiais Utilizados</i>	<i>45</i>
3.2.2.	<i>Métodos</i>	<i>45</i>
3.2.3.	<i>Caracterização.....</i>	<i>49</i>
3.3.	ENSAIOS DE MOLHABILIDADE	43
3.3.1.	<i>Materiais Utilizados</i>	<i>43</i>
3.3.2.	<i>Métodos</i>	<i>43</i>
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51

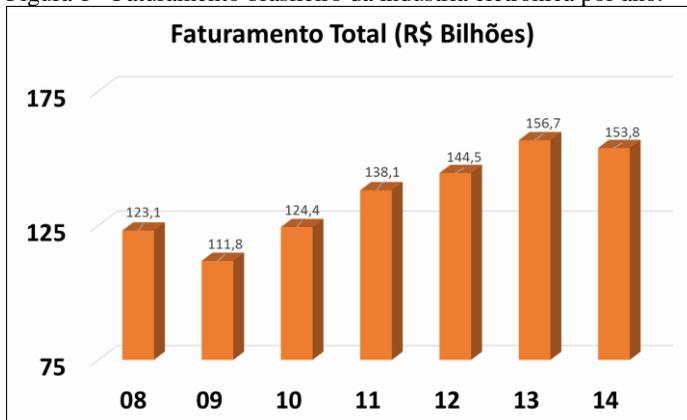
4.1.	RESULTADOS – ANÁLISE TÉRMICA.....	51
4.2.	RESULTADOS – ÂNGULO DE MOLHAMENTO	52
4.2.1.	<i>Substrato de cobre</i>	52
4.2.2.	<i>Substrato de níquel</i>	56
4.2.3.	<i>Influência do substrato</i>	60
4.3.	RESULTADOS – SOLDAGEM POR ONDA SELETIVA.....	61
4.3.1.	<i>Filamento de cobre</i>	62
4.3.2.	<i>Filamento de níquel</i>	68
4.3.3.	<i>Influência do material do filamento</i>	72
4.3.4.	<i>Compostos intermetálicos</i>	74
5.	CONCLUSÕES	81
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da utilização de equipamentos eletroeletrônicos é evidente na sociedade atual. Os números da indústria eletrônica aumentam em função da velocidade de inovação e desenvolvimento de novos produtos para diferentes aplicações: bens de consumo, setores militares, aquisição de dados, eletrônica de potência, entre outros.

Segundo a ABINEE, Agência Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, o faturamento de eletrônicos ultrapassou a marca dos R\$150 bilhões nos anos de 2013 e 2014 no Brasil, conforme apresentado na Figura 1. (ABINEE, 2015)

Figura 1 - Faturamento brasileiro da indústria eletrônica por ano.



Fonte: (ABINEE, 2015)

Dentro deste contexto, a montagem de placas eletrônicas se faz muito importante como parte do desenvolvimento desses produtos, aliando novos componentes e processos que viabilizam a montagem e garantem a qualidade do produto final. De acordo com o IPC (*Association Connecting Electronic Industries*), o faturamento mundial de empresas de montagem de placas eletrônicas em 2014 foi de U\$436 bilhões, representando 20% do faturamento do produto final. Com isso temos que a competitividade dentro deste mercado está cada vez maior, exigindo maior flexibilidade das montadoras, devido à diferentes produtos existentes, e qualidade da montagem das placas eletrônicas. (IPC, 2015)

Dentre as etapas do processo de montagem, a soldagem branda ganha destaque, pois é decorrente deste processo que os componentes são aderidos elétrica e mecanicamente à placa, conferindo ao produto o

correto funcionamento e confiabilidade. Para que ocorra esta ligação, é adicionado uma liga metálica que, através de aquecimento, é fundida e molha os terminais dos componentes e da placa, e durante a solidificação promove a formação da junção. Essa união é obtida através da formação de compostos intermetálicos entre os terminais da placa e componente.(TU, 2007)

Diferentes materiais são utilizados para estes fins, tanto como liga de solda quanto nos terminais dos componentes. Por isso é muito importante entender o sistema metalúrgico e as reações envolvidas durante o processamento, pois estas irão garantir as propriedades e confiabilidade da montagem da placa eletrônica. Sabe-se que os compostos intermetálicos gerados nas reações são frágeis, por isso entender a sua formação e crescimento é extremamente importante para evitar falhas prematuras. (COOMBS; HOLDEN, 2007)

Muitos trabalhos estão sendo realizados neste âmbito, principalmente após a criação de diretivas ambientais que restringem o uso de certas substâncias, dentre elas o chumbo, que era muito utilizado na indústria de montagem de placas eletrônicas. A criação de novas ligas de solda e metalização de terminais foi necessária para atender essas novas diretivas, culminando em readequação de produtos e processos. Dentro desse contexto, as ligas ternárias baseadas em estanho-prata-cobre surgem como as principais candidatas àquela baseada em estanho-chumbo, porém diferentes parâmetros de processos devem ser aplicados em virtude das diferentes características entre as ligas. (KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014)

Adicionalmente a esse cenário, processos que buscam flexibilizar a montagem das placas eletrônicas, vem sendo empregados. Um exemplo é o processo de soldagem por onda seletiva, que foi desenvolvido para montagem de placas com leiaute complexo, que contempla as duas principais tecnologias de componentes utilizada, tecnologia através de furos e de superfície. Neste processo é possível soldar componentes pontualmente, de maneira programada, adequando o tempo de contato da solda, em estado fundido, com os terminais do componente/placa, bem como a altura de projeção da solda contra à placa eletrônica. Estas possibilidades fazem com que haja maior flexibilidade, podendo adequar melhores parâmetros para o processamento e as propriedades finais da junta de solda. Aliando-se a isto, esse processamento evita o contato da solda com outros componentes e também com a placa eletrônica, conforme ocorre com processos análogos, como é o caso da soldagem por onda. Estas características se tornam ainda mais essencial no contexto nacional brasileiro, onde a indústria utiliza placas eletrônicas que não

foram totalmente modificadas para a tecnologia de montagem de superfície (algo que é tendência na indústria eletrônica global), tornando necessário o emprego de diferentes tecnologias de montagem na mesma PCI. (KLENKE, 2002; STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Com todas estas mudanças e desenvolvimentos da indústria eletrônica, muitos estudos são realizados em termos da composição química das ligas, dos terminais, da reação destes e também a influência dos parâmetros de processo na formação da interconexão eletrônica. Porém, em decorrência da relativa introdução do processo de soldagem por onda seletiva na indústria de montagem de placas eletrônicas, não foram realizados para identificar os possíveis ganhos e possibilidades desta forma de montagem de componentes.

Tendo em vista os desafios explicitados, propõe-se neste trabalho uma combinação destas variáveis. Sendo assim, é pretendido investigar as reações entre duas ligas de solda utilizadas para formação da junta de solda com dois diferentes materiais utilizados em terminais de componentes e placas eletrônicas, utilizando a soldagem seletiva como forma de processamento. Com isso almeja-se avaliar a interação desses diferentes materiais e também como essa relação é influenciada pelos parâmetros do processo de soldagem branda por onda seletiva, sendo eles: temperatura da solda e tempo de contato da solda com os materiais dos terminais

1.1. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a soldabilidade de componentes eletrônicos THTs metalizados com cobre e níquel utilizando as ligas de solda comerciais SnPb (63%Sn-37%Pb) e SACX0307 (Sn-0.3%Ag-0.7%Cu-0.1%Bi) em função das variáveis do processo.

Objetivos Específicos

- Analisar as diferenças no ângulo de molhamento entre as duas ligas de solda com os materiais utilizados na metalização de terminais de componentes eletrônicos;
- Determinar como o tempo de processo e a temperatura da solda influenciam a molhabilidade de componentes THTs;
- Avaliar os compostos intermetálicos formados durante as reações e sua dependência com o tempo de processo e temperatura da liga de solda.

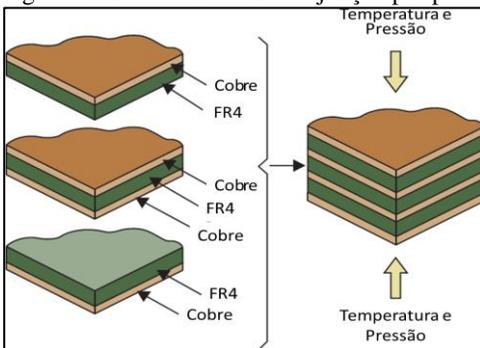
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PLACAS ELETRÔNICAS

Todos os componentes eletrônicos devem ser conectados e montados sobre um substrato para que seja obtido um sistema operacional e funcional. Esse substrato, denominado de placa eletrônica, deve conter as ilhas, nos quais são conectados elétrica e mecanicamente os componentes, e os circuitos, nos quais ocorre a transmissão de sinal elétrico. As conexões e os componentes são baseadas no projeto e funcionalidade do produto final, levando em conta aspectos como dissipação de calor e blindagem eletrostática. Outra característica importante a ser observada no substrato são as propriedades mecânicas e térmicas, pois, ao decorrer do processo da montagem dos componentes, a placa sofrerá exposição a altas temperaturas e a esforços termomecânicos. (LADOU, 2006)

Os materiais utilizados para a fabricação de uma PCI (placa de circuito impresso) podem ser divididos em dois grandes grupos: o sistema resinoso (incluindo aditivos) e o condutor. O material resinoso mais utilizado pela indústria eletrônica é o FR4, que é composto laminado constituído por mantas de tecido de fibra de vidro impregnado com resina epóxi. Sua popularidade deve-se as boas propriedades físicas e mecânicas para a maioria das aplicações. Já o material condutor utilizado é cobre, devido à alta condutividade elétrica, que é imprescindível para essa aplicação (MENDES, 2009). A Figura 2 mostra esses dois grupos na forma de laminados para a formação da PCI.

Figura 2 - Camadas da PCI e a junção por pressão e temperatura.



Fonte: (MAXFIELD, 2009)

O material condutor, além da transmissão dos sinais pelas trilhas internas da placa eletrônica, também serve de base para a interconexão entre o componente eletrônico e a PCI. Para que seja realizado essa junção, as ilhas existentes na placa onde os componentes serão interligados, deverão estar expostos para que seja possível montar o componente. Conforme já explicitado, condutor utilizado em placas é o cobre, o qual possui um elevado potencial de oxidação e por isso reage com o oxigênio presente na umidade do ar atmosférico e forma, espontaneamente, uma camada óxida sobre a superfície. Este filme óxido causa dificuldades no estabelecimento de uma interconexão elétrica e mecânica coesa, gerando baixa confiabilidade nos produtos eletrônicos (ARFAEI, 2010; GÖRLICH; BAITHER; SCHMITZ, 2010; KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014; ZHANG; SUN; SHANG, 2007). Concomitantemente à problemática do filme óxido, o cobre possui alta dissolução nas ligas de solda no estado fundido, isso gera a precipitação de compostos intermetálicos frágeis durante a solidificação. Apesar de estes compostos sejam consequência para o estabelecimento da interconexão, em excesso causam extrema fragilidade, ocasionando falhas nas placas eletrônicas. (MITA et al., 2005; STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Para superar essas dificuldades ocasionadas pela camada passiva, são utilizados revestimentos sobre as ilhas. Sendo assim, estes se tornam uma parte importante durante o processamento, já que interagem com os materiais na formação da interconexão.

2.1.1. Revestimentos de placas eletrônicas

Conforme supracitado, o revestimento sobre o cobre exposto nas ilhas dos terminais da placa eletrônica é necessário para garantir a soldabilidade, boas propriedades e possibilitar o retrabalho da interconexão. Porém, a garantia do processo de montagem não é o único requisito necessário, a camada deve atender as condições: elétricas, de durabilidade, confiabilidade, ambientais e também o custo associado a cada tipo de revestimento.

Alguns tipos de revestimentos utilizados em placas eletrônicas estão listados a seguir, incluindo algumas características dos mesmos:

1. HASL (*Hot Air Solder Level* – Nivelamento de Solda por Ar Quente):

No processo de aplicação desse revestimento, o cobre exposto, na placa de circuito impresso, é limpo com agentes que removem o filme

óxido para que então a placa seja imersa em um banho de solda líquida. Após essa etapa, a PCI é submetida a um fluxo de ar quente para que haja um nivelamento da camada aplicada.

2. ENIG (*Electroless Nickel Immersion Gold* – Imersão de Ouro sobre Níquel Eletrolítico):

Neste recobrimento, uma camada com espessura entre 3 e 5 μm de níquel eletrolítico é depositada sobre o cobre dos terminais através de catalisadores, como paládio e rutênio. Então é feito o depósito da camada de ouro através de deslocamento galvânico, objetivando uma camada de até 0,15 μm . Esse elemento é altamente recomendado devido à sua alta resistência a oxidação, porém pode causar fragilidade na junta de solda se a camada for muito espessa.

3. *Electroless Palladium* (Paládio Eletrolítico):

Esse revestimento surgiu como alternativa ao ENIG por substituir o ouro, que possui alto custo, com paládio, o qual possui a resistência a oxidação similar aos metais nobres. No entanto, o paládio é um material muito difícil de depositar, logo gera dificuldades e falhas durante o processamento.

4. OSP (*Organic Solderability Preservative* – Acabamento Orgânico que Preserva a Solderabilidade):

Trata-se de uma cobertura orgânica que reage com a superfície do cobre, formando uma camada monomolecular que preserva a superfície contra a oxidação. Essa proteção é removida devido a processos térmicos durante a soldagem dos componentes na placa eletrônica.

É válido ressaltar que existem outros tipos de revestimentos que não serão expostos, como: estanho, prata, SnPb refundido, imersão direta em ouro, dentre outros. Mais informações sobre este assunto podem ser encontrados em (COOMBS; HOLDEN, 2007).

Conforme exposto, muitos materiais podem ser utilizados na proteção do cobre para que seja possível a soldagem de componentes e tornar a PCI um produto funcional. Porém, durante o processo de soldagem, o material fundido entrará em contato com o revestimento, podendo reagir e formar compostos com o mesmo, conforme exposto no Quadro 1. Esses compostos interfaciais se fazem muito importante nos termos de condutividade elétrica e resistência mecânica para a confiabilidade do produto, por isso serão tratados em outra seção.

Quadro 1 - Tipos de revestimento de PCIs e algumas características.

	HASL	OSP	ENIG	Pd	Sn
Planicidade	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Composto Formado	Cu-Sn	Cu-Sn	Ni-Sn	Ni-Sn	Cu-Sn
Processos de Refusão	6	2-4	6	6	2-3
Vida útil (meses)	18	6	24	24	6

Fonte: (COOMBS; HOLDEN, 2007)

2.2. COMPONENTES ELETRÔNICOS

Os componentes eletrônicos, além da placa de circuito, são fundamentais na obtenção de um produto funcional. Há inúmeros tipos de componentes com funções específicas, porém, dentro do contexto deste trabalho, eles serão divididos em dois grupos relacionados ao tipo de tecnologia de montagem: THT (*Through Hole Technology* – Tecnologia Através de Furo) e SMT (*Surface Mount Technology* – Tecnologia de Montagem de Superfície).

Nos componentes THT, a montagem dos componentes se dá através da passagem dos seus longos terminais por furos metalizados na placa, para a posterior formação da interconexão, conforme mostrado na Figura 3. Essa tecnologia de componentes possuem as seguintes vantagens: fáceis de testar, possuem alta resistência mecânica, fácil de serem retrabalhados, possibilitam a conexão com as trilhas internas da placa e dissipam o calor gerado durante a operação mais rapidamente. No entanto, o *hardware* para sistemas muito complexos se torna fisicamente grande, dificultando a miniaturização. (COOMBS; HOLDEN, 2007; LOPEZ-BUEDO; BOEMO, [s.d.]

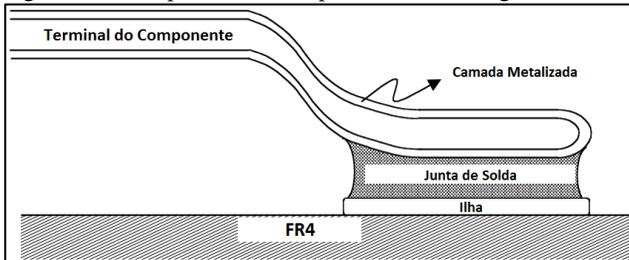
Figura 3 - Exemplo de um componente TH.



Fonte: (IPC-A-610D, 2005)

Na tecnologia de montagem em superfície (SMT) os componentes são unidos às placas através das ilhas existentes na superfície da mesma, conforme mostrado na Figura 4. Essa tecnologia tem como vantagens: miniaturização de componentes e, por consequência, do sistema eletrônico, facilidade de automatização, rapidez e precisão na montagem. No entanto, devido ao tamanho diminuto de parte dos componentes, o retrabalho manual é dificultado, podendo causar problemas de repetitividade e confiabilidade. (COOMBS; HOLDEN, 2007; LOPEZ-BUEDO; BOEMO, [s.d.]; TU, 2007)

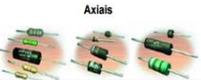
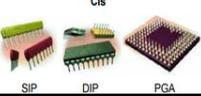
Figura 4 - Exemplo de um componente de montagem sobre superfície.



Fonte: (TU, 2007)

Diversos tipos de componentes e funções estão dentro destas duas tecnologias de montagem, na Figura 5 estão exemplificados os principais tipos.

Figura 5 - Exemplos de componentes das duas tecnologias de montagem.

Componentes - SMT		Componentes - THT	
 <p>Chips, MELFs (Metal Electrode Face) e SOTs (Small Outline Transistors) - Componentes menores que 20 mm.</p>		 <p>Axiais – componentes com dois terminais laterais (“braços”).</p>	
 <p><i>Fine Pitches</i> componentes com terminais em linhas paralelas muito próximas (0,5 – 1,0 mm). Estes componentes geralmente possuem quatro estilos de terminais: <i>Gull Wing Lead</i> (terminais em forma de asas), <i>J-Lead</i> (J-terminais), <i>Flat Lead</i> (terminais planos) ou <i>I-Lead</i> (I-terminais).</p>		 <p>Radiais – componentes com dois ou mais terminais estendidos da base (“pernas”).</p>	
		 <p>CIs (Circuito Integrado) – componentes com terminais em linhas paralelas. Dependendo da configuração de seus terminais estes são classificados como: <i>SIP</i> (<i>Single-in-line</i> – linha simples), <i>DIP</i> (<i>Dual-in-Line</i> – linha dupla) ou <i>PGA</i> (<i>Pin Grid Array</i> – matriz de pinos).</p>	
 <p>BGAs (<i>Ball Grid Array</i> – matriz de bolas) – componentes com os terminais dispostos por uma matriz de pontos em forma de bolas na sua base.</p>		 <p>Diversos – componentes com formatos e terminações distintas.</p>	

Fonte: (DORO, 2004)

2.2.1. Revestimentos de componentes eletrônicos

Conforme já exemplificado para as placas eletrônicas, os terminais dos componentes eletrônicos também possuem revestimento (metalização) para facilitar e garantir a formação da conexão com boas propriedades e confiabilidade.

Antes das diretivas ambientais que visam eliminar substâncias nocivas à saúde, incluindo o chumbo, grande parte dos componentes possuíam metalização baseada na liga binária Sn-Pb. Esta liga era largamente utilizada, possuindo como vantagem a alta molhabilidade e alta confiabilidade do produto final.

Entretanto, devido à necessidade de adequação às diretivas, destacando-se a RoHS (*Restriction of Certain Hazardous Substances* – Restrição ao Uso de Substâncias Perigosas), novas alternativas para atender o mercado foram implementadas. Metalizações utilizando: níquel/paládio, níquel/ouro, prata/platina, prata/paládio, estanho puro e níquel, estão sendo utilizadas para este fim. (STALTER; PUTTLITZ, 2004)

As diferentes metalizações, tanto dos componentes quanto das placas eletrônicas, são utilizadas para evitar falhas da interconexão e promover a solderabilidade entre componentes e placa eletrônica. Conforme já exposto, a taxa de dissolução se faz muito importante para a confiabilidade da junta de solda. Conforme mostrado no Quadro 2, temos que a dissolução do ouro e cobre é muito alta se comparada com o níquel

e paládio, por isso grande parte das metalizações utilizam estes dois últimos elementos para evitar o excesso de compostos intermetálicos frágeis.

Quadro 2 - Taxa de dissolução de diferentes metalizações na liga eutética Sn-Pb.

Metal	Taxa de Dissolução, μm/seg (215°C)	Taxa de Dissolução, μm/seg (250°C)
Ni	<0,0005	0,005
Pd	0,00175	0,07
Cu	0,08	0,1325
Au	1,675	4,175

Fonte: (STALTER; PUTTLITZ, 2004)

É válido e importante ressaltar que a metalização de estanho puro possui uma grande questão associada, que é o surgimento de finos *whiskers*, os quais surgem dos terminais e podem crescer até atingir outro terminal, causando curto-circuito. Diferentes trabalhos já apontaram esse problema associado à essa metalização, por isso são adicionados elementos, incluindo o chumbo, para evitar esse fenômeno. (ASHWORTH et al., 2015; CHASON et al., 2013)

Tendo isso em vista, é importante ressaltar que além da escolha dos materiais das metalizações, os parâmetros de processo de montagem influenciam nas propriedades das juntas de solda dos componentes na placa eletrônica, conforme será abordado em tópicos posteriores.

2.3. MONTAGEM DE PLACAS ELETRÔNICAS

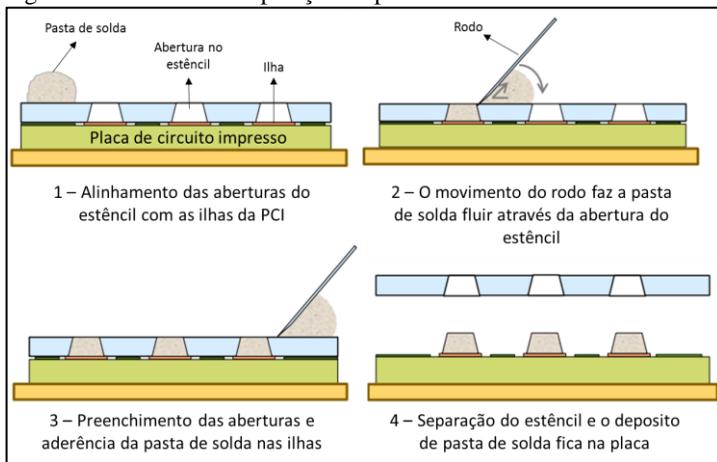
As etapas do processo de montagem das placas eletrônicas são dependentes do tipo de componente a ser montado na mesma. Conforme já apresentado, existem dois tipos principais de tecnologia de componentes: SMT e THT, para melhor ilustrar as etapas, elas serão divididas para cada tecnologia.

2.3.1. Processo de montagem SMT

A primeira etapa do processo de tecnologia de montagem sobre a superfície é a deposição da pasta de solda nas ilhas da placa eletrônica. A pasta de solda consiste em um sistema com partículas metálicas, com composição da liga desejada, e uma combinação de outros materiais, como: resinas, ativadores, aditivos reológicos e solventes, estes são

chamadas de fluxo de solda. A deposição desse material é normalmente feita pelo processo de impressão serigráfica, no qual um rodo pressiona e espalha a pasta de solda sobre uma tela metálica vazada (estêncil) conforme a ilhas existentes na placa, assim ocorre a deposição da pasta somente sobre as ilhas da placa. Este processo está esquematizado na Figura 6.

Figura 6 - Processo de deposição de pasta de solda.



O processo de montagem é sequenciado pela inserção dos componentes. Estes são inseridos de maneira automática, isto é, através de uma máquina programada para inserir o componente conforme a posição e polaridade, caso haja, previstos no projeto da placa eletrônica. A inserção automática dos componentes possui como vantagens: alta produtividade, precisão de montagem e facilidade com componentes de tamanhos diminutos.

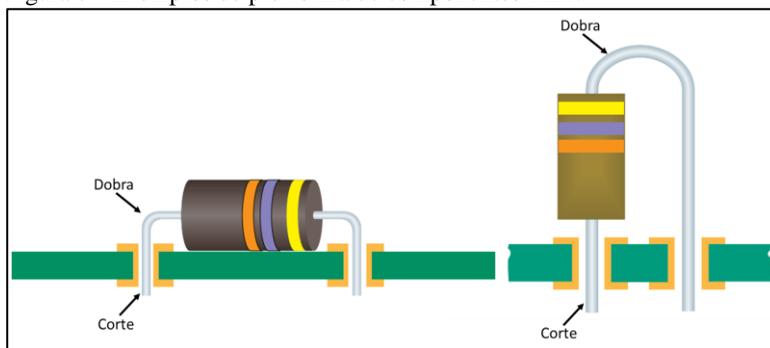
Em continuação ao processo, segue-se pela etapa de refusão, na qual ocorrerá a formação da junção mecânica e elétrica do componente com a PCI. Nessa fase, a placa é aquecida em um forno de refusão, passando por diferentes patamares de temperatura para que ocorra a evaporação de solventes e evita choque térmico (pré-aquecimento), ativação do fluxo (desgaseificação), fusão das partículas metálicas (refusão) e o resfriamento, consolidando a interconexão. É válido ressaltar que o perfil térmico depende dos componentes que são montados, do tipo de pasta de solda, número de camadas existentes na

placa e da própria dimensão da placa. Maiores detalhes deste processo pode ser encontrado em (DORO, 2004).

2.3.2. Processo de montagem THT

A rota de montagem dos componentes com tecnologia através de furos inicia com a pré-forma dos componentes, esse processo consiste na dobra e corte de terminais, conforme o leiaute da PCI, exemplificado na Figura 7. Esta etapa é importante para facilitar o processo de inserção, garantir os requisitos exigidos nas normas da indústria eletrônica e por consequência evitar introduzir defeitos nos terminais do componente.

Figura 7 - Exemplos de pré-forma de componentes THT.



Fonte: (IPC-A-610D, 2005)

Após a pré-forma, os componentes são inseridos nos furos metalizados da placa eletrônica, conforme a sua posição específica para o correto funcionamento do produto. A inserção é normalmente feita de forma manual em decorrência das diferentes geometrias dos componentes, além do custo envolvido com maquinário de inserção automática bem como o tempo de programação necessária.

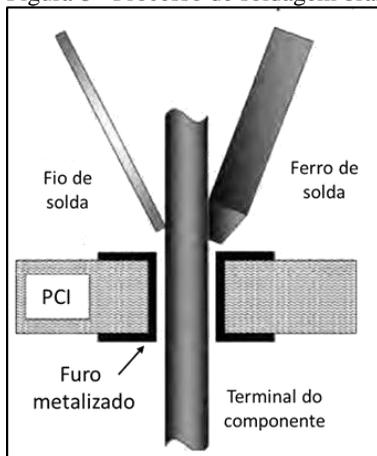
Em seguida, a placa deve passar pelo processo de soldagem branda, que pode ocorrer de forma manual ou automática.

2.3.2.1 Processo manual

No processo manual, é aplicado fluxo, na forma de pasta, nos terminais do componente e então é aproximado um equipamento com ponta aquecida, chamado de ferro de solda, o qual irá transferir calor para o terminal do componente e para o fio de solda, que possui a composição

química da solda desejada. Com a troca de calor, o fluxo é ativado para promover a soldabilidade e o fio de solda entra em estado líquido, preenchendo o furo garantindo a interconexão entre o componente e a placa. Essa técnica, como o nome já especifica, é feita manualmente e por isso depende muito da habilidade de quem está fazendo o processo, isso faz com que a repetitividade e reprodutibilidade não sejam garantidas, e por consequência, a confiabilidade do produto é prejudicada. A Figura 8 mostra esquematicamente os elementos da soldagem manual.

Figura 8 - Processo de soldagem branda THT manual.



Fonte: (COOMBS; HOLDEN, 2007)

2.3.2.1 Processo automático

Quanto ao processo automático de soldagem de componentes THT, há três principais etapas: aplicação do fluxo, pré-aquecimento e soldagem. Na primeira, o fluxo é projetado, através de spray ou bico dosador com vazão controlada, para a superfície da placa em que ocorrerá a soldagem, molhando principalmente os furos metalizados e os terminais do componente.

O pré-aquecimento, assim como no processo de refusão, tem como função aquecer a placa e os componentes a fim de evitar o choque térmico quando entrarem em contato com a solda fundida e também de ativar o fluxo. Neste estágio há evaporação de compostos voláteis, os quais poderiam gerar vazios na interconexão, e ativação das reações entre o fluxo e os óxidos. Essas reações removem a camada de óxidos leves

existentes nos terminais dos componentes e nos furos metalizados da PCI, tendo como consequência a melhora da soldabilidade.

Na última etapa do processo automático, a liga de solda no estado líquido é projetada, através de um bocal, contra a face contrária à de montagem dos componentes THT da placa eletrônica. Isso faz com que a solda “molhe” os terminais dos componentes e da placa, e também com que flua através dos furos metalizados pela força capilar.(COOMBS; HOLDEN, 2007)

É válido ressaltar que a solda no estado fundido fica armazenada em um reservatório com controle de temperatura e que a altura da projeção durante a soldagem é controlável.

Existem duas técnicas principais de soldagem THT de forma automática: soldagem por onda e soldagem por onda seletiva. Devido à sua importância e relevância para o desenvolvimento desse trabalho, elas serão abordadas em maiores detalhes.

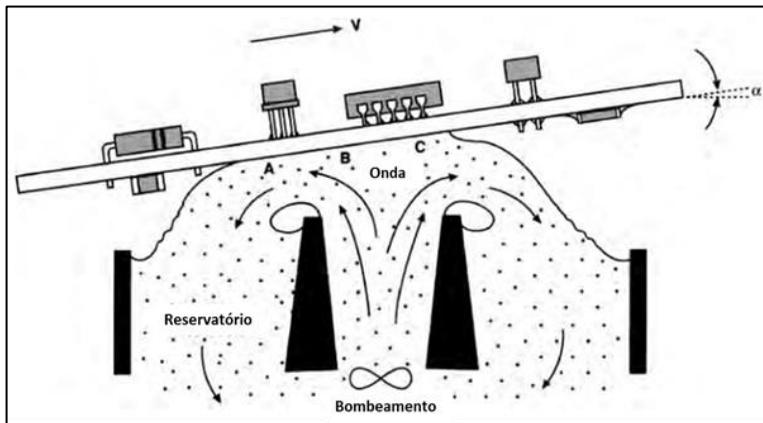
2.3.2.1.1 Soldagem por onda

Nesse processo, a placa eletrônica após a inserção dos componentes THT, é colocada em uma esteira com movimento constante passando tangencialmente pelas zonas onde ocorrem as três principais etapas do processamento. Durante a aplicação do fluxo, a vazão deste pode ser controlada, porém toda a superfície da placa será molhada, incluindo as regiões que não serão soldadas.

Na fase de pré-aquecimento, a energia é transferida através de convecção forçada e irradiadores térmicos, tendo como objetivo atingir temperaturas necessárias para ocorrer a ativação do fluxo utilizado.

Na etapa de soldagem, conforme já descrito, o material no estado líquido é projetado contra a face da placa eletrônica com altura programável, sendo assim toda a placa será molhada pela solda, conforme mostrado na Figura 9. O tempo de contato é determinado pela velocidade da esteira, não sendo possível adequar esta variável para cada componente ou uma determinada região da PCI.

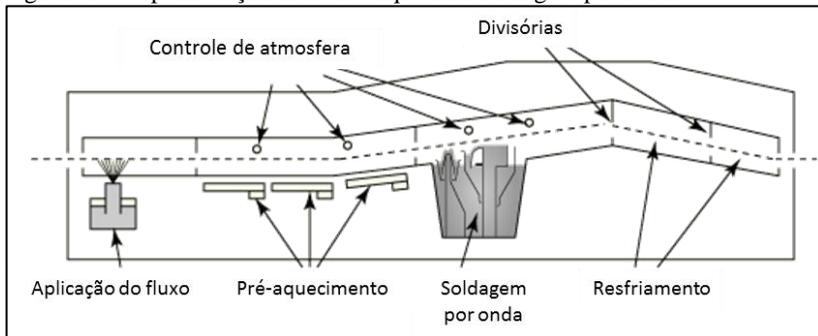
Figura 9 - Diagrama esquemático mostrando a etapa de soldagem no processo por onda.



Fonte: (COOMBS; HOLDEN, 2007)

Cabe ressaltar que as etapas aqui descritas podem ser realizadas em máquinas que possuam o controle de atmosfera, sendo possível colocar gases inertes que evitam a oxidação dos materiais e a degradação antecipada dos agentes presentes no fluxo (STALTER; PUTTLITZ, 2004). Alguns elementos presentes nas máquinas comerciais de solda onda estão esquematizados na Figura 10.

Figura 10 - Representação de uma máquina de soldagem por onda.



Fonte: (COOMBS; HOLDEN, 2007)

As particularidades desse tipo de processamento implicam que projetos de placas com montagem mista, SMT e THT, causem defeitos em componentes SMT com terminais próximos uns dos outros (chamados

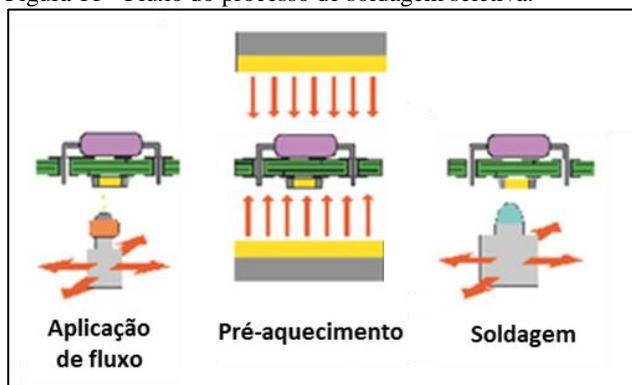
fine pitches) na face que entrará em contato com a solda, devido aos curtos-circuitos que são gerados. Sendo assim, o processo de soldagem por onda fica restrito ao leiaute da placa, tipo e posicionamento de componentes THT e também de SMT, no caso de montagem mista. Estes detalhes serão abordados na seção 2.3.3.

Porém, este processo, em comparação com a soldagem manual, possui grandes vantagens em termos de alta produtividade, maior controle das variáveis e repetitividade.

2.3.2.1.1 Soldagem por onda seletiva

Neste processo, alternativo à soldagem por onda, as três etapas principais, mostradas na Figura 11, também ocorrem, porém com diferenças no controle das variáveis existentes. Iniciando pelo processo de aplicação de fluxo, é possível programar a aplicação somente nos furos metalizados/terminais dos componentes THT. Para isso, a placa fica estática em uma determinada posição da máquina e os pontos de aplicação são determinados por coordenadas previamente programadas para aplicação do fluxo. Assim como no processo por onda, a vazão do fluxo também pode ser controlada para cada coordenada, isso é, para diferentes componentes na mesma placa podem-se programar diferentes vazões de fluxo, conforme a necessidade. Em decorrência desses fatores, a etapa de aplicação do fluxo necessita mais tempo de processo e maior tempo de programação em relação ao processo por onda.

Figura 11 - Fluxo do processo de soldagem seletiva.



Fonte: (ERSA, [s.d.]

No processo subsequente, a placa é aquecida através de irradiadores térmicos com potência variável, até a temperatura de ativação do fluxo, conforme especificado pelo fabricante do mesmo. Assim como na etapa anterior, durante o pré-aquecimento a PCI fica estática em relação à máquina. O tempo desta etapa é diretamente controlado, diferentemente do processo por onda que é através da relação entre a velocidade da esteira e o comprimento da zona de pré-aquecimento da máquina.

Na última fase do processo, a solda em estado fundido é projetada contra a face da placa eletrônica através de um bocal, o qual é uma peça substituível e com em variadas dimensões conforme a necessidade, conforme mostrado na Figura 12. Assim como na aplicação do fluxo, o contato da solda com a placa é localizado e programado, baseado nas dimensões do bocal e nas coordenadas dos componentes. Conforme os tipos de terminais dos componentes, é possível programar a soldagem para que seja feita em linha, ponto e em formatos mais complexos, como curvas em forma de “C” ou “S”. A velocidade de aproximação, de movimento relativo e de separação entre o bocal e a placa podem ser programados, incluindo também o tempo de permanência em uma determinada posição e a altura de projeção de solda para um componente específico.

Figura 12 - Diferentes bocais que podem ser utilizados em máquinas de soldagem seletiva.



Fonte: (ERSA, [s.d.])

Assim como no processo de soldagem por onda, há possibilidade de realizar as etapas com atmosfera controlada. Isso facilita o processo de

soldagem, e contribui para diminuir a perda de material de solda, nos tanques de armazenamento, pela formação de escória.

Com esta técnica de processamento, os parâmetros de soldagem de cada componente possam ser variados, adequando-os para cada situação. Assim como na etapa de aplicação de fluxo, dependendo da quantidade de componentes, a fase de soldagem pode ocorrer em um tempo maior, considerando em termos de produtividade e programação, se comparada com as outras técnicas. A soldagem seletiva, por ser uma técnica relativamente nova, não está amplamente inserida na indústria de montagem de placas eletrônicas, assim como os outros dois processos. Isso faz com que a potencialidade deste processo não seja tão difundida e estudada. (KLENKE, 2002)

Porém, este método possui uma maior flexibilidade em termos de leiaute, principalmente com montagem mista, conforme será abordado posteriormente. Cabe ressaltar que um estudo foi realizado pela empresa ERSA Inc. no intuito de avaliar os custos envolvidos entre os processos automáticos de soldagem branda de componentes THTs, e o resultado apontou que o uso de máquinas de soldagem seletiva traria uma redução nos custos de: energia elétrica, consumo de fluxo, perda de solda devido à oxidação, uso de nitrogênio. Todos esses fatores econômicos estão aliados ao tamanho reduzido da máquina de solda seletiva em comparação com a solda por onda e também ao uso inteligente dos consumíveis somente nas áreas realmente necessárias para a montagem. (KLENKE, 2002)

O Quadro 3 resume algumas características dos principais processos de soldagem de componentes THT já descritos.

Quadro 3 - Comparativo entre as principais técnicas de soldagem de componentes THT.

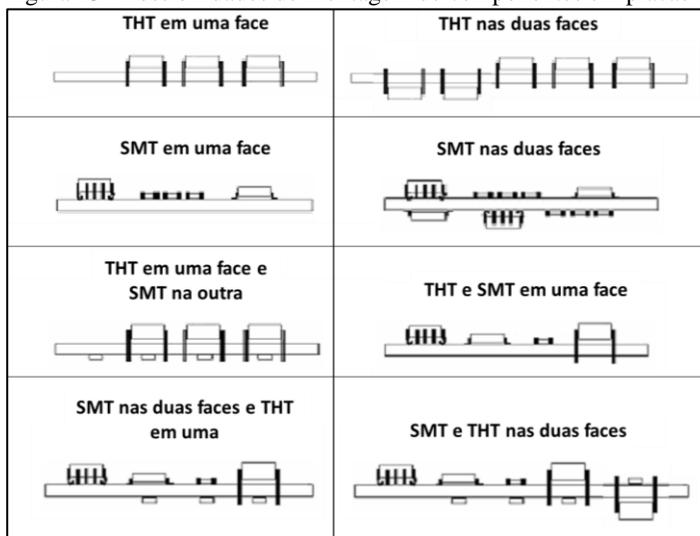
Processo	Vantagens	Desvantagens
Soldagem manual	Soldagem pontual; Baixo custo com equipamentos	Baixa repetitividade e reprodutibilidade; Baixa produtividade
Soldagem por onda	Alta produtividade; Controle de parâmetros	Limitação de projetos e componentes; Alta exposição da PCI ao metal fundido
Soldagem seletiva	Maior número de parâmetros e controle destes; Grande flexibilidade de projetos e componentes; Área da PCI exposta ao metal fundido é variável	Tempo de programação; Produtividade intermediária; Tecnologia relativamente nova

Fonte: Autor

2.3.3. Processo de montagem mista

Devido ao grande número de aplicações de produtos eletrônicos e os requisitos desses, em muitos casos é necessário utilizar os dois tipos de tecnologia de montagem combinados em uma só PCI. Deste modo, há diferentes combinações possíveis, algumas delas estão apresentadas na Figura 13. Deste modo, diferentes rotas de montagem podem ser adotadas, entretanto é de extrema relevância que o projeto da PCI seja feito pensando na facilitação dos processos de montagem. Com essas precauções tem-se o intuito de evitar operações manuais, a escolha de componentes de acordo com as etapas de montagem e garantir a qualidade do produto final.

Figura 13 - Possibilidades de montagem de componentes em placas eletrônicas.

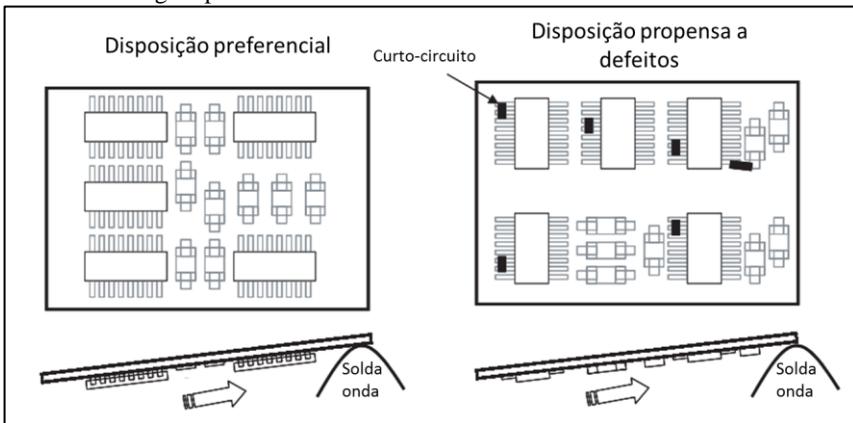


Fonte: Adaptado de (DORO, 2004)

Nas placas com montagem mista, o processo normalmente é iniciado pelos componentes SMT para que depois ocorra a montagem dos THTs. Se a placa possuir ambas tecnologias de montagem na mesma face, não haverá impedimentos para que sejam usados os três processos de soldagem dos THTs já citados, sendo assim, fatores como produtividade, custos, repetitividade e qualidade serão os fatores a serem levados em consideração. No entanto, se a placa possui SMT em ambos os lados e THT em um ou ainda em ambos, parâmetros como: alinhamento de componentes, distância entre terminais, temperatura máxima a que podem ser submetidos passam a ser relevantes e limitadores de processos (BOEY; WALKER, 1986).

A Figura 14 exemplifica a influência do alinhamento dos componentes SMTs durante o processo de soldagem por onda em montagem mista. Os defeitos de curtos-circuitos ocorrem também em componentes com pequena distância entre os terminais, como por exemplo BGAs e CIs. Os defeitos gerados exigem etapas de retrabalho, podendo ser manual, em casos simples como CIs, ou automatizados com necessidade de equipamentos robustos em casos como em BGAs.

Figura 14 - Influência do alinhamento e disposição dos componentes SMT durante a soldagem por onda.



Fonte: (IPC-2221A, 2003)

Tendo esses fatores expostos, é ideal adotar processos de montagem automáticos e flexíveis, que garantam a boa qualidade sem etapas adicionais de retrabalho. Estas questões se fazem ainda mais importantes em indústrias de pequenas séries, nas quais os processos de montagens são realizados com variados modelos e leiaute de placas eletrônicas.

2.4. LIGAS DE SOLDAGEM BRANDA

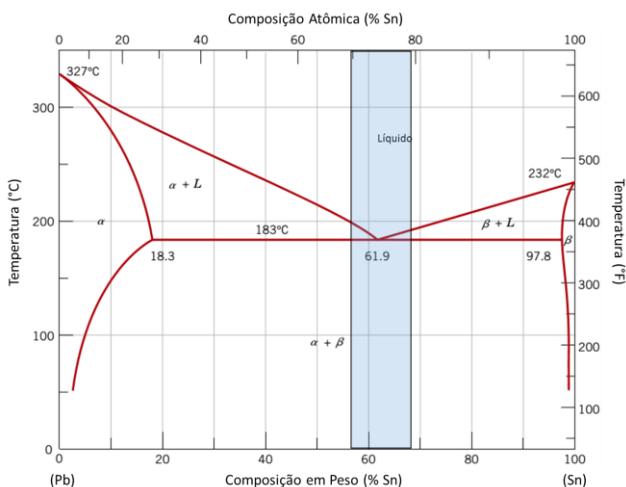
Juntamente com os processos de montagem, as ligas de solda são determinantes para otimização dos parâmetros dos processos, bem como as propriedades finais das juntas de solda. Para melhor entendimento, serão abordados neste tópico as duas principais famílias de ligas utilizadas na indústria eletrônica: ligas binárias de estanho e chumbo (Sn-Pb) e as ligas ternárias de estanho, prata e cobre (SAC)

2.4.1. Ligas Sn-Pb

As ligas baseadas em estanho em chumbo foram largamente empregadas desde o início da indústria eletrônica. O papel dessas ligas durante a miniaturização, associada ao alto volume do processo e baixo custo dos elementos, fizeram com que seu uso ficasse muito popular. Além desses fatores, o molhamento dessas ligas é alto e as temperaturas de processo são mais baixas, quando comparadas com outras ligas, o que

implica na boa processabilidade. A Figura 15 mostra o diagrama de fases da liga Sn-Pb e, em destaque, a principal faixa de composição utilizada, a qual permeia o ponto eutético. (BOARETO, 2012)

Figura 15 - Diagrama de fases em equilíbrio de Sn-Pb. A região destacada indica a faixa típica de composições utilizadas para interconexão entre componentes e a PCI.



Fonte:(BOARETO, 2012)

Entretanto, diretivas ambientais tem como objetivo eliminar o uso de algumas substâncias nocivas e, entre estas, está o chumbo. A diretiva RoHS (*Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical e electronic equipment*), a qual é muito difundida, principalmente na Europa, afeta principalmente os equipamentos eletrônicos de consumo e eletrodomésticos. Isso fez com que novas alternativas e investigações fossem realizadas para achar ligas de solda que garantissem as propriedades tão boas ou melhores que as baseadas em chumbo. (GOOSEY, 2008)

É importante ressaltar que apesar da existência dessa diretiva, equipamentos empregados na indústria aeronáutica, militar e médica, nas quais a falha pode gerar consequências catastróficas, ainda são aplicadas as ligas de Sn-Pb. Isso é decorrente das boas características da liga, incluindo a resistência e confiabilidade. (BOARETO, 2012; KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014)

No cenário brasileiro atual, as ligas com chumbo ainda são empregadas em diversos setores. Contudo, a necessidade de exportação para países onde essa diretiva já está em estágio avançado, faz com que tenhamos um cenário misto, isso é, ligas com e sem chumbo são utilizadas na indústria de montagem de placas eletrônicas. (ALMEIDA; MADUREIRA, 2013)

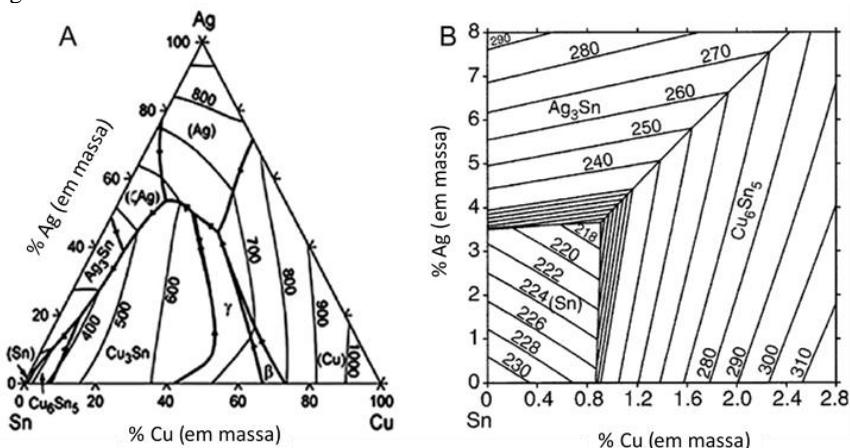
2.4.2. Ligas SAC (Sn-Ag-Cu)

Conforme já apresentado, a problemática envolvendo o uso de chumbo fez, e ainda faz, com que novos desenvolvimentos e mudanças na indústria eletrônica sejam realizados. Nesse processo de desenvolvimento de novas ligas à base de estanho, os elementos que são adicionados devem possuir as seguintes características (ABTEW; SELVADURAY, 2000; KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014):

- Diminuir a tensão superficial do Sn, aumentando a molhabilidade;
- Permitir uma rápida formação de compostos intermetálicos entre a liga de solda e substratos;
- Manter a temperatura de processo próximo aos valores da liga Sn-Pb;
- Melhorar as propriedades da junta de solda (fluência, fadiga termomecânica, entre outras);
- Prevenir a ocorrência de *whiskers* de estanho.

Dentre as várias possibilidades, a composição eutética, ou próximas à essa, de Sn-Ag-Cu são identificadas como as principais ligas candidatas à substituição da tradicional Sn-Pb. O diagrama de equilíbrio ternário para essas ligas é apresentado na Figura 16a, e na Figura 16b é mostrado a região rica em estanho, que são as ligas utilizadas para soldagem branda. (KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014)

Figura 16 - (a) Diagrama ternário de equilíbrio Sn-Ag-Cu e (b) ampliação da região rica em estanho.



Fonte: (KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014)

Essas ligas ternárias tendem a apresentar boa resistência mecânica e ductilidade, porém essas características são fortemente dependentes do tamanho de grão, orientação cristalográfica dos grãos, os precipitados existentes na matriz e também dos compostos intermetálicos provenientes da reação com a liga de solda com os materiais de base. Além da composição química, os parâmetros de processo são importantes devido à influência que exercem na microestrutura e por consequência, nas propriedades da junta de solda. (ARFAEI, 2010; ARFAEI; KIM; COTTS, 2011; KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014)

Apesar dessas ligas apresentarem essas potencialidades, elas possuem características que dificultam o seu uso. Comparando a temperatura de fusão da liga eutética Sn-Pb, que é 183°C, com a eutética ternária (Sn-3,8Ag-0,7Cu), a qual é, aproximadamente, 217°C, temos um aumento de 34°C. Esse aumento também acontece com a temperatura de processo, isso resulta na necessidade de readequação dos materiais constituintes das PCIs e também dos componentes, para suportarem esse aumento de temperatura sem que ocorra degradação.

Outro ponto negativo apresentado pelas ligas SAC é com relação à molhabilidade. Essas ligas no estado líquido apresentam menor molhabilidade e espalhamento, nos substratos utilizados na indústria eletrônica, em relação à Sn-Pb. Isso é decorrente da alta tensão superficial apresentada pelo estanho, que está em maior concentração nas ligas

SnAgCu. (AMORE et al., 2008; FU; CHEN, 2011; KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014; WEDI; BAITHER; SCHMITZ, 2011)

2.4.3. Ligas SACX

No intuito de sanar os pontos negativos apresentados pelas ligas SAC, novas composições com adição de elementos estão sendo estudadas. Estas ligas são denominadas SACX, onde o X pode representar diferentes dopantes (Ex: Bi, In, Ni, La, Mg, Mn, Ce, Co, Ti, Zn dentre outros), que são adicionados no intuito de conferir melhora na resistência ao choque mecânico, aumentar o molhamento, diminuir a cinética de crescimento de compostos intermetálicos frágeis, além de alterar outras propriedades de interesse. (CAI et al., 2010)

Dentre essas ligas, a indústria mostra avanços em ligas comerciais com menor concentração de Ag e com a adição de outro elemento para modificar propriedades de processo e da junta de solda. A menor concentração de prata ocasiona redução de custo de matéria-prima, porém as temperaturas de processo aumentam pelo afastamento da composição química do eutético ternário.

Para tal, tem-se como exemplo a liga utilizada neste trabalho, a liga SACX0307, a qual possui: 0.3%Ag, 0.7%Cu e como elemento modificador o bismuto, na concentração de 0.1%. A adição de Bi faz com que a dissolução de cobre seja diminuída, se comparada com a liga de composição eutética SAC, o que diminui a formação excessiva de compostos frágeis durante o processo de soldagem branda e diminui a necessidade de controle de composição química do banho de solda dos processos de montagem de componentes THT. (BRANZEI et al., 2013; KANLAYASIRI; SUKPIMAI, 2016; SURASKI; SEELIG, 2006)

Entretanto, no intuito de superar essas adversidades, estudos com diferentes composições químicas e parâmetros de processo se fazem necessários para garantir a processabilidade durante a montagem das placas eletrônicas. Concomitante a estes trabalhos, investigações dos sistemas metalúrgicos existentes entre as ligas de solda e os substratos, avaliando as reações, criação de novas fases e as propriedades geradas pela reação desses materiais, são importantes para garantia da confiabilidade do produto eletrônico. (ARFAEI; KIM; COTTS, 2011; GÖRLICH; BAITHER; SCHMITZ, 2010; LABIE; RUYTHOOREN; VAN HUMBEECK, 2007; RIZVI; LU; BAILEY, 2009; SHEN; CHAN; LIU, 2009; YANG et al., 2014)

2.5. METALURGIA DA SOLDAGEM BRANDA

Neste tópico serão apresentados os principais conceitos para formação da interconexão eletrônica, mostrando o efeito do ângulo de molhamento no processamento e as reações que ocorrem entre o material da liga de solda e dos terminais do componente e da placa eletrônica.

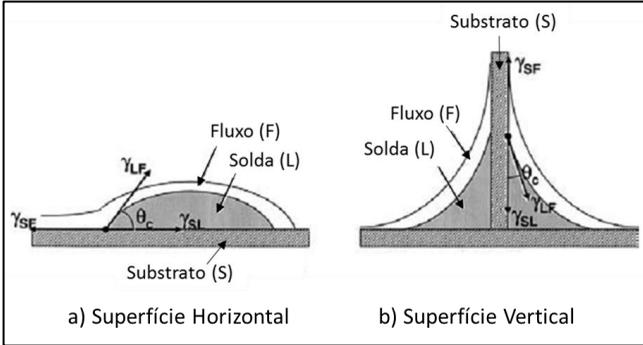
2.5.1. Ângulo de molhamento

O molhamento está relacionado com a capacidade de um líquido de aumentar a área de contato com uma superfície, através do espalhamento desse. No contexto da indústria de montagem de placas, o líquido é a liga de solda no estado fundido e a superfície de contato são os terminais dos componentes e da placa eletrônica. A capacidade da liga de solda “molhar” o terminal está relacionada com as reações na interface no intuito de estabelecer uma ligação entre os materiais, por isso a composição química da liga de solda, dos terminais, a condição da superfície (presença de óxidos) e a presença de fluxo para “limpeza” da superfície (quebra de óxidos existentes e evitar reoxidação) são fatores importantes que afetam a soldabilidade. Essa propriedade está intimamente associada com as tensões interfaciais existentes entre os materiais, a relação entre essas tensões pode ser descrita através da equação de Young (BRACCO; HOLST, 2013; KUMAR; PRABHU, 2007; STALTER; PUTTLITZ, 2004):

$$\gamma_{SF} - \gamma_{SL} = \gamma_{LF} \cos \theta \quad (1)$$

onde: γ_{SF} é a tensão interfacial entre o substrato e o fluxo, o γ_{SL} é a tensão entre o substrato e a liga de solda no estado líquido, γ_{LF} é a tensão interfacial existente entre a liga de solda e o fluxo, e θ é o ângulo de molhamento, conforme demonstrado na Figura 17.

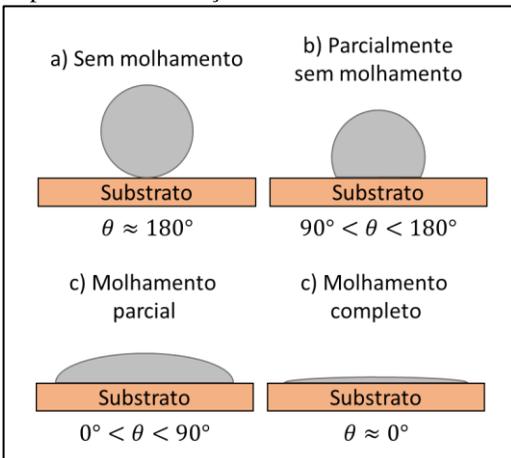
Figura 17 - Diagrama esquemático mostrando as tensões existentes no espalhamento das ligas de solda em uma superfície horizontal (a) e vertical (b).



Fonte: Adaptado de (STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Quanto maior for o molhamento da liga de solda, menor é o ângulo de molhamento, conforme mostrado na Figura 18 em determinadas condições e sua respectiva denominação. Este ângulo de molhamento é um fator crítico na avaliação do desempenho da liga de solda com o substrato, indicando que quanto menor o ângulo há uma tendência de a tendência de adesão seja maior e, conseqüentemente, facilita a formação da junta de solda.

Figura 18 - Representações de diferentes ângulos de molhamentos e a sua respectiva denominação.



Fonte: Autor

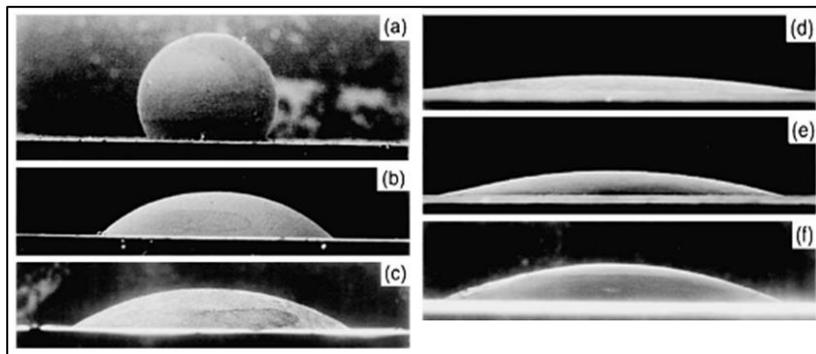
Diversos trabalhos foram realizados no intuito de mensurar o ângulo de contato entre as ligas de solda e substratos de interesse, porém, devido ao grande número de variáveis que influenciam nessa análise, a comparação se torna qualitativa e orientativa. Por isso, para cada sistema, que compreende os materiais utilizados e os parâmetros de teste, deve ser avaliado no intuito de compreender as interações existentes.

Porém é necessário fazer algumas menções a algumas variáveis estudadas em diferentes trabalhos:

1. Composição química da liga de solda:

A composição química da liga binária Sn-Pb foi estudada em termos do ângulo de molhamento em um substrato de cobre. Os resultados mostraram que a adição de estanho, até certa concentração, foi benéfica Figura 19.

Figura 19 - Ângulo de molhamento em função da composição química. (a) Pb puro, (b) 5Sn-95Pb, (c) 10Sn-90Pb, (d) 40Sn-60Pb, (e) 63Sn-37Pb, (f) 80Sn-20Pb.



Fonte: (TU, 2007)

Este resultado mostra que os materiais puros possuem maior tensão superficial, por isso tendem a diminuir o molhamento e conseqüentemente ter um ângulo maior, mostrado também no trabalho de WEDI *et.al.* (TU, 2007; WEDI; BAITHER; SCHMITZ, 2011)

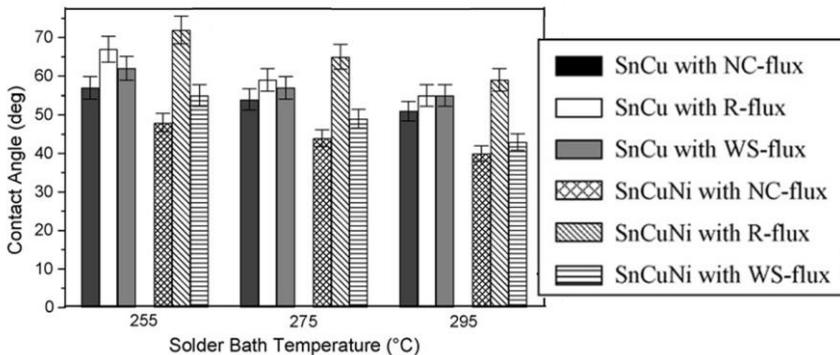
Em decorrência deste mesmo fator, estudos também mostram que as ligas SAC, que possuem alto teor de estanho, apresentam maior tensão superficial. (AMORE *et al.*, 2008; KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014)

Outros resultados com diferentes ligas podem ser encontrados em: (BRACCO; HOLST, 2013; FU; CHEN, 2011; HO; DUH, 2013; KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014; KUMAR; PRABHU, 2007; RIZVI et al., 2007; SATYANARAYAN; PRABHU, 2011; YEO; HAN, 2009)

2. Temperatura da solda:

A temperatura também é um fator que afeta o molhamento entre os materiais. Conforme pode ser visto na Figura 20, o estudo realizado por RIZVI *et.al.* mostrou que o aumento da temperatura causa uma diminuição no ângulo de contato, promovendo o molhamento. Essa dependência foi reportada em função da diminuição da viscosidade do metal líquido e da sua tensão superficial, que facilitaria o processo de espalhamento. (RIZVI et al., 2007; SATYANARAYAN; PRABHU, 2011)

Figura 20 - Efeito da temperatura no ângulo de contato de diferentes ligas e fluxos em um substrato de cobre.



Fonte:(RIZVI et al., 2007)

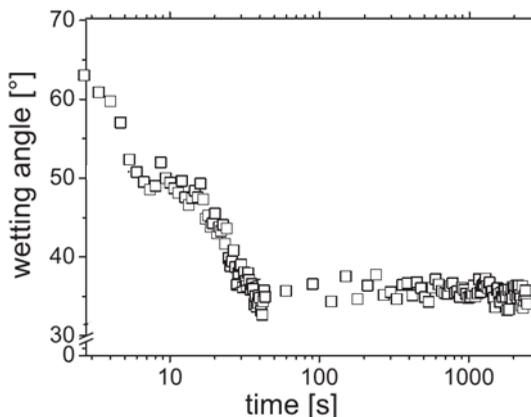
Outros estudos que investigaram a influência da temperatura da liga de solda e o ângulo de contato pode ser encontrado em: (AMORE et al., 2008; KUMAR; PRABHU, 2007)

3. Tempo de contato:

O tempo de contato entre a liga de solda e o substrato pode influenciar no ângulo de contato conforme mostrado na Figura 21, no

estudo realizado por WEDI *et.al.*, que avaliou essa dependência da liga Sn-Pb em substrato de cobre na temperatura de 350°C.

Figura 21 - Influência do tempo no ângulo de contato.



Fonte: (WEDI; BAITHER; SCHMITZ, 2011)

Segundo o autor, logo após a fusão da liga de solda, o material forma uma capa esférica com alto ângulo de molhamento e após um período de incubação, o ângulo diminui quando o equilíbrio de tensões é atingido, a partir do qual fica praticamente em um valor constante. Este comportamento também foi observado por LIANG *et.al.* utilizando estanho puro sobre um substrato de ouro. (WEDI; BAITHER; SCHMITZ, 2011; YIN; MESCHTER; SINGLER, 2004)

4. Material do substrato:

Assim como a composição química da liga de solda afeta o ângulo de molhamento, o material do substrato também possui esse efeito. No trabalho realizado por AMORE *et.al.*, no qual uma liga de solda 95%Sn-5%Cu foi testada em substratos de Cu e Ni em temperaturas entre 600 e 900K (323 e 623°C), foi avaliado que utilizando o cobre o ângulo de molhamento é menor em toda a faixa de temperatura testada. (AMORE *et al.*, 2008).

Outros trabalhos com diferentes substratos podem ser encontrados em: (FU; CHEN, 2011; HO; DUH, 2013; KUMAR; PRABHU, 2007; YEO; HAN, 2009)

2.5.1.1 Relação entre molhamento no processamento de THTs

O molhamento, conforme já citado, se faz muito importante nos processos de consolidação de juntas de solda, tanto para componentes SMTs quanto para THTs. Neste último caso, é ainda mais crítico, pois um maior número de variáveis atua no sistema, como: a diferença de temperatura entre o componente e a solda, altura da projeção da solda em estado líquido contra à placa eletrônica e também a ação da gravidade, a qual age em sentido contrário ao movimento da solda. (AZIZ; ABDULLAH; KHOR, 2014)

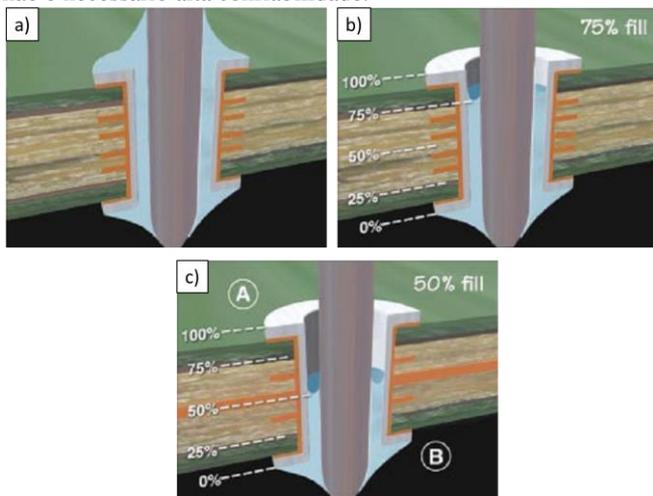
O preenchimento completo (Figura 22 a) dos furos passantes, nos quais os terminais dos componentes THTs são inseridos, é importante para aumentar as propriedades mecânicas e termomecânicas da junta de solda e, em determinadas aplicações, é requisito obrigatório. Esse preenchimento ocorre devido à ação capilar exercida pela solda e pode ser demonstrado através da equação 2 (BRACCO; HOLST, 2013):

$$\cos\theta = 1 - \frac{\Delta\rho gh^2}{2\gamma} \quad (2)$$

onde $\Delta\rho$ é a diferença entre a densidade do líquido e do vapor, g é aceleração da gravidade, h é a altura de preenchimento do líquido, γ é a tensão superficial do líquido e θ é o ângulo de contato.

Como é possível perceber pela análise da equação, um menor valor no ângulo de molhamento facilita o preenchimento dos furos metalizados. A diminuição da tensão superficial da liga de solda também facilita, o processamento, conforme já citado anteriormente e de acordo com a equação apresentada,

Figura 22 - Diferentes níveis de preenchimento de componentes THT, a) 100% - ideal, b) 75% - aceitável e c) 50% - é aceito em determinadas aplicações nas quais não é necessário alta confiabilidade.

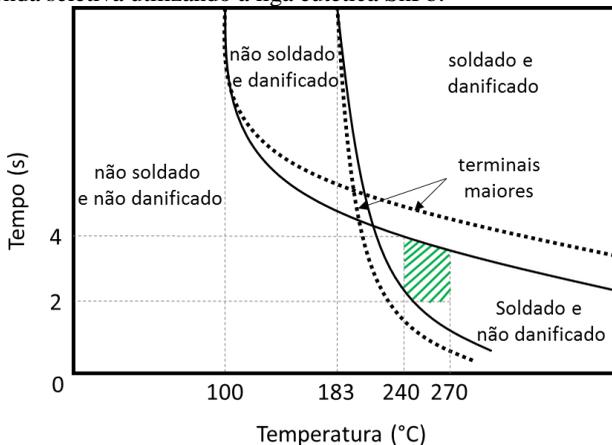


Fonte: (ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES, 2005)

Aliado aos fatores já explicitados, é necessário adequar também as condições de processamento aos componentes e a própria placa eletrônica, para tal é necessário levar em conta a temperatura e o tempo nessa condição que ambos suportam. Temos como exemplo a variável temperatura, que influencia diretamente a tensão superficial e a viscosidade do metal líquido, sendo assim um aumento nessa variável seria benéfico para o preenchimento dos furos metalizados, porém se o componente possuir partes poliméricas, como por exemplo chave seletora de tensão, pode ocorrer um amolecimento do material e danificar o componente.

A Figura 23 mostra uma janela de processo levando em conta a temperatura e o tempo de contato da liga de solda, SnPb neste exemplo, com o componente da mesma. Como é possível perceber, é importante levar em conta a combinação dessas duas variáveis para a garantia do processo sem ocasionar danos ao componente.

Figura 23 - Janela de processo genérica destacada (hachurada) para soldagem por onda seletiva utilizando a liga eutética SnPb.



Fonte: Adaptado de (KLENKE, 2002)

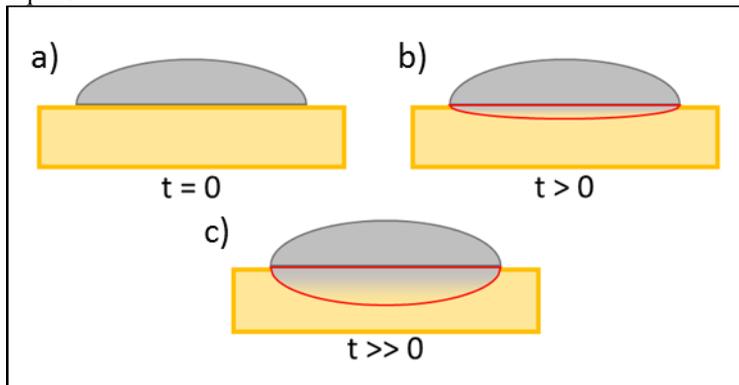
2.5.2. Reações entre a liga de solda e terminais

As juntas de solda promovem a continuidade elétrica e estabilidade mecânica da interconexão entre a placa eletrônica e o componente. Dentro desse contexto, os compostos intermetálicos, provenientes da reação entre a liga de solda e os terminais (placa e componente), influenciam diretamente nessas propriedades. Por isso será abordado a formação destes compostos, focado nos materiais de metalização estudados nesse trabalho e nas temperaturas de processos utilizadas em montagem de placas eletrônicas, isto é, entre a temperatura de fusão da liga e 300°C, aproximadamente.

2.5.2.1 Reação entre ligas de solda e cobre

Durante o contato do cobre com a liga de solda líquida ocorre a sua rápida dissolução, conforme já mostrado no Quadro 2. A alta taxa de dissolução associado aos valores de solubilidade metaestável de Cu na liga de solda, que é de duas a três vezes maior que a solubilidade estável, mostram que grandes quantidades de cobre podem ser dissolvidas no líquido sem que ocorra a precipitação de cobre puro, conforme esquematizado na Figura 24.

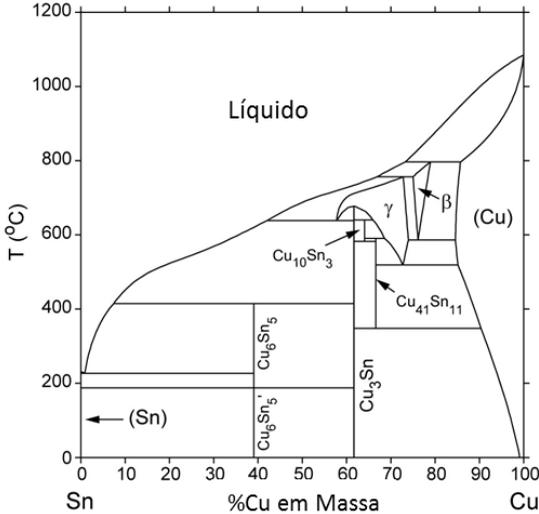
Figura 24 - Aumento da área (destaque em vermelho) de dissolução pelo processo de difusão do substrato de cobre para a liga de solda no estado líquido, a) sem dissolução, b) pouca dissolução e c) aumento do tempo ocasiona uma maior região afetada pela dissolução e aumento da concentração de cobre no metal líquido.



Fonte: Autor

Em decorrência da alta concentração de cobre na interface entre os dois materiais aliada a alta energia motora para a reação química entre Sn e Cu, faz com que compostos intermetálicos nucleiem heterogeneamente e cresçam na interface do substrato de cobre. Do ponto de vista termodinâmico, dois compostos intermetálicos são estáveis, Cu_6Sn_5 e Cu_3Sn , como pode ser visto no diagrama de equilíbrio da Figura 25.

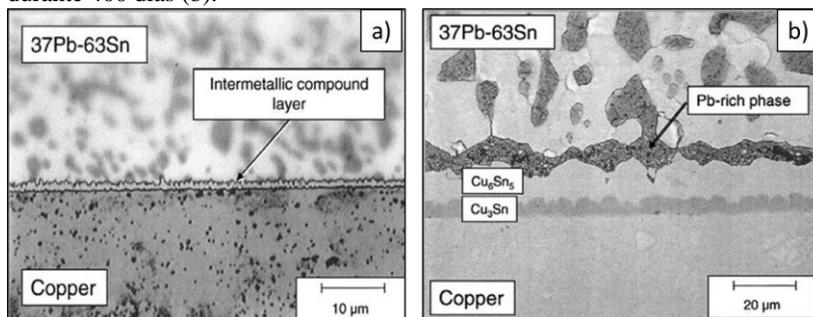
Figura 25 - Diagrama de equilíbrio Sn-Cu.



Fonte:(STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Entretanto, estudos mostram que a cinética de crescimento da fase Cu_3Sn é muito lenta, se comparada a outra fase, portanto seu surgimento está restrito a tempos de processo mais longos ou envelhecimento em alta temperatura. É importante ressaltar que algumas aplicações de placas eletrônicas podem ser em relativas altas temperaturas, nas quais pode ocorrer o crescimento dos compostos de Cu_3Sn entre a o composto rico em estanho e o substrato de cobre, conforme mostrado na Figura 26 e demonstrado no estudo realizado por LI *et.al.* (LAURILA; VUORINEN; KIVILAHTI, 2005; LI; AGYAKWA; JOHNSON, 2013)

Figura 26 – Micrografia evidenciando o crescimento da camada de intermetálico após o processamento (a) e surgimento do Cu_3Sn após envelhecimento a 135°C durante 400 dias (b).

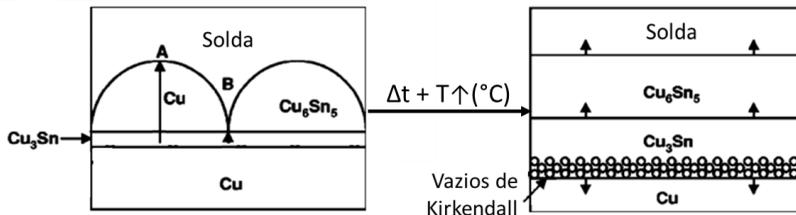


Fonte: (STALTER; PUTTLITZ, 2004)

O surgimento dos intermetálicos, conforme já citado, é importante para a resistência mecânica e estabelecimento da conexão elétrica entre a placa eletrônica e o componente. Porém, quando em excesso, a existência destes compostos pode tornar a junta de solda frágil, com baixa confiabilidade, gerar trincas e outros defeitos que podem afetar o desempenho e funcionamento de produtos eletrônicos. Devido ao cobre apresentar alta taxa de dissolução, está mais propenso ao surgimento de compostos intermetálicos e seu crescimento, se comparado com outros materiais utilizados na metalização de terminais. (HUANG et al., 2015; MU et al., 2015; PARK; GIBBONS; ARRÓYAVE, 2014; YANG et al., 2014)

Outro fator que deve ser levado em conta é a possível aparição de vazios de Kirkendall, o qual é deletério para as propriedades da junta de solda. Este defeito decorre de a difusividade do cobre na interface $\text{Cu}/\text{Cu}_3\text{Sn}$ ser baixa se comparada com a existente entre $\text{Cu}_3\text{Sn}/\text{Cu}_6\text{Sn}_5$, o que gera vazios próximo à interface entre $\text{Cu}/\text{Cu}_3\text{Sn}$ conforme esquematizado na Figura 27. (KIM et al., 2011; MÜLLER; WEINBERG; BÖHME, 2007)

Figura 27 - Surgimento de vazios de Kirkendall após envelhecimento em alta temperatura.



Fonte: Adaptado de (KIM et al., 2011)

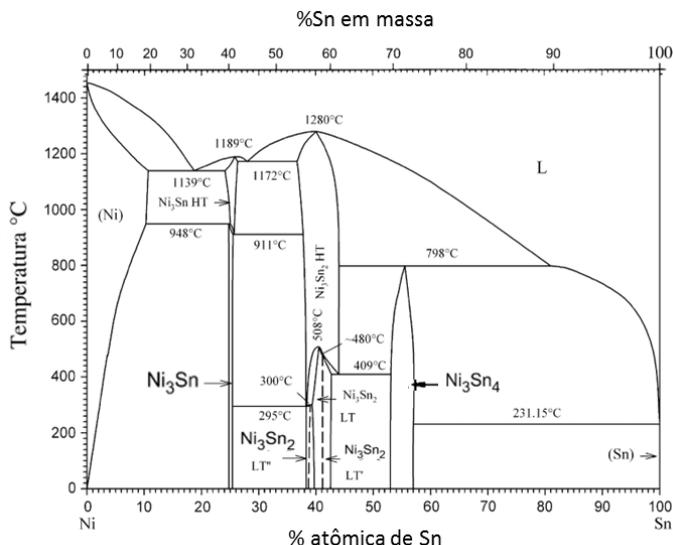
Tendo estes fatores em vista, os parâmetros de processos adotados para a formação da junta de solda e o tipo de sollicitação na aplicação dos produtos eletrônicos, devem ser levados em consideração com o intuito de aumentar a confiabilidade do produto.

2.5.2.2 Reação entre ligas de solda e níquel

A metalização de níquel é utilizada como barreira de difusão e dissolução entre o cobre e estanho, no intuito de evitar a problemática apresentada anteriormente. Conforme apresentado no Quadro 2, a taxa de dissolução do Cu é cerca de 160 vezes maior que Ni na temperatura de 215°C, que combinado com o fator de a solubilidade metaestável do Ni em Sn ser menor que com o Cu, resulta em intermetálicos menores durante o contato com a solda no estado líquido. Apesar do composto intermetálico formado apresentar-se em camadas menos espessas, a energia livre envolvida na reação de formação é muito menor que os gerados na reação com o cobre, sendo assim a estabilidade da fase gerada pela reação Ni-Sn é muito maior que a gerada entre Cu-Sn. (ISLAM et al., 2003; LABIE; RUYTHOOREN; VAN HUMBEECK, 2007; LAURILA; VUORINEN; KIVILAHTI, 2005; STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Pela análise do diagrama de equilíbrio Ni-Sn, Figura 28, é possível perceber a existência de três compostos intermetálicos possíveis na faixa de temperatura utilizada na indústria eletrônica, sendo eles: Ni_3Sn , Ni_3Sn_2 e Ni_3Sn_4 . Entretanto, diversos trabalhos reportam apenas a fase Ni_3Sn_4 existente após as reações durante o processo de montagem de placas eletrônicas, mesmo esta fase sendo menos estável termodinamicamente que as outras. (GÖRLICH; BAITHER; SCHMITZ, 2010; LAURILA; VUORINEN; KIVILAHTI, 2005)

Figura 28 - Diagrama de equilíbrio Ni-Sn.



Fonte:(SCHMETTERER et al., 2007)

Caso ocorra aquecimento da junta Ni-Sn já formada, ou os processos de formação seja em tempos demasiados, ocorre o crescimento da camada de intermetálicos formados, devido à natureza difusional da reação. Porém, diferentemente do que ocorre com o substrato de cobre, diferentes trabalhos apontam que não ocorre a nucleação das outras fases previstas no diagrama de equilíbrio, apenas o crescimento da fase Ni_3Sn_4 . (SHEN; CHAN; LIU, 2009; WANG; LAI; CHEN, 2014)

O crescimento desta fase, por sua vez, ocorre de maneira distinta se comparada com os intermetálicos Cu-Sn, devido os diferentes mecanismos de difusão e a morfologia dos compostos Ni-Sn, conforme relatado no trabalho realizado por SHEN *et.al*. Entretanto, de maneira geral, é relatado que a taxa crescimento da fase Ni_3Sn_4 é cerca de metade da observada para a fase Cu_6Sn_5 . Com isso tem-se que os possíveis defeitos citados anteriormente, crescimento excessivo de intermetálicos e vazios de Kirkendall, tem sua incidência diminuída quando são utilizados metalizações que a reação para a formação da junta de solda seja Ni-Sn. (BADER; GUST; HIEBER, 1995; SHEN; CHAN; LIU, 2009).

2.5.2.3 Reação durante a soldagem THT

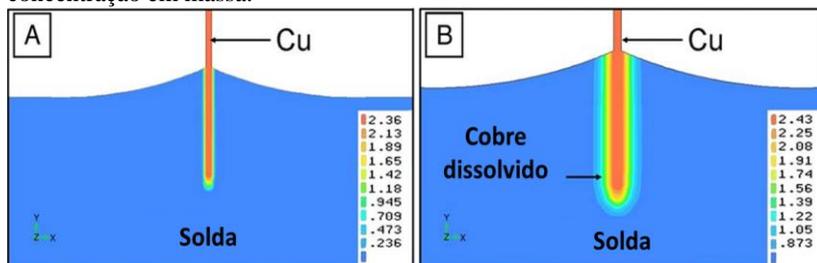
Durante o processo de soldagem dos componentes THT, os terminais (componente e da placa eletrônica) entram em contato com a liga de solda no estado líquido e, através dos mecanismos já apresentados, formam compostos intermetálicos e consolidam a junta de solda. Dentre os principais parâmetros que podem afetar a formação dos compostos estão: uso de fluxo para limpeza da superfície, materiais envolvidos (metalização e ligas de solda), temperatura e tempo de processo.

O uso do fluxo, conforme já mencionado anteriormente, causa a quebra dos óxidos existentes na superfície dos materiais a serem soldados. Sendo assim, promove a soldabilidade devido à melhora da molhabilidade e também do contato direto entre os materiais para reação.

Quanto aos materiais envolvidos, deve-se levar em conta a taxa de dissolução e também o molhamento, conforme já abordado em tópicos anteriores. Outro ponto relevante é a composição da liga de solda, que afeta as duas variáveis anteriores além da própria temperatura de processo.

No trabalho realizado por RIZVI *et.al.*, foi avaliado que a saturação de cobre em solução é atingida mais rapidamente em ligas ricas em estanho, bem como maiores valores de cobre podem ser dissolvidos por essas ligas se comparado com a liga eutética de Sn-Pb, conforme mostrado na Figura 29 e Figura 30. Baseando-se nesse resultado, é possível inferir que maior será a camada de intermetálico formado Cu-Sn em ligas ricas em estanho, levando em conta o mesmo tempo e temperatura de processo, se comparado com a liga Sn-Pb.

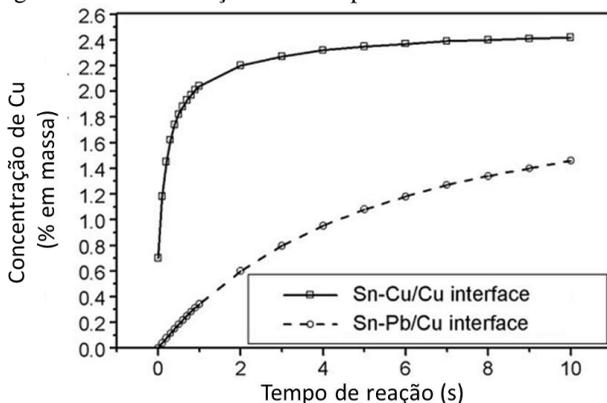
Figura 29 - Dissolução de cobre após 10 segundos na temperatura de 255°C em contato com a liga SnPb (a) e Sn-0,7Cu (b). O gradiente de cores representa a concentração em massa.



Fonte: Adaptado de (RIZVI; LU; BAILEY, 2009)

As variáveis tempo e temperatura podem ter influência no molhamento e também na quantidade de material dissolvido no contato da liga de solda com os terminais do componente e da placa eletrônica. Quanto maior a temperatura, maior é a quantidade de material que pode ser dissolvido em estado metaestável e quanto maior o tempo, maior é a quantidade de material dissolvido até que seja atingido o limite de solubilidade, conforme mostrado no trabalho de RIZVI *et.al.* (ISLAM *et al.*, 2003; RIZVI; LU; BAILEY, 2009; STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Figura 30 - Concentração de cobre próximo à interface em relação ao tempo.



Fonte: Adaptado de (RIZVI; LU; BAILEY, 2009)

Conforme é possível perceber, todos os fatores possuem influência mútua e são essas interações que irão determinar a formação da junta de solda, em termos de propriedades e, por consequência, desempenho.

Sendo assim, um estudo que relaciona todas as variáveis envolvidas se faz necessário para melhor entendimento e correlação com o processo de montagem de placas eletrônicas, tendo em vista que a confiabilidade é extremamente dependente dessa combinação.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para melhor descrição dos materiais e métodos utilizados nos experimentos, a seção experimental será subdividida em três grupos, sendo eles:

- a) Análise térmica das ligas de solda SnPb e SACX0307 para estabelecer a janela de ensaios utilizada para avaliação de soldabilidade;
- b) Imersão de fios de Ni e Cu para avaliação da influência da temperatura e tempo de processo de soldagem branda por onda seletiva em ligas SnPb e SACX0307;
- c) Análise da molhabilidade em substratos de Cu e Ni com as ligas de solda SnPb e SACX0307.

3.1. ANÁLISE TÉRMICA DAS LIGAS DE SOLDA

No intuito de verificar as temperaturas de fusão para definição de parâmetros dos ensaios subsequentes, a análise térmica de calorimetria diferencial exploratória (DSC) foi realizada. Para tal, foi utilizado o equipamento STA 449® (Netzsch GmbH) com cadinhos de alumina, taxa de aquecimento de 10°C/min e fluxo de nitrogênio com vazão de 10 litros/min. O ensaio foi conduzido até a temperatura máxima de 300°C para as duas ligas avaliadas. Cada análise foi realizada utilizando 50mg de material.

3.2. ENSAIOS DE MOLHABILIDADE

3.2.1. Materiais Utilizados

Para a elaboração dos experimentos de molhamento, substratos de cobre e níquel na forma circular com diâmetro de 12 mm foram utilizados. Ambos os substratos, possuem pureza superior a 99,5% (Alfa Aesar®). Como material de solda, as duas ligas, já descritas nos experimentos anteriores, foram utilizadas. O fluxo líquido utilizado foi o RF-800 (Alpha-Alent®) à base de rosina, com 4% de teor de sólidos.

3.2.2. Métodos

Para avaliação molhamento das ligas de solda com o substrato, foi utilizado uma aproximação do método da gota séssil. Nesse arranjo

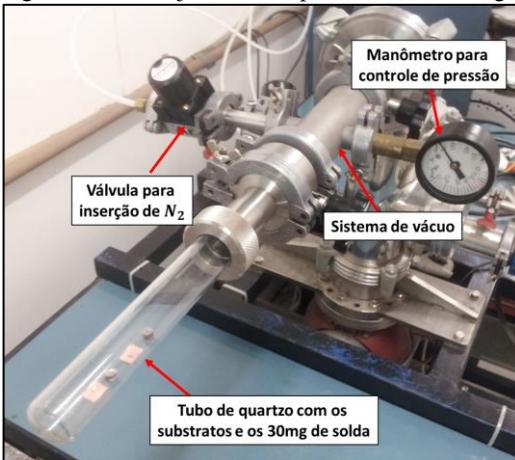
experimental, é mensurado o ângulo existente entre a interface líquido/vapor e a superfície do sólido no qual a gota repousa.

No intuito de padronizar o ensaio, foi adotado a massa de 30 ± 2 mg de material das ligas de solda para ser utilizado. Essa quantidade foi seccionada dos lingotes adquiridos.

Para a realização em condições similares ao utilizado nos demais experimentos, os substratos de Cu e Ni foram submersos em fluxo durante 15 segundos, para, assim como nos demais ensaios, quebrar a camada óxida sobre esses materiais.

Após a imersão, os fragmentos das ligas de solda foram depositados sobre os substratos e então foram colocados em um tubo de quartzo. Após essa etapa, o tubo de quartzo, com os substratos e o material de solda, foi acoplado em um sistema com bomba de vácuo e entrada de N_2 , conforme mostrado na Figura 31. Foi feito então o procedimento de purga 02 vezes com 05 minutos de vácuo ativo para retirada de oxigênio, para que então fosse inserido N_2 , com pressão de 0,80 bar, utilizado durante o ensaio em atmosfera estanque.

Figura 31 - Arranjo utilizado para o ensaio de ângulo de molhamento.



Fonte: Autor

A última etapa consistiu em aquecer os substratos e os materiais de solda, para ativação do fluxo e então até a temperatura de ensaio e verificar o ângulo formado. As temperaturas escolhidas foram as mesmas que as utilizadas no ensaio de soldagem branda por onda seletiva, isto é: 200°C (somente para a liga SnPb), 250°C e 300°C . Foram realizadas cinco (05) medidas para cada condição através da análise de imagem com

o *software* ImageJ. As imagens foram obtidas com microscópio digital AM-311 (Dino-Lite®) 5 segundos após a estabilização da temperatura de ensaio desejada, sendo que esta foi medida com um termopar tipo K inserida no tubo de quartzo.

Concomitantemente, foi avaliado também o comportamento do ângulo de molhamento em relação ao tempo, para tal, a temperatura de ensaio foi mantida constante e novas medições foram realizadas nos tempos: 1, 3, 5 e 10 minutos.

3.3. PROCESSO DE SOLDAGEM BRANDA POR ONDA SELETIVA

3.3.1. Materiais Utilizados

Para a elaboração do trabalho foram utilizados fios maciços de cobre e níquel, ambos com pureza superior a 99,5% (Alfa Aesar®), com 1 mm de diâmetro para simular terminais de componentes PTH. Como material de solda, duas ligas foram escolhidas devido a sua importância e popularidade na indústria eletrônica, sendo elas: SnPb (63%Sn-37%Pb) e SACX0307 (Sn-0.3%Ag-0.7%Cu-0.1%Bi); ambas adquiridas na forma de lingotes da empresa Alpha-Alent®.

O fluxo líquido utilizado foi o RF-800 (Alpha-Alent®) à base de rosina, com 4% de teor de sólidos. Este foi escolhido devido à alta atividade (efetividade na quebra dos óxidos) e o fato de não ser necessário o processo de limpeza posterior ao processo de soldagem para evitar efeitos de migração iônica. (ROČAK et al., 1999)

Para a fixação dos fios de Cu e Ni durante o processo de soldagem seletiva, foi utilizada uma placa de FR4 com 1,6 mm de espessura.

3.3.2. Métodos

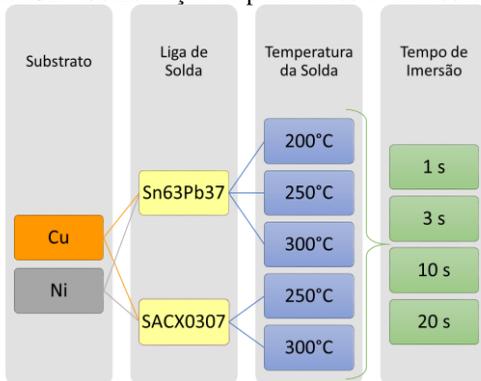
Conforme já exposto, neste trabalho serão avaliados dois parâmetros de processo soldagem seletiva junto à interface dos materiais de substrato, sendo eles: tempo e temperatura. Com esse intuito, fios maciços de Cu e Ni foram seccionados com comprimento de 10 mm utilizando um alicate de corte, totalizando 200 segmentos de cada material para execução das etapas posteriores. Os fios foram separados em grupos para os estudos de diferentes parâmetros, sendo que para cada condição foram utilizadas 10 amostras.

Além dos substratos, serão estudadas duas ligas de solda: SnPb (63%Sn-37%Pb) e SACX0307 (Sn-0.3%Ag-0.7%Cu-0.1%Bi); e os

parâmetros de processo como: tempos de contato com o metal fundido, variando entre 1, 3, 10 e 20 segundos; e as temperaturas: 200, 250 e 300°C. Vale ressaltar que somente a liga SnPb será testada na temperatura de 200°C, pois a outra liga encontra-se em estado sólido nessa condição, conforme os resultados do ensaio de análise térmica que serão mostrados posteriormente. A Figura 32 mostra um resumo dos experimentos realizados, variando os parâmetros e a combinação destes.

Os tempos de 1 e 3 segundos escolhidos para a realização dos experimentos levaram em conta os tempos recomendado por fabricantes de componentes e de máquinas de soldagem seletiva. Os tempos superiores, 10 e 20 segundos, foram utilizados para verificar possíveis tendências de comportamento das variáveis analisadas, sendo não recomendadas para utilização na indústria de montagem de placas eletrônicas, devido à possíveis danos que possam ocasionar aos componentes e a PCI.

Figura 32 - Combinação de parâmetros avaliados no teste de imersão.

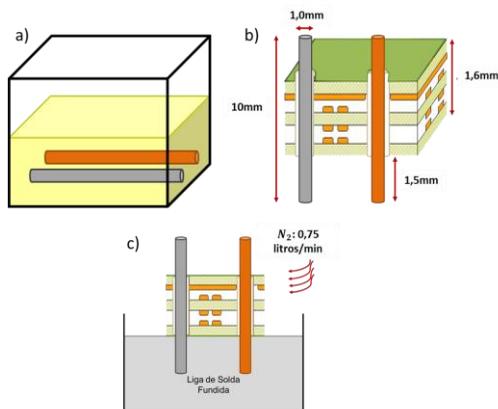


Fonte: Autor

Inicialmente, os fios de Cu e Ni, já seccionados, foram submersos no fluxo durante 15 segundos. Finalizada esta etapa, os fios foram fixados na placa de FR4, em furos de 1,8 mm de diâmetro não metalizados, de modo que 3 mm do comprimento seriam expostos a solda. Essa especificação é adotada levando-se em conta que a grande maioria das placas comercializadas possui 1,6 mm de espessura a norma IPC – A-610, na qual especifica que os terminais de componentes PTH devem estar no máximo a 1,5 mm da placa de circuito impresso. É válido ressaltar que as 10 amostras utilizadas de cada material, eram testadas juntas, para evitar qualquer influência nos resultados obtidos. A escolha pela utilização de

furos não metalizados na PCI decorre de eliminar a variável do tipo de metalização a ser utilizada, que poderia ocasionar mudança no molhamento dos fios de Cu e Ni, que são os objetos deste estudo. A representação esquemática é apresentada na Figura 33.

Figura 33 - Representação esquemática da imersão em fluxo (a), montagem na PCI (b) e imersão (c)

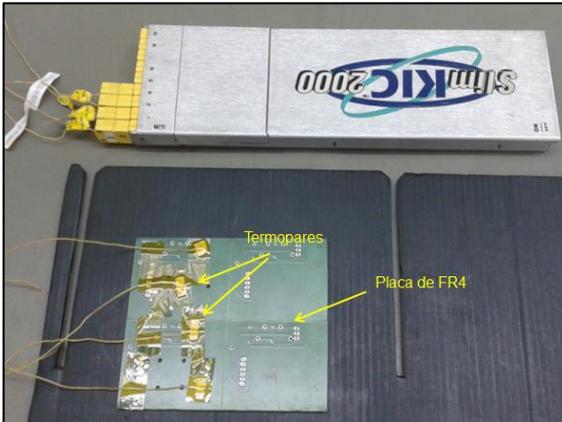


Fonte: Autor

Após essa etapa, o conjunto foi submetido a um pré-aquecimento, com auxílio de irradiadores térmicos, até a temperatura de ativação do fluxo, em torno de 85°C na face superior da placa e 110°C na face inferior. O ajuste de temperatura para que o patamar de ativação do fluxo fosse atingido foi realizado pelo controle da potência dos irradiadores. Testes realizados mostraram que 42 segundos utilizando a potência de 100% seria o ideal, levando-se em conta, além da temperatura, a velocidade do processo.

A temperatura foi medida com o hardware SlimKIC2000 utilizando quatro termopares tipo K fixados, com fitas de alumínio, na placa de FR4 próximo aos furos onde os fios seriam colocados. A Figura 34 mostra o arranjo utilizado para medir a temperatura e a placa utilizada nos testes de soldagem seletiva.

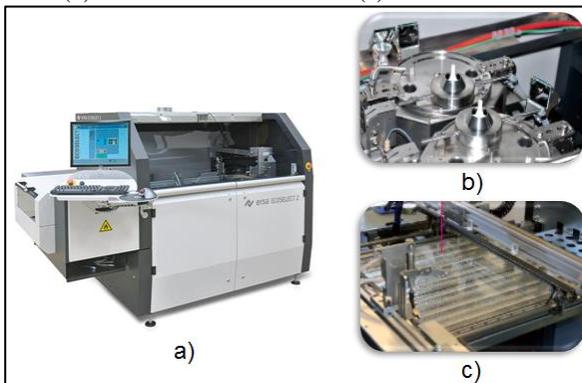
Figura 34 - Arranjo utilizado para aferição da temperatura de pré-aquecimento.



Fonte: Autor.

Para o processo de soldagem seletiva, foi utilizado uma máquina comercial do modelo ECOSELECT 2 do fabricante Ersa GmbH (Figura 35a). Esse equipamento possui os irradiadores térmicos (Figura 35c), utilizados para o pré-aquecimento, e dois tanques de solda independentes (Figura 35c), para evitar contaminação cruzada. Cada um dos tanques de solda foi preenchido com 15 kg de cada uma das ligas a serem estudadas. O controle de temperatura do metal no estado fundido durante os testes foi realizado pelo termopar do próprio equipamento. Há um fluxo de N_2 , com pureza de 99,99%, com uma vazão de 0,75 l/min, na atmosfera nas proximidades da região em que ocorre a soldagem, porém, como não é um sistema fechado, está sujeito a influências da atmosfera ambiente.

Figura 35 - Equipamento de soldagem seletiva (a) mostrando os dois tanques de solda (b) e os irradiadores térmicos (c).



Fonte: (ERSA, [s.d.])

3.3.3. Caracterização

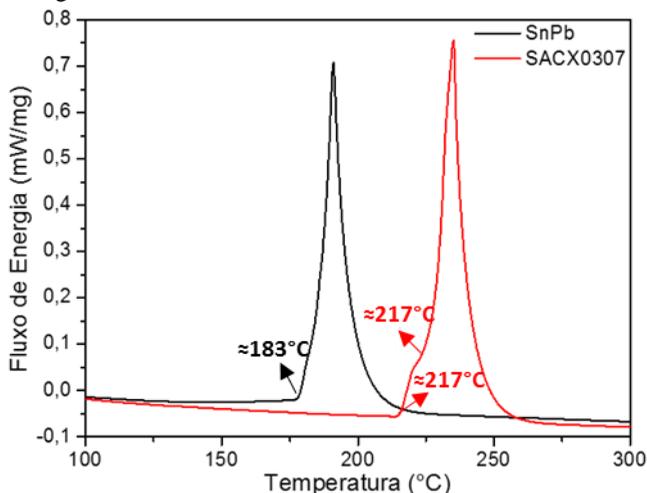
Para o procedimento de caracterização microestrutural das amostras, após a imersão nas ligas de solda, os fios foram embutidos em uma resina de cura a frio para que então fosse realizado a preparação metalográfica. Para tal, foram utilizadas lixas com granulometria: 500, 1200 e 2000 subsequentemente, culminando em um último passo de polimento com pasta de diamante com partículas na faixa entre 1 e 2 μm . Para análise das amostras foram utilizadas as técnicas de microscopia ótica (Leica DM4) e microscopia eletrônica de varredura (JEOL JSM-6390LV e Hitachi TM-3030)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADOS – ANÁLISE TÉRMICA

O resultado obtido pela técnica de calorimetria diferencial exploratória está apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Resultado da análise térmica de calorimetria diferencial exploratória das ligas Sn-Pb e SACX0307.



Fonte: Autor

Pela análise do resultado, é possível perceber que a temperatura em que ocorre a fusão da liga Sn-Pb está de acordo ao relatado na literatura e no diagrama de fases (Figura 15) que é de 183°C.

Na liga SACX0307 a fusão ocorre em uma faixa de temperaturas, que inicia em 217°C e tem um pico acentuado em torno de 225°C. O primeiro pico representa a fusão do eutético ternário Sn-Ag-Cu, que está em pouca quantidade devido ao baixo teor de prata nessa liga.

Como já era esperado, a temperatura de fusão da liga sem chumbo é cerca de 35°C acima da liga Sn-Pb, o que acarreta na necessidade de ajustes na janela de processo adotada, tanto no processo de montagem de placas eletrônicas quanto nos testes realizados neste trabalho. Por isso que para a liga SACX0307 não foram realizados ensaios na temperatura de 200°C.

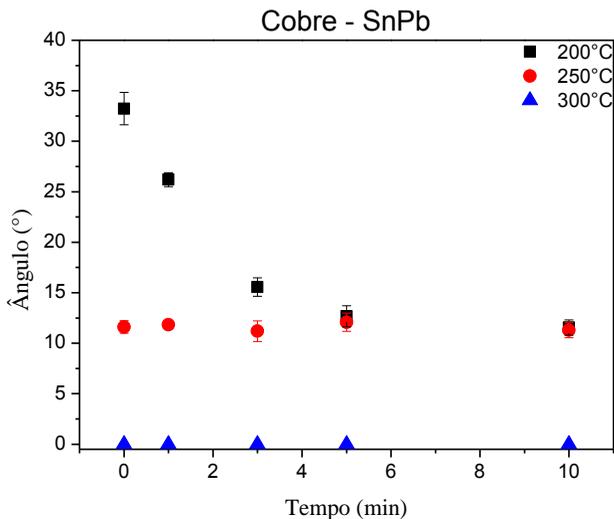
4.2. RESULTADOS – ÂNGULO DE MOLHAMENTO

Para melhor visualização dos resultados de ângulo de molhamento, estes serão subdivididos de acordo com o substrato utilizado, evidenciando a influência da composição química da liga da solda e também a temperatura e tempo de contato. Posteriormente, será feito então o comparativo entre os substratos para avaliar a sua influência.

4.2.1. Substrato de cobre

Os ângulos de molhamento mensurados, utilizando como substrato o cobre e a liga de solda SnPb, estão apresentados na Figura 37 para diferentes temperaturas e tempos de contato.

Figura 37 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de cobre e liga SnPb em diferentes temperaturas.



Fonte: Autor

Como é possível perceber pela análise do resultado utilizando a temperatura de 200°C, o tempo exerce influência no molhamento da liga no cobre. O ângulo, que inicialmente está próximo aos 35°, chega a ser reduzido à metade após 03 minutos de contato, chegando ao menor, aproximadamente 13°, valor após 05 minutos.

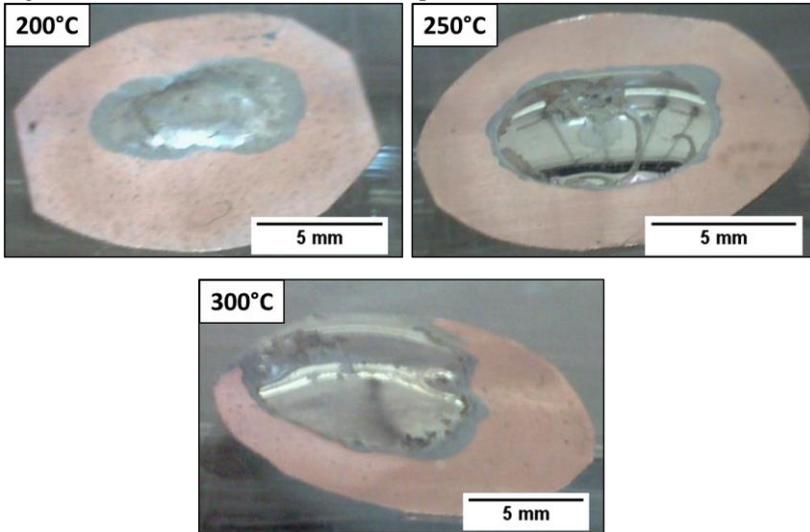
Essa dependência do tempo que ocorre na temperatura de 200°C pode ser atribuída ao regime de “não-molhamento”, no qual, logo após a fusão da liga de solda, há a formação de uma capa esférica com menor grau de molhamento, fenômeno já relatado por Wedi *et.al.* Após essa etapa, ocorre a diminuição do ângulo de molhamento e passagem para o regime de molhamento, onde o ângulo permanece praticamente constante, próximo à 13°. Em decorrência da temperatura de ensaio estar próxima ao ponto fusão, o período do regime de “não-molhamento” ocorreu durante um período de tempo superior ao relatado pelo supracitado autor. (WEDI; BAITHER; SCHMITZ, 2011)

Após atingido o equilíbrio de molhamento na temperatura de 200°C, o grau de molhamento foi o mesmo registrado à temperatura de 250°C. Porém, neste último, o ângulo permaneceu constante, próximo a 13°, durante todo o tempo de ensaio, com isso é possível afirmar que o regime de molhamento foi estabelecido durante o aquecimento até alcançar a temperatura de ensaio e de maneira mais rápida que na temperatura de 200°C.

No ensaio realizado a 300°C, o comportamento foi diferente se comparado com as outras temperaturas. Houve um completo molhamento do substrato de cobre pela liga SnPb, representado pelo ângulo de 0°. O incremento de temperatura diminui a tensão superficial e a viscosidade do metal líquido, fazendo com que o molhamento seja maximizado.

Ao final de cada experimento, foi registrado uma imagem para avaliar o espalhamento da liga de solda no substrato, conforme apresentado na Figura 38. Como é possível perceber, o resultado do ângulo de molhamento é confirmado pelo espalhamento em cada uma das condições avaliadas. Com o aumento da temperatura, houve um menor ângulo de contato e, conseqüentemente, maior espalhamento. Cabe ressaltar que apesar do ângulo de molhamento atingido a 200°C apresentou valores iguais aos mensurados a 250°C, o espalhamento foi menor, atribui-se isso ao período de regime de “não-molhamento” e também a maior viscosidade nesta condição.

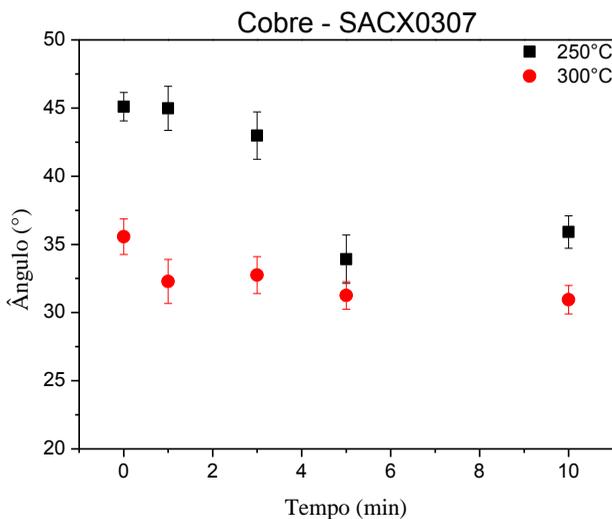
Figura 38 - Espalhamento da liga SnPb no substrato de cobre após o ensaio de ângulo de molhamento em diferentes temperaturas.



Fonte: Autor

O comportamento observado para a liga SACX0307 seguiu a mesma tendência, porém com ângulos de molhamentos superiores aos apresentados pela liga SnPb, conforme mostrado na Figura 39.

Figura 39 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de cobre e liga SACX0307 em diferentes temperaturas.



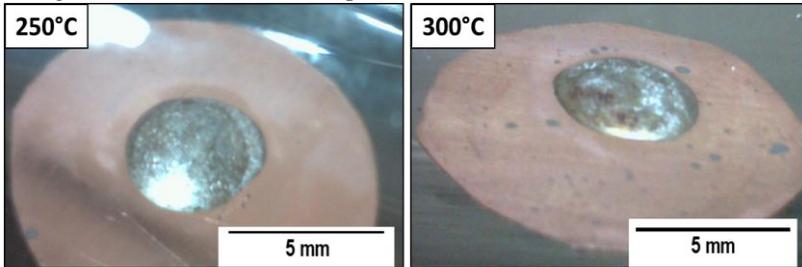
Fonte: Autor

Na temperatura de 250°C o regime de “não-molhamento” permaneceu em um platô durante 03 minutos, aproximadamente, com ângulo de 45°. Após esse período houve uma queda até o regime de molhamento, no qual o ângulo permaneceu constante no valor próximo de 35°. A transição entre os regimes ocorreu de forma mais brusca na liga SACX0307 a 250°C se compararmos com a liga SnPb a 200°C na metodologia adotada. Este comportamento pode estar relacionado com a maior tensão superficial da liga sem chumbo, sendo necessário um tempo maior para que ocorra essa transição.

O aumento de temperatura, assim como no caso da liga SnPb, aumentou a molhabilidade em decorrência da diminuição da viscosidade do metal fundido. O ângulo de molhamento na temperatura de 300°C ficou constante em torno de 32°, aproximadamente, um pouco abaixo do observado, mesmo no regime de molhamento, na temperatura de 250°C.

Essa pequena diferença pode ser vista também área de espalhamento do metal fundido durante os ensaios, como apresentado na Figura 40. Devido à pequena diferença dos ângulos obtidos, pouca diferença no espalhamento foi observada.

Figura 40 - Espalhamento da liga SACX0307 no substrato de cobre após o ensaio de ângulo de molhamento nas temperaturas de 250°C e 300°C.



Fonte: Autor

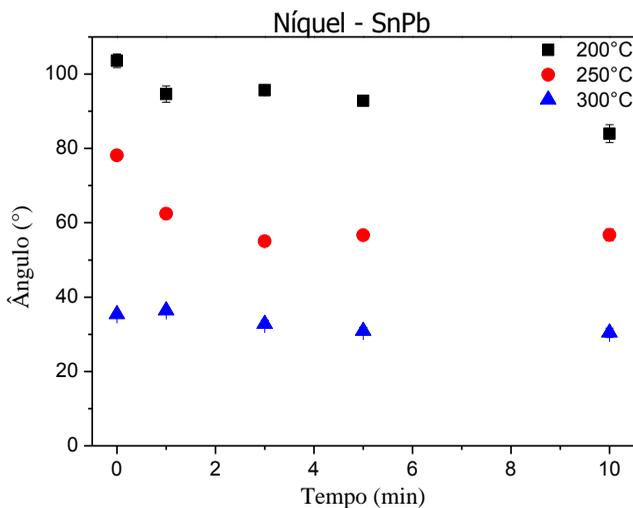
Os valores dos ângulos de molhamento apresentados para as duas ligas diferem entre si, podendo ser atribuída à diferença entre a tensão superficial das duas ligas. Diferentes trabalhos reportam que ligas ricas em estanho possuem alta tensão superficial e que a adição de elementos de liga diminui essa propriedade causando a melhoria da molhabilidade no substrato. A liga SACX0307 é majoritariamente composta por estanho, então a característica de apresentar alta tensão superficial é mantida. Em contraponto, a liga SnPb, em decorrência da grande adição de chumbo (37% em massa), apresenta valores menores de tensão superficial, aumento a molhabilidade desta liga em relação à SACX0307 para o mesmo substrato. (KOTADIA; HOWES; MANNAN, 2014; WEDI; BAITHER; SCHMITZ, 2011)

Cabe ressaltar que o aspecto das duas ligas de solda apresenta diferenças. A liga de SnPb apresenta-se mais brilho e coloração mais clara enquanto a liga SACX0307, assim como outras ligas sem chumbo, possui um aspecto mais opaco e coloração mais escura, em conformidade com o relatado na literatura. (STALTER; PUTTLITZ, 2004)

4.2.2. Substrato de níquel

Os ângulos de molhamento mensurados, utilizando como substrato o níquel e a liga de solda SnPb, estão apresentados na Figura 41 para diferentes temperaturas e tempos de contato.

Figura 41 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de níquel e liga SnPb em diferentes temperaturas.



Fonte: Autor

Os resultados mostram que inicialmente, na temperatura de 200°C, o ângulo formado entre a liga de solda no estado fundido e o substrato de níquel é de aproximadamente 105°. Após um minuto de contato, a temperatura constante, o ângulo teve um decréscimo até o valor de 95°, aproximadamente. Este valor ficou neste patamar até uma nova queda após 10 minutos de contato, no qual o ângulo de contato foi de 85°, aproximadamente. Essa queda sucessiva, assim como no caso do substrato de cobre, pode estar relacionada à transição do regime de “não molhamento” para o regime de molhamento.

É importante ressaltar que a transição ocorreu na faixa de valores que compreende o “não-molhamento” (ângulo maior que 90°) e molhamento parcial (ângulo entre 0 e 90°), ficando próximo do valor máximo deste regime após 10 minutos de contato.

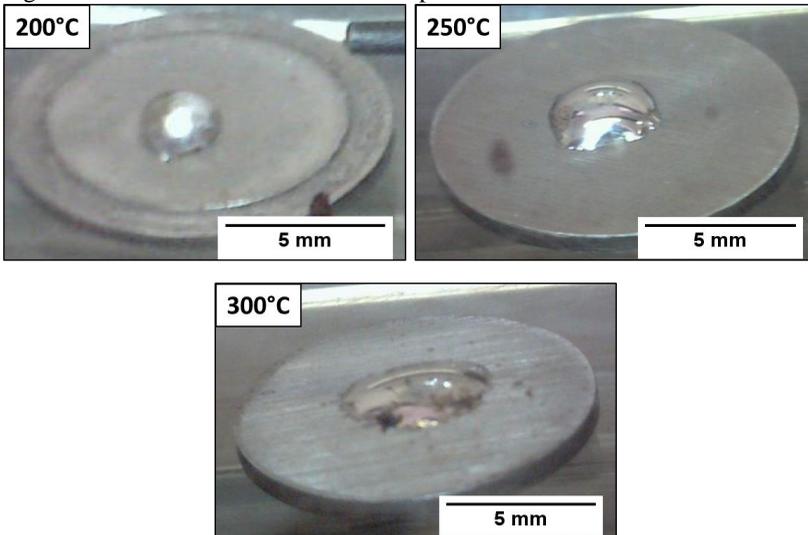
O incremento de 50°C na temperatura faz com que o valor do ângulo inicial de contato seja de 80°, aproximadamente. Logo, na temperatura de 250°C, o comportamento é de molhamento parcial, mesmo no início do contato. O ângulo de molhamento decresce de maneira assintótica com o aumento do tempo de contato, devido à

transição de regime já mencionada, chegando ao valor mínimo de 55° durante o intervalo observado.

Na temperatura de 300°C não foi possível perceber a mudança entre os regimes de “não-molhamento” e molhamento, o ângulo de contato ficou praticamente constante, no valor de 32° , durante todo o período avaliado.

É possível inferir que, assim como já explicado anteriormente, o aumento de temperatura diminui a tensão superficial do líquido e diminui a viscosidade, conseqüentemente, diminui o ângulo de contato e aumentando o espalhamento, conforme pode ser visto na Figura 42.

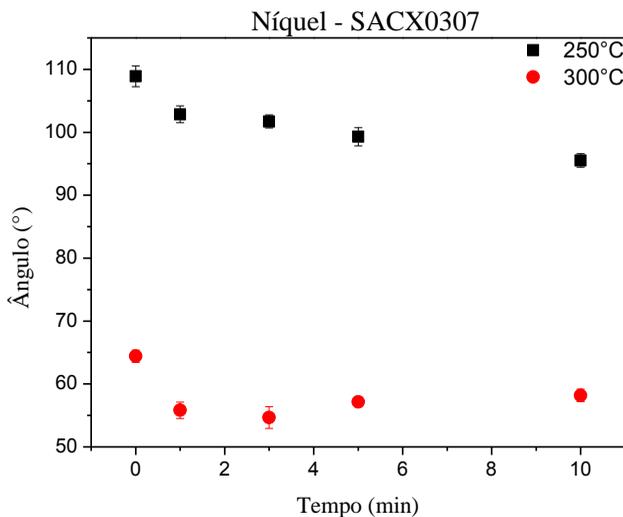
Figura 42 - Espalhamento da liga SnPb no substrato de níquel após o ensaio de ângulo de molhamento em diferentes temperaturas.



Fonte: Autor

Utilizando a liga SACX0307 em contato com o substrato de níquel, o comportamento do ângulo de contato seguiu a mesma tendência da liga SnPb, porém os valores encontrados são superiores, conforme mostrado na Figura 43.

Figura 43 - Ângulo de molhamento em função do tempo, utilizando substrato de níquel e liga SACX0307 em diferentes temperaturas

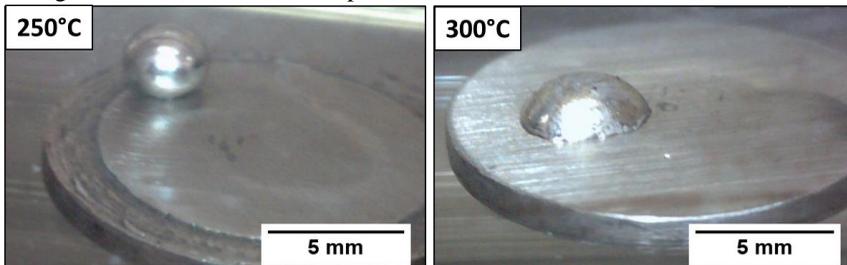


Fonte: Autor

Analisando os dados na temperatura de 250°C é possível perceber que há uma queda contínua a partir do valor inicial, de 110°, até o valor final, 95°, durante o período avaliado. Todos os valores encontrados estão acima de 90°, logo estão na faixa considerada como “não-molhamento”.

O aumento de temperatura fez com que os valores caíssem substancialmente, iniciando em 65° e atingindo um mínimo de 55° durante o intervalo avaliado. A queda ocasionada pelo aumento da temperatura fez com que os valores entrassem na faixa de molhamento parcial e aumentando mais o espalhamento, conforme pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 - Espalhamento da liga SACX0307 no substrato de níquel após o ensaio de ângulo de molhamento nas temperaturas de 250°C e 300°C.



Fonte: Autor

Em suma, os resultados apresentados, independentemente do tipo de substrato e da composição da liga, revelam que o aumento da temperatura faz com que o ângulo de contato do metal em estado líquido e o substrato seja diminuído, o regime de molhamento seja alcançado mais rapidamente (diminuindo a dependência do tempo de contato) e aumenta o espalhamento. Este resultado está em conformidade com o encontrado por outros autores. (AMORE et al., 2008; AZIZ; ABDULLAH; KHOR, 2014; STALTER; PUTTLITZ, 2004)

A composição química da liga de solda também exerce importante papel nos resultados obtidos, pela análise dos resultados é possível perceber que a liga SnPb possui ângulos de molhamento muito menores que a liga SACX0307 nas mesmas condições de ensaio. Essa característica, conforme mencionado anteriormente, decorre da maior tensão superficial da liga com alto teor de estanho (SACX0307), enquanto que na liga SnPb, a adição de chumbo diminui esse valor fazendo com que o molhamento seja mais pronunciado.

4.2.3. Influência do substrato

Outra variável que se mostrou muito relevante nesse estudo foi a composição do substrato. Conforme já mencionado, os dois materiais avaliados são muito utilizados na indústria eletrônica em revestimentos de terminais das placas eletrônicas e também de componentes, por isso avaliar a interação destes materiais com as ligas de solda se faz muito importante.

Os resultados mostram que, para ambas as ligas testadas, o molhamento foi maior utilizando o substrato de cobre. É importante ressaltar que em todas as variações, temperatura e ligas, o ângulo de molhamento no substrato de cobre foi sempre abaixo de 50°, isto é,

sempre no regime de molhamento parcial, chegando até mesmo no molhamento completo em 300°C com a liga SnPb. No entanto, utilizando o substrato de níquel, em determinadas condições, o ângulo ficou maior que 90°, isto é, acima do regime de molhamento. Essa grande diferença pode ser explicada através da equação de Young (já apresentada):

$$\gamma_{SF} - \gamma_{SL} = \gamma_{LF} \cos \theta \quad (1)$$

Considerando que o mesmo fluxo foi utilizado em todos os ensaios, e que este possui um alto molhamento em ambos os substratos, e o caso particular que a mesma liga é utilizada, pode-se admitir que γ_{SF} e γ_{LF} possuem o mesmo valor em ambos os substratos. Com isso é possível inferir que a diferença nos ângulos de molhamento está relacionada diretamente com a tensão interfacial entre o substrato e a liga de solda (componente γ_{SL} da equação de Young). Sabe-se que quanto maior o valor de γ_{SL} maior é o ângulo de molhamento, decorrente do aumento de tensão entre os dois materiais, que dificulta o maior contato entre ambos. Portanto, com base nos resultados obtidos nos sistemas estudados, pode-se constatar que $\gamma_{SLNi} > \gamma_{SLCu}$.

4.3. RESULTADOS – SOLDAGEM POR ONDA SELETIVA

Assim como nos resultados apresentados para o ângulo de molhamento e para facilitar discussão dos resultados obtidos, estes serão subdivididos de acordo com o material utilizado nos fios adotados para este experimento, criando um paralelo com as metalizações usadas em componentes THT.

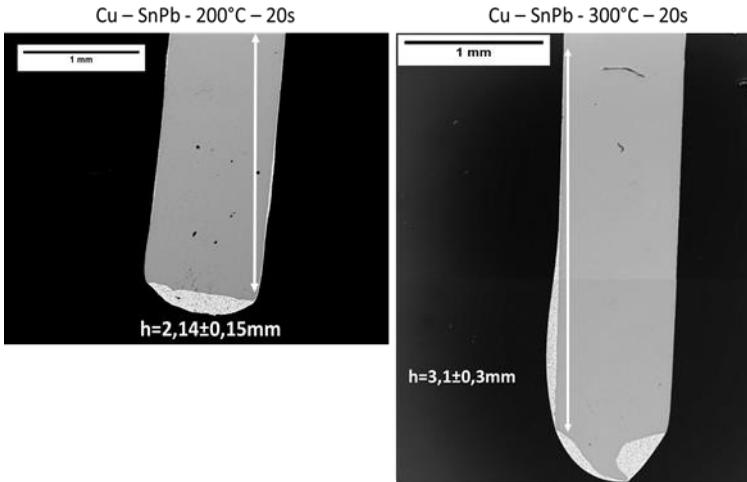
As análises foram realizadas utilizando microscopia ótica e eletrônica no intuito de mensurar a altura na qual a liga de solda fundida molhou os fios nas diferentes condições avaliadas. Os valores de altura de molhamento, denotados por h nas micrografias, foram medidos em duas amostras em cada condição avaliada e, devido à dispersão dos valores de altura medidos, sugere-se adotá-los de forma orientativa aos resultados que serão apresentados.

Concomitantemente as análises microestruturais, foram realizadas medidas de composição química, através da técnica de espectrometria de raios X por energia dispersiva (EDS), junto à interface dos materiais utilizados adotando a técnica de varredura em uma linha, com o objetivo de verificar a formação de compostos intermetálicos e o perfil de difusão dos materiais envolvidos.

4.3.1. Filamento de cobre

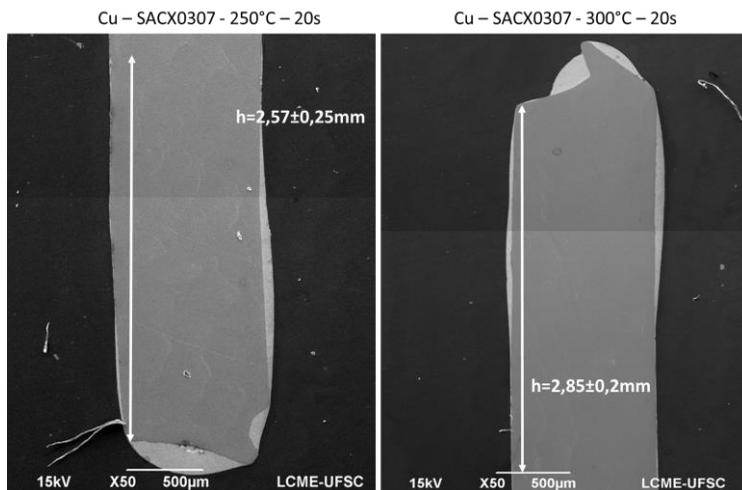
Os resultados obtidos pelas análises de microscopia revelaram que, assim como nos ensaios de molhamento, o aumento da temperatura fez com que a altura de molhamento da liga de solda fosse maior, para ambas a ligas testadas, conforme exemplificado na Figura 45 e Figura 46.

Figura 45 - Micrografia eletrônica evidenciando a influência da temperatura na altura de molhamento para a liga SnPb no fio de cobre com 20 segundos de contato.



Fonte: Autor

Figura 46 - Micrografia eletrônica evidenciando a influência da temperatura na altura de molhamento para a liga SACX0307 no fio de cobre com 0 segundos de contato.

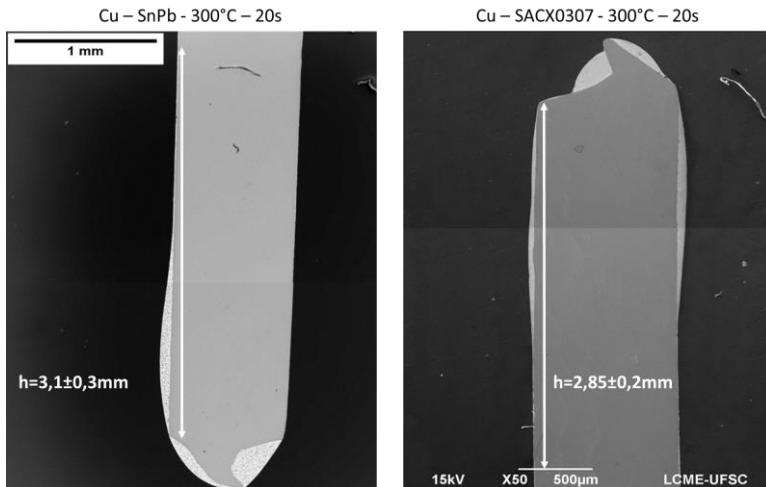


Fonte: Autor

Conforme já explicitado, a temperatura diminui a viscosidade do metal fundido, sendo assim, o movimento de ascensão capilar é favorecido. É válido ressaltar que apenas 1,5 mm do fio era exposto diretamente à liga de solda, sendo assim, os valores maiores que este são devido à capilaridade. Fato este que decorre em função da força de adesão entre a solda e o fio ser maior que a força de coesão do material fundido. (STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Com relação às ligas de solda, pela análise das micrografias e exemplificado na Figura 47, é possível perceber que comparando as mesmas condições de temperatura e tempo de contato, a liga SnPb apresenta tendência de atingir maiores valores de altura se comparado com a liga SACX0307. Essa tendência foi observada também nas demais condições de ensaio e estão de acordo com os resultados observados no ângulo de molhamento, propriedade que pode ser atribuída ao fato de que a liga SnPb possui menor tensão superficial e, conseqüentemente, maior espalhamento.

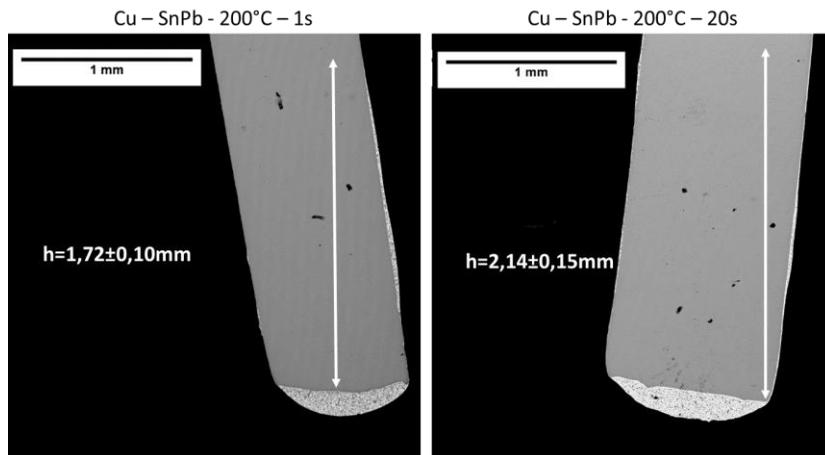
Figura 47 - Micrografia eletrônica evidenciando a influência da liga de solda na altura de molhamento para as ligas SnPb e SACX0307 no fio de cobre.



Fonte: Autor

No que concerne ao tempo de contato entre o fio e a solda no estado líquido, foi constatado que apenas nos experimentos realizados com a liga SnPb na temperatura de 200°C ela mostrou-se significativa, conforme mostrado na Figura 48. Assim como nos resultados de ângulo de molhamento, um tempo maior de contato fez com que a solda molhasse um perímetro maior do fio, isto é, até uma altura superior (maior valor de h). Esta situação é análoga à transição entre o regime de não-molhamento para o molhamento que foi descrita e observada anteriormente para esta mesma condição de ensaio.

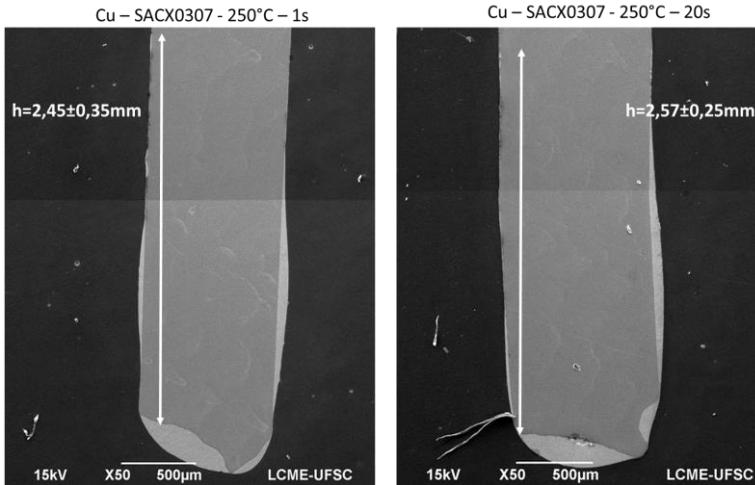
Figura 48 – Micrografia eletrônica evidenciando a influência do tempo de contato entre a altura de molhamento para a liga de solda SnPb a 200°C em fios de cobre.



Fonte: Autor

Com relação às demais condições de ensaios, não foi observada uma diferença significativa no tempo de contato em relação à altura de contato da solda com o fio de cobre, conforme exemplificado na Figura 49. Este resultado mostra uma divergência entre o observado nesta condição mostrada para a observada no ângulo de molhamento. Essa diferença pode ser atribuída ao fato que, além das condições de ensaio serem diferentes, a dispersão dos resultados pode ter dificultado a análise da diferença de 10° no ângulo de molhamento mensurado.

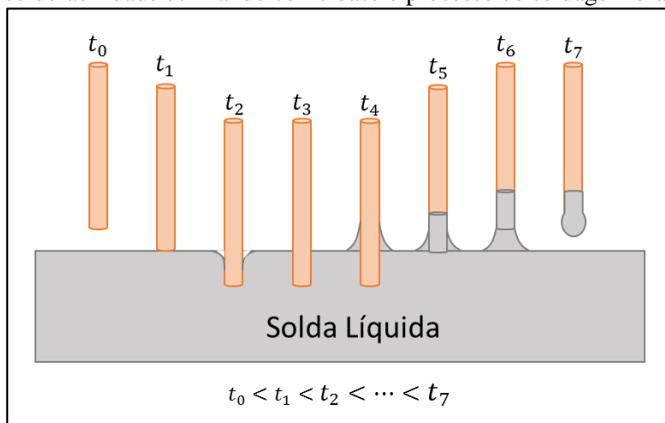
Figura 49 - Altura de molhamento para a liga SACX0307 na temperatura de 250°C e em diferentes tempos de contato.



Fonte: Autor

Em todas as amostras foi observado que houve um maior acúmulo de solda na parte inferior dos fios de cobre, principalmente em temperaturas maiores, enquanto na parte superior apenas uma fina camada de solda pôde ser observada. Para entender esse comportamento, tendo como base a Figura 50, tem-se que durante a separação do fio com o banho de solda, a força capilar faz com que o metal líquido crie um “continuo” (Figura 50- t_6) entre os materiais, o qual, após a completa separação, tende a separar e em parte voltar para a solda líquida e a outra parte fica aderida ao fio (Figura 50- t_7), onde ocorre a solidificação e o acúmulo de solda observado nas micrografias. (MARTORANO; MARTORANO; BRANDI, 2009)

Figura 50 - Procedimento utilizado neste trabalho para avaliação de soldabilidade utilizando como base o processo de soldagem branda seletiva.



Fonte: Autor

Conforme mostrado nos resultados, o espalhamento das ligas de solda nos fios de cobre, que no caso aqui observado está diretamente ligado a altura na qual houve molhamento, seguiu a mesma tendência observada nos resultados mensurados no ângulo de molhamento. Apesar da dispersão dos valores mensurados de h , os resultados indicam que o aumento de temperatura favorece a ascensão do metal líquido e que o tempo influenciou notadamente apenas em temperaturas menores. O uso das diferentes ligas apresentou também diferenças, a liga SnPb apresentou valores de altura de molhamento ligeiramente superiores, utilizando como comparativo a mesma condição de ensaio. Porém, cabe ressaltar que a liga SACX0307, segundo já citado e mensurado na análise térmica, possui uma janela de trabalho em temperaturas superiores à liga SnPb, portanto deve-se levar isto em consideração no emprego desta liga, que apresentou resultados promissores, em questão de processo, para uso em soldagem de componentes THT.

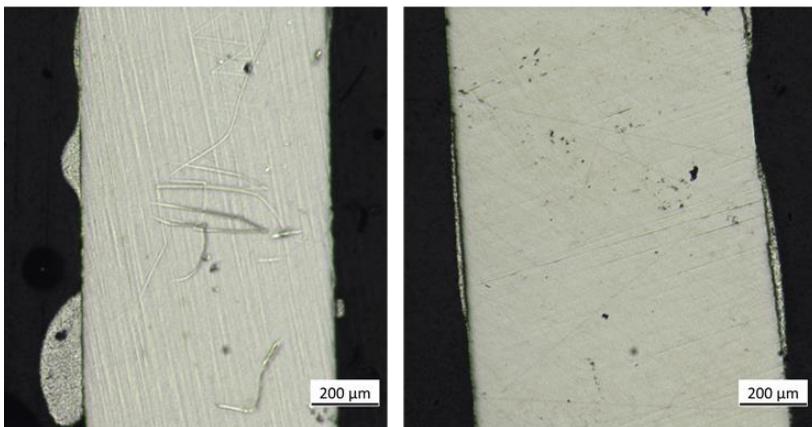
4.3.2. Filamento de níquel

As análises dos resultados utilizando o filamento de níquel revelaram um comportamento muito diferente dos apresentados pelo cobre. Enquanto que no cobre a solda apresentou uma fina camada contínua aderida ao perímetro do filamento com um excesso na parte inferior, conforme explicado na Figura 50, nos fios de Ni houveram pontos isolados de acúmulo de solda, não restrito à parte inferior, e descontinuidade do molhamento, conforme mostrado na Figura 51. Em decorrência desses resultados, a altura de molhamento não foi mensurada para os fios de níquel, porém foi possível perceber tendências pelos padrões observados.

Figura 51 - Micrografia ótica mostrando o acúmulo de solda em pontos isolados do filamento de Ni para a liga SnPb nas temperaturas de 200°C e 300°C.

Ni – SnPb - 200°C – 20s

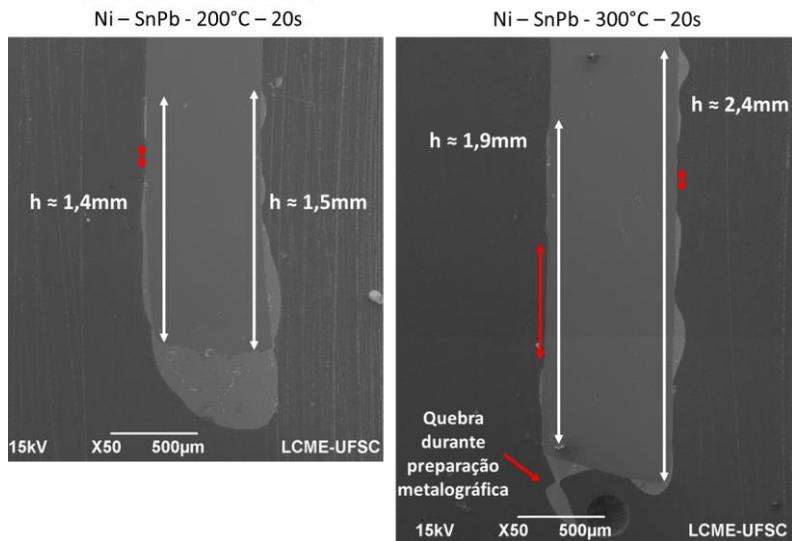
Ni – SnPb - 300°C – 20s



Fonte: Autor

O aumento de temperatura fez com que houvesse maior espalhamento de solda no fio de níquel, indo ao encontro dos resultados obtidos para o ângulo de molhamento e para o fio de cobre. Porém ainda houve separação entre as regiões nas quais houve molhamento, conforme mostrado na Figura 52 e Figura 53.

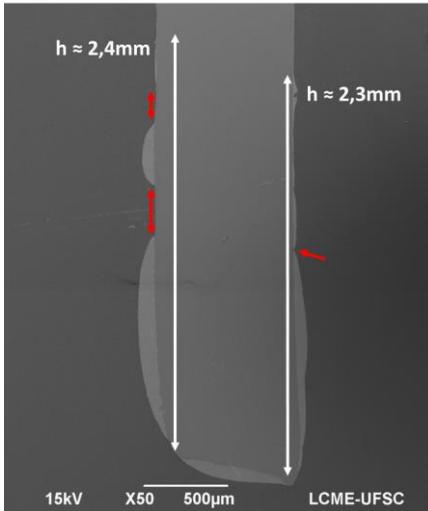
Figura 52 - Micrografia eletrônica mostrando as regiões que ficaram sem molhamento (em vermelho) e a altura máxima de molhamento observada para a liga SnPb nas temperaturas de 200°C e 300°C.



Fonte: Autor

Figura 53 - Micrografia eletrônica evidenciando a existência de regiões sem molhamento (em vermelho) e a altura máxima de molhamento para a liga SACX0307 a 300°C.

Ni - SACX0307 - 300°C - 20s

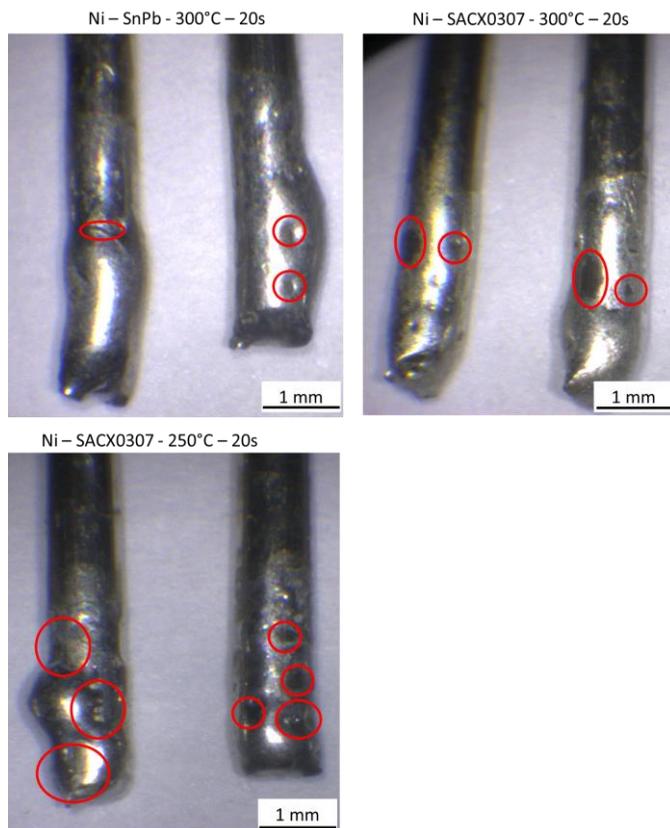


Fonte: Autor

Na temperatura máxima analisada, devido às heterogeneidades nas amostras, não foi possível inferir diferenças significativas na altura máxima de molhamento. Lembrando que os resultados de ângulo de molhamento revelaram uma diferença de 20° entre as duas ligas para esta condição.

O mesmo comportamento foi observado nas duas ligas com relação às regiões sem molhamento, porém para a liga SACX0307 o aumento de temperatura foi mais crítico, conforme mostrado na Figura 54.

Figura 54 - Fotografia dos fios de Ni após o processo de imersão em diferentes condições. Estão destacados regiões onde foi possível perceber ausência de molhamento.



Fonte: Autor

É possível perceber que com o aumento de temperatura, a liga SACX0307 apresentou menos defeitos de regiões sem molhamento. Este resultado corrobora com as medidas de ângulo de molhamento apresentadas anteriormente, sendo que os valores encontrados para a temperatura de 250°C estavam próximos da transição entre “parcialmente sem molhamento” e “parcialmente molhado” (Figura 18).

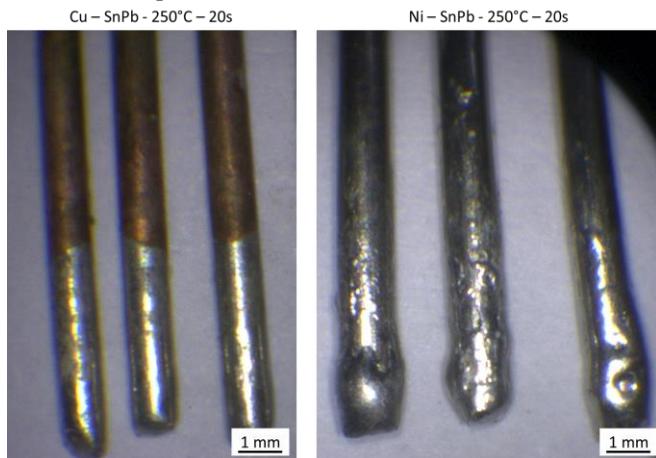
4.3.3. Influência do material do filamento

A comparação dos resultados obtidos com os filamentos de cobre e níquel, que aqui foram utilizados no intuito de simular metalizações de componentes THT, mostraram-se bem diferentes durante o processo que simula a montagem por onda seletiva. Pela análise metalográfica, apesar da dispersão dos resultados, é possível inferir que o molhamento pelo filamento de cobre mostrou-se superior ao níquel, motivo este atribuído à diferença das tensões superficiais durante o processo de soldagem branda, conforme já discutido anteriormente.

Fazendo um paralelo dos resultados com o processamento de montagem de placas eletrônicas, a molhabilidade pode ser traduzida como uma facilidade de preenchimento de furos de componentes THT, algo que é importante para garantir as propriedades termomecânicas e confiabilidade da interconexão. Como linhas gerais para estabelecimento de janelas de processo, tem-se que componentes com metalização em cobre e adotando os parâmetros de processo com as temperaturas entre 250°C e 300°C com tempos de contato entre 1 e 3 segundos, tem-se bons indicativos de qualidade de processamento para ambas as ligas avaliadas, desconsiderando outros parâmetros, como altura da onda de metal fundido. Cabe lembrar que é recomendável utilizar temperaturas ligeiramente superiores para a liga SACX0307 para que se obtenha padrões de molhamento semelhantes aos apresentados pela liga SnPb. Os tempos aqui sugeridos levam em conta o estresse térmico da placa e possíveis danos aos componentes. Esses resultados vão ao encontro ao recomendado pelo fabricante das ligas (Alpha®), que traz temperaturas entre 240-250°C para a liga SnPb e 260-270°C para a SACX0307.

Dentre as características observadas nas análises, destaca-se a falta de molhamento em algumas regiões das amostras utilizando filamentos de Ni, enquanto que nos filamentos de cobre houve o espalhamento da liga de solda entorno do perímetro, conforme exemplificado na Figura 55.

Figura 55 - Fotografia de 03 filamentos de cada material após a imersão na liga SnPb a 250°C por 20s.



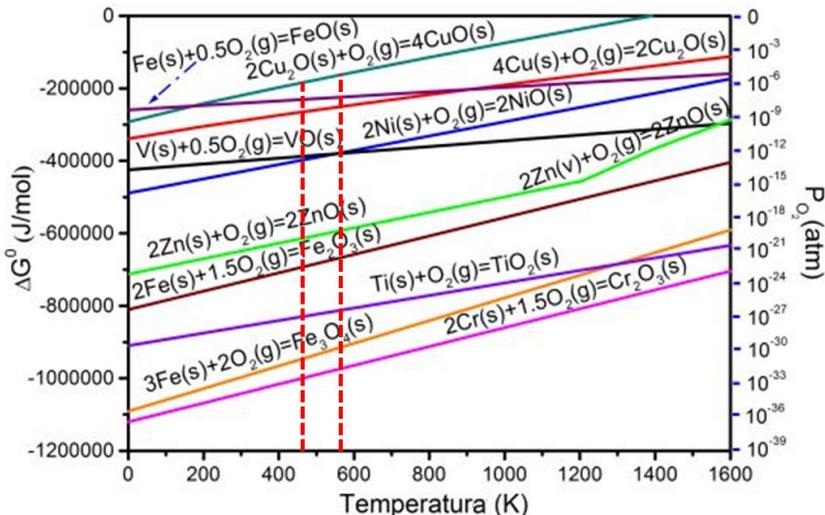
Fonte: Autor

No intuito de estabelecer uma janela de processo para componentes com metalização de níquel, foi observado que para nenhuma das situações avaliadas foi obtido a mesma homogeneidade que utilizando o cobre. Baseando-se nestes resultados e no trabalho de RIZVI *et.al.*, uma hipótese para esta diferença é que, devido à diferença de estabilidade dos óxidos existentes na superfície do material, o fluxo empregado pode apresentar diferenças na sua efetividade durante o processamento. Pela análise do diagrama de Ellingham (Figura 56), a curva do óxido de níquel está abaixo da curva dos dois tipos de óxido de cobre, sendo assim, o óxido de Ni é mais estável (menor energia livre de Gibbs), sendo necessário maior atividade do fluxo para quebra desta camada passiva. Para os filamentos de cobre, o fluxo adotado mostrou-se adequado nas janelas de processamento avaliadas, porém o mesmo pode não ter ocorrido para o níquel.

O fluxo utilizado neste trabalho apresenta baixa concentração de sólidos e é baseado em rosina, características determinantes para ser classificado como “*no-clean*”. Porém há alternativas de fluxos com maiores concentrações de sólidos e com maior atividade que podem ser utilizados para casos necessários, no entanto requerem uma limpeza posterior da PCI após a montagem, o que demanda um maior tempo e cuidado na linha de produção. Esta poderia ser uma alternativa para componentes com metalização de Ni, caso a hipótese apresentada neste

trabalho seja confirmada. No entanto esta avaliação foge ao escopo deste trabalho

Figura 56 - Diagrama de Ellingham para óxidos, com destaque para a faixa de temperatura avaliada neste trabalho.



Fonte:(CHOOPUN; HONGSITH; WONGRAT, 2010)

4.3.4. Compostos intermetálicos

Conforme explicado anteriormente, além do molhamento, é necessário haver uma reação entre os materiais para que seja estabelecido uma conexão elétrica e também mecânica entre a liga de solda e os terminais dos componentes e/ou da placa eletrônica. Sendo assim para cada sistema avaliado, há diferenças nas taxas de dissolução do metal utilizado na metalização dos terminais, o comportamento destes em diferentes temperaturas e tempos de contato durante a soldagem branda, além dos diferentes compostos que podem ser formados, previstos no diagrama de fases dos materiais envolvidos.

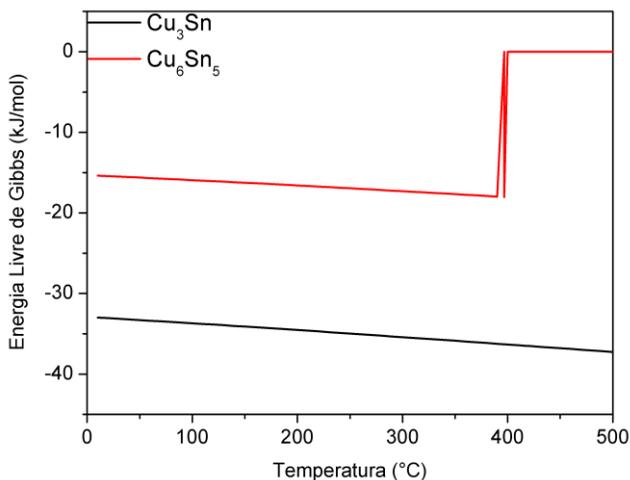
No intuito de prever e avaliar a energia envolvida na reação de acordo com os tipos de intermetálicos, baseando-se nos diagramas de fases Cu-Sn e Ni-Sn apresentados anteriormente nas Figura 25 e Figura 28, respectivamente, foi utilizado o *software* ThermoCalc com a base de dados SSOL5, que compreende os elementos aqui avaliados. (ANDERSSON et al., 2002)

Com esta ferramenta, foi possível avaliar a energia livre de Gibbs para a formação dos possíveis intermetálicos. Os cálculos foram realizados tendo em vista o uso de 1 mol do estanho, conforme pode ser exemplificado nas equações 3 e 4.



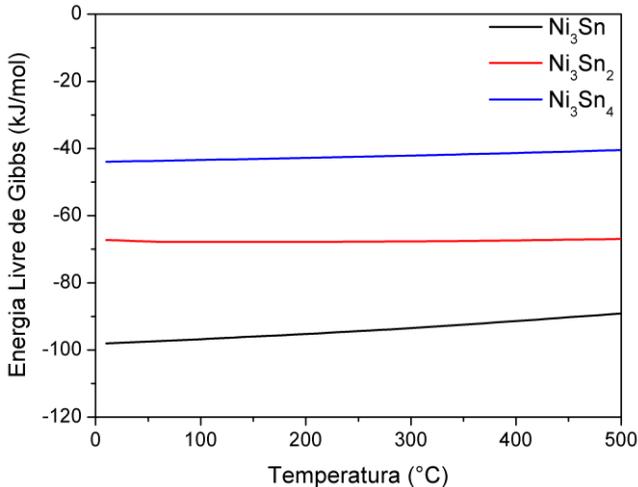
Os resultados das simulações dos compostos Cu-Sn e Ni-Sn estão mostrados nas Figura 57 e Figura 58, respectivamente.

Figura 57 - Diagrama de energia livre de Gibbs em função da temperatura para a formação dos compostos intermetálicos de Cu-Sn.



Fonte: Autor

Figura 58 - Diagrama de energia livre de Gibbs em função da temperatura para a formação dos compostos intermetálicos de Ni-Sn.

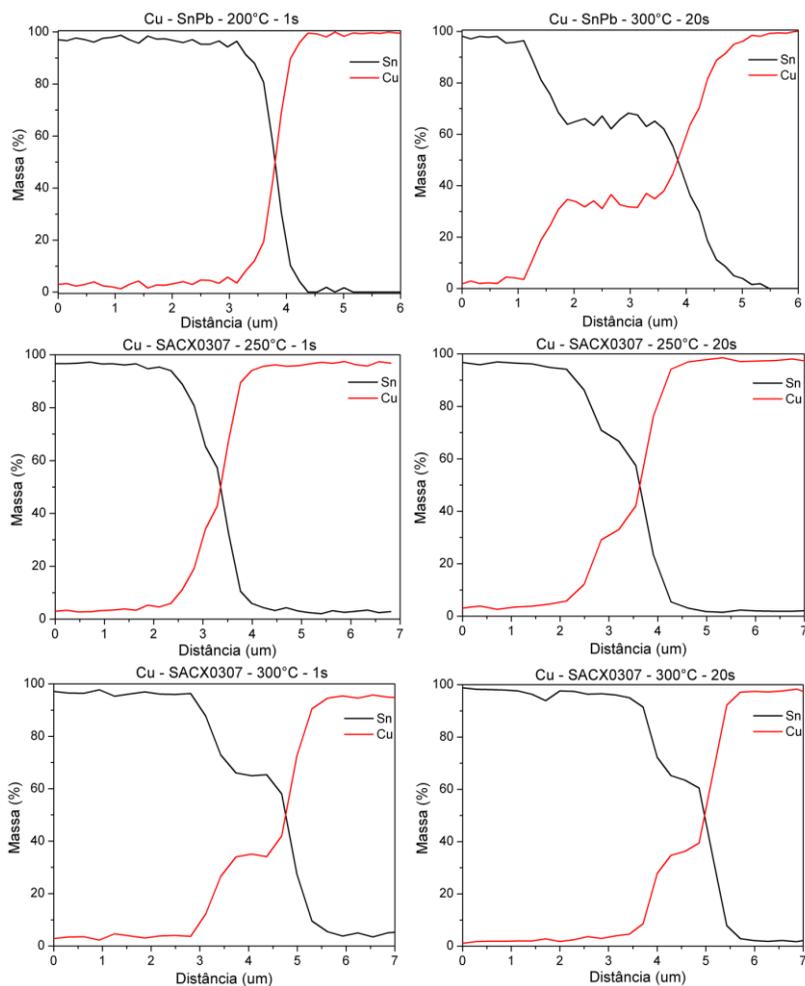


Fonte: Autor

Pela análise dos resultados, é possível perceber que os dois intermetálicos previstos para o sistema Cu-Sn ficam mais estáveis com o aumento da temperatura, porém, a partir de $415^{\circ}C$, o composto Cu_6Sn_5 atinge o ponto onde deixa de ser estável ($\Delta G > 0$). Fazendo um comparativo, o composto Cu_3Sn apresenta maior estabilidade em toda a faixa de temperatura avaliada pela simulação. O sistema Ni-Sn apresenta três possíveis compostos intermetálicos na faixa avaliada neste trabalho, sendo eles (em ordem decrescente de estabilidade): Ni_3Sn , Ni_3Sn_2 e Ni_3Sn_4 . Nota-se que o composto mais estável, Ni_3Sn , aumenta ligeiramente a energia livre com o aumento de temperatura, já os demais compostos permanecem praticamente inalterados. Os resultados encontrados para ambos os sistemas estão de acordo com o apresentado por outros trabalhos. (LAURILA; VUORINEN; KIVILAHTI, 2005; STALTER; PUTTLITZ, 2004)

Apesar da diferença de estabilidade entre os compostos, diversos trabalhos reportam a formação dos intermetálicos menos estáveis durante o processo de montagem de placas eletrônicas. Neste sentido, foi realizado análises por EDS em linha junto à interface dos materiais para identificar qualitativamente os compostos gerados e como a temperatura e o tempo podem afetar a formação dos mesmos. Os resultados obtidos para o cobre estão apresentados na Figura 59.

Figura 59 - Medidas de composição química próximo à interface de Cu com as ligas SnPb e SACX0307 em diferentes condições.



Fonte: Autor

As análises dos perfis de composição química mostram a existência de um patamar existente na composição próxima a 60%Sn-40%Cu, o qual cresce em função do aumento de temperatura e, em temperaturas menores, do tempo. Este patamar corresponde à formação do composto intermetálico Cu_6Sn_5 , o qual, por sua vez, corresponde ao

composto menos estável previsto pela simulação. A existência desse composto é relatada também por outros trabalhos, que mostram que a velocidade de reação é maior que a do composto Cu_3Sn . Neste caso, tem-se que a cinética da reação prevalece sobre a termodinâmica de estabilidade.

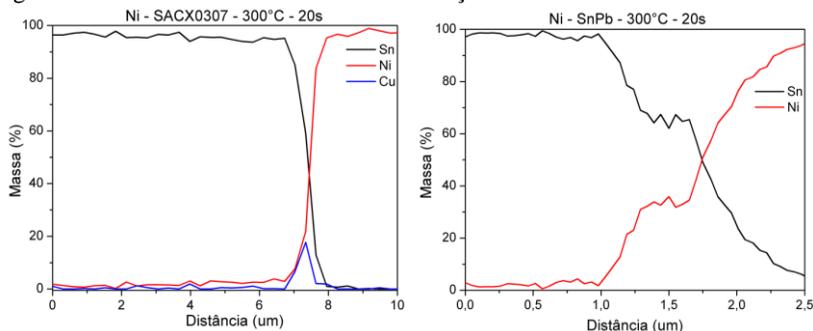
O aumento da temperatura e do tempo podem ser diretamente relacionados com a taxa de dissolução do cobre e com o tempo necessário até que seja atingido o limite de solubilidade metaestável, conforme já abordado no trabalho de RIZVI *et.al*. O aumento de temperatura aumenta a taxa de dissolução, sendo assim, o tempo até ser atingido a solubilidade máxima é pequeno, já em temperaturas menores há a necessidade de tempos maiores para que este estado seja atingido. (RIZVI; LU; BAILEY, 2009)

É possível perceber que a liga de solda também influenciou no perfil de composição química mensurado. Comparando as medidas realizadas na condição de ensaio de 300°C e 20 segundos de contato, é possível perceber que a região em com composição quase fixa na proporção 60%Sn-40%Cu em massa, manteve-se por uma distância maior para a liga SnPb do que para a liga SACX0307. Este resultado é um indicativo de que o composto intermetálico pode ser mais espesso nessa condição, algo que contraria o esperado para uma liga rica em estanho. Normalmente, é datado na literatura que, quanto maior a concentração de estanho, maior será a capacidade de dissolução de cobre, processo este que tem relação direta com a formação dos compostos intermetálicos. No entanto, também é datado que a adição de 0.1%Bi existente para a liga SACX0307, diminui a taxa de dissolução de cobre, algo que poderia contrabalancear a características das ligas com alto teor de Sn citada e que estaria de acordo com os resultados aqui observados e analisados.

Já para os resultados com os filamentos de Ni, Figura 60, apresentam um perfil diferente em relação ao cobre. As análises, utilizando os mesmos parâmetros de aquisição, não revelaram a formação de intermetálicos, representado pela ausência de linhas com composição fixa próximo às concentrações dos possíveis compostos, 85%Sn-15%Ni para Ni_3Sn , 57%Sn-43%Ni para Ni_3Sn_2 e 67%Sn-33%Ni para Ni_3Sn_4 . Essa diferença entre o Cu e Ni, pode ser atribuída à grande diferença existente entre as taxas de dissolução destes materiais, conforme já mostrado no Quadro 2, no qual apresenta que a taxa de dissolução do cobre chega a ser 30 vezes superior à do níquel na faixa de temperatura avaliada nesse trabalho. Tendo isto em vista, foi utilizado uma análise mais refinada, buscando identificar o composto formado, para tal utilizou-

se a amostra com liga SnPb em temperatura de 300°C e 20 segundos de contato, conforme apresentado na Figura 60.

Figura 60 - Medidas de composição química próximo à interface de Ni com as ligas SnPb e SACX0307 em diferentes condições



Fonte 1: Autor

A análise revelou que o composto formado apresentou espessura muito menor que o apresentado para o filamento de cobre, em concordância com a diferença de taxa de dissolução. Com relação ao composto formado, pode-se perceber que a composição química ficou na faixa de 60-70%Sn e 30-40%Ni, que comparando com os possíveis compostos tem-se que a composição está próxima do intermetálico Ni_3Sn_4 . Este resultado está de acordo com o relatado na literatura, que expressa a alta velocidade de reação para a formação deste composto em relação aos demais, mesmo após longos períodos de envelhecimento em altas temperaturas. Assim como no caso apresentado para o cobre, o composto formado é o que apresenta menor estabilidade termodinâmica.

A existência do intermetálico para a formação da junta de solda é muito importante, conforme já explicitado anteriormente. Porém, quando em excesso, a camada de compostos pode conferir um caráter frágil à interconexão, afetando diretamente a resistência e a confiabilidade. Os resultados mostram a efetividade da utilização de metalizações, como o Ni, com a finalidade de evitar a alta dissolução do metal base e gerar compostos intermetálicos demasiadamente espessos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados de ângulo de molhamento revelaram que o aumento de temperatura diminui o ângulo formado entre as ligas de solda no estado fundido com a superfície do cobre e do níquel. Este resultado foi associado à diminuição da tensão superficial e, conseqüentemente, aumento da fluidez do metal líquido, fatores estes que contribuíram para o melhor espalhamento sobre a superfície dos materiais avaliados. A variável tempo mostrou-se importante nas temperaturas mais baixas avaliadas, nas quais o aumento do tempo de contato favoreceu o molhamento (menor ângulo de contato), devido à passagem do regime de “não-molhamento”, existente logo após a fusão da liga de solda, para o estado de molhamento.

As ligas de solda estudadas apresentaram grandes diferenças entre si nas mesmas condições de ensaio (substrato, tempo e temperatura). A liga SnPb apresentou os menores valores de ângulo de molhamento, sendo relacionado à baixa tensão superficial ocasionada pela alta concentração de chumbo nessa liga. Este resultado era esperado devido à alta tensão superficial apresentada pelas ligas com alto teor de estanho, que é o caso da liga SACX0307. Apesar desta diferença, a liga que não contém chumbo atingiu valores de ângulo de molhamento dentro do regime adequado aos processos de soldagem branda, mostrando assim a sua potencialidade, em termos de processabilidade, de uso dentro da indústria de montagem de placas eletrônicas.

Ainda na análise de ângulo de molhamento, foi possível inferir que houveram diferenças de comportamento com os diferentes materiais de substrato utilizados. Em todas as condições estudadas, o ângulo de contato entre a solda e a superfície foi menor para o cobre, chegando ao espalhamento completo para a liga SnPb na temperatura de 300°C. Com base nestes resultados, foi possível inferir, através da equação de Young, que a tensão superficial do Ni é superior ao apresentado pelo Cu nas condições avaliadas nesse trabalho.

Em relação aos testes realizados com as amostras na forma de fio, no intuito de simular a soldagem branda seletiva de componentes THT com as metalizações de cobre e níquel, os resultados apresentaram semelhanças com os apresentados pelo o ângulo de molhamento. De maneira geral, as variáveis testadas apresentaram as mesmas tendências que as já descritas no ensaio anterior, mesmo em uma condição diferente. Apesar dos resultados de altura de molhamento apresentarem grandes dispersões, houve uma clara correlação com as variáveis de processo

estudadas. Porém, em decorrência da análise realizada para este ensaio, foi encontrado que o molhamento nos fios de Ni apresentou-se muito heterogêneo, devido a regiões do seu perímetro sem molhamento. Baseando-se nestes resultados, e em trabalhos realizados por outros autores, sugere-se que o fluxo utilizado para quebra dos óxidos das superfícies dos fios de cobre e níquel, os quais dificultam o molhamento, apresentou diferença de efetividade entre as superfícies avaliadas. Apesar deste fato, foi possível estabelecer uma janela de processos para a utilização das ligas SnPb e SACX0307, a qual ficou próxima ao sugerido pelo fabricante das ligas. Para esta análise, foi levado em conta, além dos resultados obtidos neste trabalho, possíveis danos que possam ocorrer em componentes e na placa eletrônica.

Observou-se também, através da técnica EDS, a existência de compostos intermetálicos junto à interface da liga de solda e dos filamentos avaliados. De forma qualitativa, foi feita a identificação que os compostos formados para o cobre e níquel, Cu_6Sn_5 e Ni_3Sn_4 respectivamente, os quais estavam de acordo com o reportado na literatura, apesar de estes serem os menos estáveis termodinamicamente, conforme mostrado nas simulações realizadas. Os resultados mostraram também a grande efetividade na utilização de Ni para metalização de terminais de cobre, diminuindo a taxa de dissolução de material e, conseqüentemente, a formação excessiva de compostos intermetálicos frágeis, os quais podem afetar as propriedades e a confiabilidade da interconexão.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar as propriedades mecânicas e a confiabilidade da interconexão formada pelas ligas de solda utilizadas com as metalizações avaliadas;
- Aumento no número de amostras para os ensaios de imersão dos fios com intuito de minimizar as dispersões dos resultados de altura de molhamento;
- Adotar diferentes procedimentos de preparação metalográfica para observação dos compostos intermetálicos de maneira a visualizar morfologia e mensurar a espessura da camada formada;
- Mensurar a taxa de dissolução de Ni e Cu para as duas ligas avaliadas e correlacionar estes resultados com a camada de intermetálicos formada;
- Avaliar o uso de diferentes fluxos e a sua relação com degradação nas temperaturas de trabalho e efetividade na quebra da camada óxida de diferentes metalizações de componentes e também de placas eletrônicas;
- Utilizar atmosfera redutora (hidrogênio) durante os ensaios de molhamento e verificar a possibilidade de realizar o processo de soldagem branda sem fluxo;
- Aplicar um planejamento de experimentos que leve em conta os parâmetros avaliados nesse trabalho e também a altura de elevação da solda líquida no processo de montagem THT;
- Avaliar a correlação existente entre a medida do ângulo de molhamento realizado pelo método de gota séssil e pelo método de balança de molhagem.

REFERÊNCIAS

ABINEE. **ABINEE**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>>. Acesso em: 25 out. 2015.

ABTEW, M.; SELVADURAY, G. Lead-free Solders in Microelectronics. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 27, n. 5–6, p. 95–141, jun. 2000.

ALMEIDA, C. DE; MADUREIRA, M. Substituição das soldas estanho-chumbo na manufatura: Efeitos na saúde do trabalhador e no desempenho ambiental. **SciELO Brasil**, v. 20, n. 1, p. 1–13, 2013.

AMORE, S. et al. Wetting behaviour of lead-free Sn-based alloys on Cu and Ni substrates. **Materials Science and Engineering: A**, v. 495, n. 1–2, p. 108–112, 2008.

ANDERSSON, J. O. et al. THERMO-CALC & DICTRA, Computational Tools For Materials Science. **Calphad**, v. 26, n. 2, p. 273–312, 2002.

ARFAEI, B. **The effects of nucleation and solidification mechanisms on the microstructure and thermomechanical response of Sn-Ag-Cu solder joints**. [s.l.] Graduate School of Binghamton University, 2010.

ARFAEI, B.; KIM, N.; COTTS, E. J. Dependence of Sn Grain Morphology of Sn-Ag-Cu Solder on Solidification Temperature. **Journal of Electronic Materials**, v. 41, n. 2, p. 362–374, 19 out. 2011.

ASHWORTH, M. A. et al. The effect of electroplating parameters and substrate material on tin whisker formation. **Microelectronics Reliability**, v. 55, n. 1, p. 180–191, 2015.

ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. **IPC-A-610D - Acceptability of Electronic Assemblies** Association Connecting Electronics Industries, , 2005.

AZIZ, M. S. A.; ABDULLAH, M. Z.; KHOR, C. Y. Effects of solder temperature on pin through-hole during wave soldering: thermal-fluid structure interaction analysis. **TheScientificWorldJournal**, v. 2014, p. 482363, 2014.

BADER, S.; GUST, W.; HIEBER, H. **Rapid formation of intermetallic compounds interdiffusion in the Cu□Sn and Ni□Sn**

systems *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995.

BOARETO, J. C. **Influência do teor do elemento índio nas propriedades termo-mecânicas de ligas para interconexão de componentes eletrônicos.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

BOEY, W. K.; WALKER, R. J. Wave Soldering of Surface Mount Components. **Circuit World**, v. 12, n. 3, p. 25–29, fev. 1986.

BRACCO, G.; HOLST, B. (EDS.). **Surface Science Techniques.** 1. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. v. 51

BRANZEI, M. et al. **The mischmetal and Bi94Zn6 effect alloying on SACX 0307** Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology. **Anais...IEEE**, maio 2013 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6648208>>

CAI, Z. et al. **Reduction of lead free solder aging effects using doped SAC alloys** 2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). **Anais...IEEE**, 2010 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5490796>>

CHASON, E. et al. Growth of whiskers from Sn surfaces: Driving forces and growth mechanisms. **Progress in Surface Science**, v. 88, n. 2, p. 103–131, 2013.

CHOOPUN, S.; HONGSITH, N.; WONGRAT, E. Metal-Oxide Nanowires by Thermal Oxidation Reaction Technique. In: **Nanowires.** [s.l.] InTech, 2010. p. 97–116.

COOMBS, C.; HOLDEN, H. **Printed Circuits Handbook.** 6. ed. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2007.

DORO, M. M. **Sistemática para Implantação da Garantia da Qualidade em Empresas Montadoras de Placas de Circuito Impresso.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

ERSA. **Ersa Selective Soldering Systems.** Disponível em: <http://www.ersa.com/media/pdf/prospekte_kataloge/loetmaschinen/selekti_v_prospekt_e_web.pdf>. Acesso em: 13 out. 2015.

FU, C.-C.; CHEN, C. Investigations of wetting properties of Ni–V and Ni–Co alloys by Sn, Sn–Pb, Sn–Cu, and Sn–Ag–Cu solders. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 42, n. 2, p. 350–355, 2011.

GOOSEY, M. **Electronic Waste Management**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2008.

GÖRLICH, J.; BAITHER, D.; SCHMITZ, G. Reaction kinetics of Ni/Sn soldering reaction. **Acta Materialia**, v. 58, n. 9, p. 3187–3197, 2010.

HO, C.-Y.; DUH, J.-G. Wetting kinetics and wettability enhancement of Pd added electrolytic Ni surface with molten Sn–3.0Ag–0.5Cu solder. **Materials Letters**, v. 92, n. 101, p. 278–280, 2013.

HUANG, M. L. et al. In situ study on dissolution and growth mechanism of interfacial Cu₆Sn₅ in wetting reaction. **Materials Letters**, v. 139, p. 42–45, 2015.

IPC. **IPC**. Disponível em: <http://www.ipc.org/ContentPage.aspx?pageid=Current-Industry-Trends>. Acesso em: 13 set. 2015.

ISLAM, M. N. et al. Comparative study of the dissolution kinetics of electrolytic Ni and electroless Ni-P by the molten Sn_{3.5}Ag_{0.5}Cu solder alloy. **Microelectronics Reliability**, v. 43, n. 12, p. 2031–2037, 2003.

KANLAYASIRI, K.; SUKPIMAI, K. Effects of indium on the intermetallic layer between low-Ag SAC0307-xIn lead-free solders and Cu substrate. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 668, p. 169–175, 2016.

KIM, D. et al. Formation and behavior of Kirkendall voids within intermetallic layers of solder joints. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 22, n. 7, p. 703–716, 2011.

KLENKE, B. B. Lead-Free Selective Soldering: The Wave of the Future. **SMTA International Conference Proceedings**, p. 1–12, 2002.

KOTADIA, H. R.; HOWES, P. D.; MANNAN, S. H. A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders. **Microelectronics Reliability**, v. 54, n. 6–7, p. 1253–1273, jun. 2014.

KUMAR, G.; PRABHU, K. N. Review of non-reactive and reactive wetting of liquids on surfaces. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 133, n. 2, p. 61–89, 2007.

LABIE, R.; RUYTHOOREN, W.; VAN HUMBEECK, J. Solid state diffusion in Cu-Sn and Ni-Sn diffusion couples with flip-chip scale dimensions. **Intermetallics**, v. 15, n. 3, p. 396–403, 2007.

LADOU, J. Printed circuit board industry. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 209, n. 3, p. 211–219, 2006.

LAURILA, T.; VUORINEN, V.; KIVILAHTI, J. K. Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 49, n. 1–2, p. 1–60, 2005.

LI, J. F.; AGYAKWA, P. A.; JOHNSON, C. M. A numerical method to determine interdiffusion coefficients of Cu₆Sn₅ and Cu₃Sn intermetallic compounds. **Intermetallics**, v. 40, p. 50–59, set. 2013.

LOPEZ-BUEDO, S.; BOEMO, E. **Electronic Packaging Technologies**. Disponível em: <<http://www.doe.carleton.ca/~tjs/10-Packaging.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

MARTORANO, K. M.; MARTORANO, M. A.; BRANDI, S. D. Optimal conditions for the wetting balance test. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 6, p. 3089–3095, 2009.

MAXFIELD, C. **BeBop to the boolean boogie**. 3rd. ed. [s.l.] Newnes, 2009.

MENDES, L. T. F. **Estudo experimental da migração eletroquímica em soldagem eletrônica Sn / Ag / Cu “Lead Free”**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

MITA, M. et al. Growth behavior of Ni₃Sn₄ layer during reactive diffusion between Ni and Sn at solid-state temperatures. **Materials Science and Engineering A**, v. 403, n. 1–2, p. 269–275, 2005.

MU, D. K. et al. Critical properties of Cu₆Sn₅ in electronic devices: Recent progress and a review. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, p. 1–22, 2015.

MÜLLER, W. H.; WEINBERG, K.; BÖHME, T. On the effect of Kirkendall voids on solder joint reliability. **PAMM**, v. 7, n. 1, p. 4030035–4030036, dez. 2007.

PARK, M. S.; GIBBONS, S. L.; ARRÓYAVE, R. Confinement Effects on Evolution of Intermetallic Compounds During Metallurgical Joint Formation. **Journal of Electronic Materials**, v. 43, n. 7, p. 2510–2520, 29 jul. 2014.

RIZVI, M. J. et al. Effect of adding 0.3wt% Ni into the Sn–0.7wt% Cu solder. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 438, n. 1–2, p. 122–128, 2007.

RIZVI, M. J.; LU, H.; BAILEY, C. Modeling the diffusion of solid copper into liquid solder alloys. **Thin Solid Films**, v. 517, n. 5, p. 1686–1689, 2009.

ROČAK, D. et al. Comparison of new no-clean fluxes on PCBs and thick film hybrid circuits. **Microelectronics Journal**, v. 30, n. 9, p. 887–893, 1999.

SATYANARAYAN; PRABHU, K. N. Reactive wetting, evolution of interfacial and bulk IMCs and their effect on mechanical properties of eutectic Sn-Cu solder alloy. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 166, n. 1–2, p. 87–118, 2011.

SCHMETTERER, C. et al. A new investigation of the system Ni–Sn. **Intermetallics**, v. 15, n. 7, p. 869–884, jul. 2007.

SHEN, J.; CHAN, Y. C.; LIU, S. Y. Growth mechanism of Ni₃Sn₄ in a Sn/Ni liquid/solid interfacial reaction. **Acta Materialia**, v. 57, n. 17, p. 5196–5206, 2009.

STALTER, K. A.; PUTTLITZ, K. J. **Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies**. 1st. ed. [s.l.] CRC Press, 2004.

SURASKI, D.; SEELIG, K. **Lead-free Solder Assembly for Mixed Technology Circuit Boards** SMTA International Conference Proceedings. **Anais...**2006

TU, K.-N. **Solder Joint Technology: Materials, Properties, and Reliability**. 1st. ed. [s.l.] Springer New York, 2007.

WANG, C. H.; LAI, W. H.; CHEN, S. W. Dissolution and interfacial reactions of (Cu,Ni)₆Sn₅ intermetallic compound in molten Sn-Cu-Ni solders. **Journal of Electronic Materials**, v. 43, n. 1, p. 195–203, 2014.

WEDI, A.; BAITHER, D.; SCHMITZ, G. Contact angle and reactive wetting in the SnPb/Cu system. **Scripta Materialia**, v. 64, n. 7, p. 689–692, 2011.

YANG, M. et al. Cu₆Sn₅ precipitation during Sn-based solder/Cu joint solidification and its effects on the growth of interfacial intermetallic compounds. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 582, p. 688–695, 2014.

YEO, H. K.; HAN, K. H. Wetting and spreading of molten SnPb solder on a Cu–10%Nb micro-composite. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 477, n. 1–2, p. 278–282, 2009.

YIN, L.; MESCHTER, S. J.; SINGLER, T. J. Wetting in the Au-Sn System. **Acta Materialia**, v. 52, n. 10, p. 2873–2888, 2004.

ZHANG, L.; SUN, G.; SHANG, J. K. **Effect of Copper Oxide Layer**

on Solder Wetting Temperature under a Reduced Atmosphere 2007 8th International Conference on Electronic Packaging Technology. **Anais...IEEE,** ago. 2007Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4441423>>. Acesso em: 2 set. 2015