

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**MÉTODOS ALTERNATIVOS DE FIXAÇÃO PARA COMPONENTES
DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

André Canal Marques
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**MÉTODOS ALTERNATIVOS DE FIXAÇÃO PARA COMPONENTES
DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

André Canal Marques

Tese para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**MÉTODOS ALTERNATIVOS DE FIXAÇÃO PARA
COMPONENTES DE CIRCUITOS IMPRESSOS**

André Canal Marques
Mestre em Engenharia

Trabalho realizado em regime de co-tutela no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no Programa de Ciencia e Ingeniería de Los Materiales da Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais (UFRGS)
Especialidad: Ciencia e Ingeniería de Los Materiales (UPC)

Porto Alegre
2015

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelos orientadores e banca examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientadores: Dra. Célia de Fraga Malfatti

Dr. José María Cabrera Marrero

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Maria Lluïsa MasPOCH - Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) – Barcelona - Espanha

Prof. Dr. Miquel Rovira - CTM Centre Tecnològic, Manresa - Espanha

Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit - PPGE3M/UFRGS - BRASIL

Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider – FEEVALE - BRASIL

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

DEDICATÓRIA

À minha mãe Ana, mana, família e sobrinhos queridos!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos seguintes:

A professora Célia de Fraga Malfatti do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o meu agradecimento pela orientação e dedicação no decorrer dos estudos e por acreditar desde o início nesse desafio.

Ao professor José María Cabrera Marrero, Director Area de Procesos de Conformado en Fundacio CTM Centre Tecnologic, do CTM Centre Tecnològic, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), pela orientação e pela grande ajuda e apoio durante minha estadia em Barcelona para a pesquisa e testes iniciais.

Aos professores Dr. Wilson Kindlein Junior (DEMAT), Dr. Carlos Pérez Bergmann (DEMAT), Dra. Andréa Moura Bernardes (DEMAT), Dra. Ruth Marlene Campomanes Santana (DEMAT) e aos demais professores do PPGE3M pela contribuição ao meu crescimento durante meus estudos como também aos colegas do PPGE3M, entre eles Franciélli Müller e Maria Rita Ortega Veja.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica (CMEM) da Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) da Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) pela oportunidade de realizar o meu doutorado.

Ao Germán Morillo Velazquez do Serveis tècnics de laboratório do Campus Vilanova i la Geltrú, UPC, pelo apoio nos primeiros testes realizados que me estimulou a avançar na pesquisa.

A empresa Lear Corporation através de José Antonio Cubero, *IMDS Coordinator Electronics Europe*, que permitiu minha pesquisa inicial sobre a composição das placas e estímulo a pesquisa por soluções ambientalmente corretas.

As empresas pela ajuda na confecção das placas finais para os testes, “Casa do Circuito” e “Tecnoflex Indústria Eletrônica Ltda.”, em especial ao Edson e ao engenheiro de qualidade Fernando e para o engenheiro Silvano da empresa “I.S.A Indústria de Tecnologia e Automação Ltda” pelo apoio no suporte de vibração.

A Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) pela ajuda nesta caminhada e aos colegas professores dos cursos de Design, Design de Produto e Engenharia de Materiais. Em especial aos laboratórios da Engenharia Elétrica, prof. Rodrigo Marques de Figueiredo, laboratoristas Márcio Stracke, Clarissa Rocha, Samuel Lessinger e ao laboratório CAD\CAE\CAM da Engenharia Mecânica, ao laboratorista Paulo Pereira.

Ao Instituto Tecnológico em Ensaio e Segurança Funcional (ITT Fuse) pelos testes finais realizados neste instituto contando com o apoio fundamental de Edilar Predabon, Eduardo Reis, Luiz Felipe Silveira. Também ao Instituto Tecnológico em Semicondutores (ITT Chip), especialmente o prof. Willyan Hasenkamp Carreira e o engenheiro Celso Peter pela grande ajuda nas dúvidas em relação aos testes realizados.

Ao Programa Erasmus Mundus (EURO BRAZILIAN WINDOWS II) pela oportunidade de bolsa durante meu doutorado sanduíche, através de Ana Reis da equipe de gestão de Projetos EBW II da Universidade do Porto.

A Secretaria de Relações Internacionais – RELINTER da UFRGS, através de Lizângela Guerra de projetos e convênios internacionais, pela ajuda e assessoria em todas questões de processo entre as instituições.

Aos amigos, em especial Felipe Luz, Liciane Bertol, Fabrício Severo, Marta Franck, Fernanda Venancio, Vanessa Rheinheimer e Fabiane Rheinheimer pela ajuda nesta caminhada.

À minha família, mãe Ana, mana Mariana, sobrinhos Victor e Dudu por todo apoio e por simplesmente existirem.

EPIGRAFE

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is to not stop questioning.”— Albert Einstein, *Relativity: The Special and the General Theory*

“Everything you can imagine is real!” - Pablo Ruiz Picasso

“The beginnings of all things are small” Marco Túlio Cícero

PUBLICAÇÕES E PATENTES

Os resultados das pesquisas obtidos durante o período do doutorado (2009-2015) foram publicados ou enviados para sua publicação nas seguintes revistas científicas:

[1] MARQUES, A. C.; VEGA, M. R. O.; MARRERO, J. M. C.; MALFATTI, C. Alternative methods to attach components in printed circuit boards to improve their recyclability. **DYNA (Medellín)**, v. 81, p. 146-152, 2014.

[2] MARQUES, A. C.; CABRERA, J. M.; MALFATTI, C. Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability. **Journal of Environmental Management**, v. 131, p. 298-306, 2013.

[3] MARQUES, A. C.; CABRERA, J. M.; MALFATTI, C. A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards. **SpringerPlus**, v. 2, p. 521, 2013.

[4] MARQUES, A.; MALFATTI, C. **Processo de produção de placas de circuito impresso e produto obtido**. 2013, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201300551, data de depósito: 07/03/2013. Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS

Uma parte do trabalho experimental realizado durante o doutorado foi divulgado em diversos congressos de âmbito nacional e internacional. Na continuação, se detalham os congressos em questão:

[1] MARQUES, A. C.; MARRERO, J. M. C.; Malfatti, Célia; RULDUA, M. L. M. Printed circuit boards: review the recycling of non-metallic fractions. In: **EUROMAT 2011 (European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes)**, 2011, Montpellier. Anais do EUROMAT 2011, 2011.

[2] MARQUES, A. C.; Malfatti, Célia; MARRERO, J. M. C. Teach of Materials Science and Materials Selection in a design course: a Brazilian experience with a focus on sustainability. In: **EUROMAT 2011 (European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes)**, 2011, Montpellier. Anais do EUROMAT 2011, 2011.

[3] MARQUES, A. C.; MARRERO, J. M. C.; Malfatti, Célia. Teaching materials focusing on sustainability: a Brazilian experience in a design course. In: **3rd International Materials Education Symposium**, 2010, Cambridge. Poster Session: "Enhancing Teaching and Learning", 2010.

RESUMO

Com a crescente demanda por inovação e o fato dos produtos apresentarem cada vez mais uma vida útil reduzida, estes geram resíduos e aumentam enormemente o volume dos lixões e aterros sanitários. Um dos segmentos de grande volume atualmente é o resíduo tecnológico. Isto reflete nas placas de circuito impresso (PCIs) que são a base da indústria eletrônica, que as torna em um grave problema social e uma ameaça ao meio ambiente. Esse tipo de resíduo é de difícil descarte, tendo em vista que sua reciclagem é complexa e cara, devido à diversidade de materiais e componentes existentes e sua difícil separação. As PCIs apresentam recentemente um problema de fixação, que está migrando da solda tradicional Sn-Pb para diversas ligas sem chumbo (*Lead-Free*). Esta substituição tenta minimizar o problema da solda Sn-Pb considerada tóxica; porém não altera o problema da separação dos componentes, para posterior reutilização e/ou reciclagem. No presente trabalho buscou-se o desenvolvimento e caracterização de métodos alternativos de fixação para componentes de circuitos impressos, com o objetivo de projetar e testar um sistema de fixação sem a utilização da solda metálica, para facilitar assim a reciclagem posterior deste tipo de produto. Para isso, estudaram-se os componentes e materiais existentes em PCIs, com foco nos tipos de solda utilizados, onde investigou-se as propriedades requeridas para fixação. Após, foram propostas novas formas de fixação dos componentes, realizaram-se protótipos e testes. Os testes iniciais foram realizados no laboratório do Campus Vilanova i la Geltrú, da UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), Espanha, onde buscou-se testar o funcionamento inicial da proposta escolhida para continuação do trabalho. Os testes finais, comparando a proposta final em relação às placas com sistemas comerciais convencionais de fixação, foram realizados no Itt Fuse (Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional) da UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos). O protótipo definitivo, da proposta foi obtido e montado por uma empresa de montagem de PCI's para maior confiabilidade. Foram realizados testes de ciclagem térmica, vibração e névoa salina, tendo sido realizadas análises visuais, de continuidade e inspeção por raios X, antes, durante e após os testes. Os testes demonstraram que, para o tipo de produto proposto (categoria de confiabilidade produto classe 1), norma IPC-A-600G (IPC, 2004), a proposta final de placa Conceito atendeu os requisitos de funcionamento da placa, comparando com os sistemas tradicionais Sn-Pb e *Lead-free*. Isso demonstra potencial para seguir com mais estudos relacionados, tendo como foco o impacto ambiental dessas placas de circuito impresso.

RESUMEN

Con la creciente demanda de innovación y la reducción gradual de la vida útil de los productos, éstos generan residuos y, en consecuencia, aumentan enormemente el volumen de basureros y rellenos sanitarios. En la actualidad, uno de los segmentos de tal volumen son los residuos tecnológicos. Esto se refleja en las placas de circuito impreso (PCIs), base de la industria electrónica, y las transforma en un grave problema social y una amenaza para el medio ambiente. El descarte de este tipo de residuos se hace difícil y su reciclaje, complejo y costoso, por causa de la diversidad de materiales y componentes existentes, y su difícil separación. Actualmente, las PCIs presentan problemas de fijación, donde se utiliza soldadura tradicional de Sn-Pb y que se pretende reemplazar por diversas aleaciones sin plomo (*Lead-free*). El objetivo de esta sustitución es minimizar el problema de Sn-Pb considerada tóxica; sin embargo, no altera el problema de separación de componentes para posterior reutilización o reciclaje. En el presente trabajo, se desarrollaron y caracterizaron métodos de fijación alternativos para componentes de circuitos impresos, con el fin de diseñar y evaluar un sistema de fijación exento de soldadura metálica, para facilitar el posterior reciclaje. Entonces, se estudiaron los diversos componentes y materiales existentes en PCIs, con énfasis en los tipos de soldadura utilizados, donde se investigaron las propiedades necesarias para la fijación. Luego, se presentaron las propuestas de nuevas formas de fijación de componentes, se elaboraron prototipos y se realizaron las evaluaciones correspondientes. La evaluación inicial se llevó a cabo en los laboratorios del Campus Vilanova i la Geltrú, de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), España, donde se buscaba verificar el funcionamiento de la propuesta inicial elegida, para dar continuación al trabajo. La evaluación final incluye la comparación de la propuesta final con placas que utilizan sistemas comerciales convencionales de fijación, y se ejecutó en el Itt Fuse (Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional) da UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos). El prototipo definitivo, de la propuesta, lo fabricó y lo ensambló una empresa de ensamblado de PCIs, para mayor confiabilidad. Se realizaron ensayos de ciclado térmico, vibración y niebla salina, así como análisis visual y de continuidad, e inspección por rayos X, antes, durante y después de cada ensayo. Los resultados mostraron que, para el tipo de producto propuesto (categoría de confiabilidad producto clase 1), norma IPC-A-600G (IPC, 2004), la propuesta final de la placa Conceito, cumplió con los requisitos de funcionamiento de la placa, en comparación con los sistemas tradicionales de Sn-Pb y *Lead-free*. De esta forma, está demostrado el potencial para continuar con estudios futuros, con énfasis en el impacto ambiental de las PCIs.

ABSTRACT

The growing demand for innovation and the ever-shorter product lifespan result in a great amount and diversity of waste disposal at dumps and landfills. One of the fastest growing waste types nowadays is e-waste. Consequently, Printed Circuit Boards (PCBs), which are the basis of the electronic industry, have become a serious social problem and a threat to the environment. Wasted PCBs recycling processes, therefore, have been extensively investigated. These processes can be quite complex and expensive since the recycling of PCBs involves a variety of materials and components that are not easily separated. Recently, there has been a change in the way PCBs are fixed. The traditional Sn-Pb solder has been substituted for a *Lead-Free* solder in an attempt to minimize the toxic composition of the first. Nevertheless, this substitution has not solved the problem of component separation for future reuse and/or recycling. The present work aims at developing and testing possible alternative fixing methods for the components in printed circuits without the use of a metallic solder in order to facilitate its subsequent recycling process. The first step was the study of the components and materials present in PCBs with emphasis on the types of solders used and the required fixing properties. Then, new fixing methods were proposed, followed by the development of prototypes and tests. These initial tests were undertaken in a laboratory at the Vilanova i La Geltrú Campus, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) in Spain. At this stage, the main objective was to test the initially chosen proposal for further studies. The final tests, comparing the ultimate proposal with boards that employ commercially conventional fixing systems were done at Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (Itt Fuse), Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) in Brazil. The final prototype version was assembled by a PCB company to ensure its reliability. Thermal cycling, vibration and salt-spray tests were conducted with continuity and inspection x-ray visual analysis both during and after the tests. The tests showed that, for the type of product proposed (reliability category product class 1), norm IPC-A-600G (IPC, 2004), the ultimate proposal for a Concept board fulfilled all functioning requirements when compared to the traditional Sn-Pb and the *Lead-Free* systems. Thus, results point at potential further studies on the environmental impact of this alternative type of PCB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das placas de circuito impresso.	9
Figura 2 - Componentes montados em um lado e ambos os lados da placa.....	10
Figura 3 - Configurações de encapsulamentos de CI montados em superfície.	11
Figura 4 - Quatro métodos de fixação para placas de circuito impresso (PCIs): (a) SMT; (b) PTH; (c) Pressão de interconexão e (d) Press-fit.....	13
Figura 5 - Imagem da solda Sn/Pb produzida pela empresa Würth Elektronik GmbH.....	16
Figura 6 - Solda BGA Tin/Lead (chumbo-estanho) na esquerda e solda BGA <i>Lead-Free</i> ao lado.	18
Figura 7 - Adesivo ACA no papel de interligação Flip Chip.	20
Figura 8 - Placa de circuito impresso com o processo e o conceito TWINflex® da empresa.	23
Figura 9 - Placa de circuito impresso tradicional e o conceito TWINflex®.	23
Figura 10 - Microvias sendo perfuradas a laser.....	24
Figura 11 - Processo básico para construção de um único componente da camada.	25
Figura 12 - A interconexão de lado a lado pode ser aumentada por várias estruturas conectoras ou circuitos flexíveis.....	26
Figura 13 - A) Despejo de placas de circuito tratadas com ácido e resíduos de processamento ao longo do rio Lianjiang na China. B) Recuperação de ouro a partir dos resíduos de PCI usando banhos ácidos.	28
Figura 14 - O ciclo de vida do produto o qual a ACV atende este modelo.	34
Figura 15 - A) Emissões de Dióxido de Carbono a partir dos ciclos de vida dos tipos de solda. B) Consequentes resultados de CO ₂ quando subtraindo CLCA para 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu a partir de CLCA de 62Sn-36Pb-2Ag.	36
Figura 16 - A) Resultados atribuídos ao LIME para 63Sn-37Pb e 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu. Consequentes resultados do LIME quando o substrato CLCA de 63Sn-37Pb a partir do CLCA de 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu.	37
Figura 17 - Relativas toxicidades e lixiviabilidade metais selecionados usados em soldas e adesivos.	39
Figura 18 - Imagem MEV com “whiskers” de Sn.....	39
Figura 19 - Fluxo do processo durante o pré-tratamento do lixo eletrônico.	42
Figura 20 - Uma máquina semi-automática de desmontagem (A e B) e um aquecedor simples utilizando métodos primitivos (C e D).	43
Figura 21 - Separador eletrostático corona de laboratório.	44
Figura 22 - Destinação final de RSU em 2013 (t/dia).	47
Figura 23 - Esquema do desenvolvimento sustentável.....	48
Figura 24 - A seleção do material é determinada pela função. A forma às vezes influencia a seleção	51
Figura 25 - Software CES Edupack 2014 integrando a ferramenta de análise de ciclo de vida.	52
Figura 26 - Processo de acoplamento do Snap-fit.	57
Figura 27 - Método de fixação press-fit para PCIs.....	58
Figura 28 - Hierarquia de testes de placa de circuito impresso.	65
Figura 29 - Inspeção por Raios-X.....	67
Figura 30 - Esquema de um sistema típico de uma câmera de ciclagem térmica e aquisição de dados.	69
Figura 31 - Perfil esquemático de ciclos térmicos para o teste de fadiga térmica do conjunto solda.....	70
Figura 32 - Fluxograma do processo.	74

Figura 33 - Placas de circuitos impressos utilizadas para as análises iniciais (A e B respectivamente).....	75
Figura 34 – Tipos de elementos de junção encontrados na placa A.....	77
Figura 35 - Conceito de colocação dos componentes com um elemento acoplado.	79
Figura 36 - Conceito representado em CAD do elemento de junção.	80
Figura 37 - Conceito de colocação dos componentes sob pressão e fechamento a vácuo.	81
Figura 38 - Conceito de colocação dos componentes sob pressão e fechamento a vácuo feitos em software CAD.	81
Figura 39 - Conceito de colocação dos componentes com o contato feito internamente.....	82
Figura 40 - Conceito de colocação dos componentes feitos em CAD.	82
Figura 41 - Conceito de colocação dos componentes feito em software CAD.	83
Figura 42 - Conceito de colocação dos componentes com a alternativa de combinação de ideias.....	84
Figura 43 - Conceito de colocação dos componentes realizado em software CAD.....	84
Figura 44 - Conceito de colocação dos componentes com o contato feito internamente simulado em CAD.	85
Figura 45 - Conceito de colocação dos componentes com o contato feito internamente.....	86
Figura 46 - Simulação da colocação dos componentes em CAD.....	86
Figura 47 - Simulação da colocação dos componentes em CAD.....	87
Figura 48 - Propostas realizadas para a fixação dos elementos.....	87
Figura 49 - Fluxograma do processo de protótipos e análises.....	90
Figura 50 - Fluxograma do processo da produção da PCI	92
Figura 51 - Placa Controle confeccionada usada para o monitoramento da ciclagem térmica.....	95
Figura 52 - Placas corrente usadas para o teste de ciclagem térmica.	97
Figura 53 - Fluxograma das etapas de testes que foram realizados.....	98
Figura 54 - Equipamento de máquina inspeção por raios-x.	99
Figura 55 - Esquema mostrando os pontos de controle de continuidade.	99
Figura 56 - Rampa do teste de ciclagem térmica.....	101
Figura 57 - Equipamento de ciclagem térmica.	101
Figura 58 - Descritivo dos componentes para as placas corrente.....	102
Figura 59 - Montagem do suporte para o teste de vibração no equipamento.....	104
Figura 60 - Câmera de Névoa Salina com os protótipos.	105
Figura 61 - Equipamento microscópio ótico.	106
Figura 62 – Pontos avaliados nas placas com solda.	106
Figura 63 - Pontos que foram avaliados nas placas Conceito.	107
Figura 64 - Protótipo da placa com o método de união desenvolvido.	108
Figura 65 - Placa em 3D realizada em software Rhinoceros 4.0 o protótipo da placa montada.	108
Figura 66 - Desenho do circuito e placa com o circuito proposto utilizando SMD e Trugh hole. Protótipos das placas com a solda chumbo-estanho e <i>Lead-free</i>	109
Figura 67 - Protótipos das placas com a solda chumbo-estanho, <i>Lead-free</i> e placa Conceito.	109
Figura 68 - Imagem das trilhas de cobre e das uniões realizadas com pressão.....	110
Figura 69 - Funcionamento da placa.	110
Figura 70 - Desenho do circuito e a placa Controle.	111
Figura 71 - Desenho do circuito e a placa Corrente.	111
Figura 72 - Exemplo de uma placa com união através da solda (A) e outra realizada com pressão (B).....	112
Figura 73 - Solda <i>Lead-Free</i> com destaque ao componente SMD. Fonte: autor.	113

Figura 74 – Avaliação por Raios-X dos componentes do tipo “TIP” com hastes sem uma pressão excelente para a placa Conceito. Fonte: Autor.	114
Figura 75 - Inspeção por raios-X das placas Lead-Free (A) e das placas Sn-Pb (B).	115
Figura 76 - Pontos com maiores problemas nas placas montadas sob pressão (Conceito). ...	116
Figura 77 - Resultado da ciclagem térmica em relação a corrente elétrica (A) e temperatura (°C) em relação ao tempo (minutos).	117
Figura 78 – Monitoramento da corrente para os primeiros 45 ciclos de variação da temperatura.	118
Figura 79 – Monitoramento da corrente para os 45 ciclos intermediários do teste de variação da temperatura.	119
Figura 80 – Monitoramento da corrente para os últimos 5 ciclos de variação da temperatura.	119
Figura 81 - Gráfico de correlação (corrente x temperatura) em relação ao teste de ciclagem térmica.	120
Figura 82 - Gráfico de correlação (corrente x tempo) em relação ao teste de ciclagem térmica.	121
Figura 83 – Resultado da resistência (Ω) em relação ao tempo (minutos).	122
Figura 84 - Gráfico de correlação (resistência x tempo) em relação ao teste de ciclagem térmica.	123
Figura 85 - Placa Sn-Pb com sinais de fluxo.	124
Figura 86 - Placa <i>Lead-Free</i> com muita presença de fluxo utilizado no processo.	124
Figura 87 - Placa Conceito com destaque no adesivo hotmelt.	125
Figura 88 - Teste de vibração em operação nos sentidos longitudinal, transversal e vertical.	126
Figura 89 - Tela de configuração e monitoramento do teste de vibração.	126
Figura 90 - Problema visível no componente do tipo “TIP”.	127
Figura 91 - Exemplo de hastes dos componentes viradas para o lado incorreto não seguindo a trilha.	128
Figura 92 - Problemas de projeto com a trilha sendo muito fina.	128
Figura 93 - Equipamento de névoa salina.	129
Figura 94 - Quantidade de pontos no teste de névoa salina – 24h.	134
Figura 95 - Quantidade de pontos no teste de névoa salina – 24h.	138
Figura 96 - Transmissão de Vapor de Água (g.mm/m ² .day) vs. Preço (BRL/kg).	139
Figura 97 - Absorção da água @ 24 hrs (%) vs. Preço (BRL/kg).	139
Figura 98 - Permeabilidade (O ₂) (cm ³ .mm/m ² .day.atm) vs. Preço (BRL/kg).	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revisões anteriores sobre Placas de circuito impresso.	4
Quadro 2 - Conceitos ligados ao desenvolvimento sustentável.	49
Quadro 3 - Os seis típicos grupos de materiais para o produto, além de exemplos e aspectos para o desenvolvimento sustentável de produtos.	50
Quadro 4 - Guia de elementos de junção.....	55
Quadro 5 - Componentes de cada placa Controle.	94
Quadro 6 - Componentes de cada placa.	96
Quadro 7 - Imagens das placas com os pontos de corrosão depois de 24 horas.	130
Quadro 8 - Imagens das placas com os pontos de corrosão depois de 96 horas.	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição típica das placas de circuito impresso.	12
Tabela 2 - Ligas de soldas <i>Lead-Free</i> candidatas.....	17
Tabela 3 - Emissão de CO ₂ e do ciclo de vida de alguns componentes eletrônicos.	35
Tabela 4 - Maiores contribuintes para a AT dado por tipo de solda.	38
Tabela 5 - Resultados dos piores casos de lixiviação de metais usados em soldas.	39
Tabela 6 - Condutividade elétrica de elementos de solda e ligas.	60
Tabela 7 - Características para teste de vários níveis de qualidade.....	66
Tabela 8 - Típicos parâmetros de ensaios de ciclagem térmica para segundo nível de confiabilidade de qualificação.	69
Tabela 9 - Condições de teste para choque térmico.	71
Tabela 10 - Níveis de teste dos componentes.....	72
Tabela 11 - Tabela comparativa entre as PCIs A e B com relação aos materiais que as constituem.....	76
Tabela 12 - Elementos de junção encontrados nas PCIs analisadas.....	78
Tabela 13 - Análise dos conceitos gerados em relação às diretrizes do projeto.....	88
Tabela 14 - Quantidade de pontos de corrosão depois de 24 horas de teste.....	133
Tabela 15 - Quantidade de pontos de corrosão depois de 96 horas de teste.....	137
Tabela 16 - Absorção e permeabilidade do silicone e borracha IIR.....	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACA	Adesivo condutor anisotropicamente (<i>Anisotropically conductive adhesives</i>)
ACV	Avaliação do ciclo de vida
ALCA	Atributo da Avaliação do ciclo de vida (<i>Attributional Life Cycle Assessment</i>)
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AT	Toxicidade do ar OSHA (<i>OSHA Air Toxicity</i>)
BFR	Retardantes de chama bromados (<i>Brominated flame retardant</i>)
BGA	Matriz de esferas de solda (<i>Ball Grid Array</i>)
CAD	Design Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Assistida por Computador (<i>Computer-Aided Engineering</i>)
CAM	Manufatura Assistida por Computador (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
CARPP	Planejamento do Processo de Reciclagem com Auxílio do Computador (<i>Computer Aided Recycling Process Planning</i>)
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CHIP	Circuito Integrado
CI	Circuito Integrado
CLCA	Consequência da Avaliação do ciclo de vida (<i>Consequential Life Cycle Assessment</i>)
DFA	Design para a Montagem (<i>Design for Assembly</i>)
DFD	Design para a Desmontagem (<i>Design for Disassembly</i>)
DFE	Design para o Meio Ambiente (<i>Design for Environment</i>)
DFS	Design para o Serviço (<i>Design for Service</i>)
DSC	Calorimetria exploratória diferencial (<i>Differential scanning calorimetry</i>)
ECA	Adesivo eletricamente condutivo (<i>Electrically conductive adhesive</i>)
EDX	Espectroscopia de Raios-X por dispersão em energia (<i>Energy Dispersive X-Ray Detector</i>)
EEE	Equipamentos elétricos e eletrônicos
EOL	Final da vida útil (<i>End-of-life</i>)

EPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA (<i>US Environmental Protection Agency</i>)
EPR	Responsabilidade alargada do produtor (<i>Extended Producer Responsibility</i>)
EPS	Environmental Priority Strategies in Product Development
ERP	Planejamento de recursos empresariais (<i>Enterprise Resource Planning</i>)
ETSP	Environmental Total Solution Provider
E-Waste	Resíduo eletrônico
FLIP CHIP	Conexão de chip de colapso controlado (<i>C4 - Controlled Collapse Chip Connection</i>)
FR-4	Fibra de vidro com resina epóxi (<i>Glass-reinforced Epoxy Laminate sheets</i>)
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
HARL	<i>Home Appliance Recycling Law</i>
HDI	Interligação de alta densidade (<i>High Density Interconnect</i>)
HI-POT	Elevado Potencial (<i>High Potential</i>)
IC	Circuito Integrado (<i>Integrated circuits</i>)
ICA	Adesivos condutores isotropicamente (<i>Isotropically conductive adhesives</i>)
IM	Materiais de Interconexão (<i>Interconnection materials</i>)
IPC	<i>Association Connecting Electronics Industries</i> (Associação de Indústrias de Conexão Eletrônicas). Antigamente chamada de Institute for Printed Circuits e Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits.
ISO	Organização Internacional para Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
ITT FUSE	Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional
JEDEC	<i>Joint Electron Devices Engineering Council</i>
JPY	Iene Japonês (<i>Japanese yen</i>)
LAPEC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão - UFRGS
LCA	Avaliação do ciclo de vida (<i>Life Cycle Assessment</i>)
LCCC	<i>Leaded Ceramic Chip Carrier</i>
LCI	Inventário do ciclo de vida (<i>Life Cycle Inventory</i>)
LDSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
LEAD-FREE	Liga sem chumbo
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)

LIME	Avaliação do ciclo de vida baseado em modelagem do ponto final (<i>Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling</i>)
MF	Frações metálicas (<i>Metal Fraction</i>)
MVI	Inspeção Visual Manual (<i>Manual Visual Inspection</i>)
NBR	Norma Brasileira
NCA	Adesivos não condutores (<i>Non conductive adhesives</i>)
NEMI	Iniciativa dos fabricantes nacionais de eletrônicos (<i>National Electronics Manufacturing Initiative</i>)
NMFS	Frações não-metálicas (<i>Non-metallic Fractions</i>)
NOAEL	Não Observado Limite Efeito Adverso (<i>No Observed Adverse Effect Limit</i>)
PBB	Bifenilos Polibromados (<i>Polybrominated biphenyl</i>)
PBDD/Fs	Dibenzodioxinas e Dibenzofuranos Polibromados (<i>Polybrominated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans</i>)
PBDE	Éteres Difenil Polibromado (<i>Polybrominated diphenyl ethers</i>)
PB-FREE	Liga sem chumbo
PBGA	<i>Plastic Ball Grid Array</i>
PCDD/Fs	Dibenzeno-P-Dioxinas Policloradas (<i>Polychlorinated dibenzodioxins</i>)
PCI	Placa de Circuito Impresso (<i>Printed Circuit Board</i>)
PLCC	<i>Plastic leaded chip carrier</i>
PLM	Gerenciamento do ciclo de vida do produto (<i>Product Lifecycle Management</i>)
PTH	<i>Plated Through Hole</i>
QFP	<i>Quad Flat Package</i>
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>)
ROHS	Restrição de Certas Substâncias Perigosas (<i>Restriction of Certain Hazardous Substances</i>)
RPCI	Resíduo de placa de circuito impresso
RS	Espectroscopia Raman (<i>Raman spectroscopy</i>)
RSU	Resíduo sólido urbano
SI	Sistema Internacional de Unidades
SMD	Dispositivos de Montagem superficial (<i>Surface-mount device</i>)
SMT	Tecnologia de Montagem Superficial (<i>Surface-mount technology</i>)
SOIC	<i>Small Outline Integrated Circuit</i>
SOJ	<i>Small outline J-leaded package</i>

TCLP	Procedimento das características de toxicidade da lixiviação (<i>Toxicity characteristic leaching procedure</i>)
TF	Temperatura de fusão
TG	Temperatura de transição vítrea
THT	Tecnologia Através de Furo (<i>Through-Hole Technology</i>)
TIN/LEAD	Liga estanho-chumbo
TQFP	<i>Thin Quad Flat Pack</i>
TSOP	<i>Thin-shrink small outline package</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
WBCSD	Conselho de Negócios do Mundo para o Desenvolvimento Sustentável (<i>World Business Council for Sustainable Development</i>)
WCED	World Summit Outcome Document
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>
XRF	Fluorescência de Raios-X (<i>X-Ray-Fluorescence</i>)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	V
AGRADECIMENTOS	VI
EPÍGRAFE.....	VIII
PUBLICAÇÕES E PATENTES	IX
PARTICIPAÇÃO EM CONGRESSOS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE QUADROS	XVII
LISTA DE TABELAS	XVIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIX
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Placas de circuito impresso (configuração).....	6
3.1.1 Estrutura e materiais	6
3.1.2 Métodos de fixação dos componentes em PCIs	13
3.1.2.1 Soldas com base Pb	16
3.1.2.2 Solda <i>Lead-free</i>	16
3.1.2.3 Adesivos condutores.....	19
3.1.3 Tipos de falhas.....	21
3.1.4 Alternativas para o processo tradicional.....	22
3.1.4.1. Empresa Würth Elektronik (TWINflex®).....	22
3.1.4.2. Empresa Verdant Electronics	24
3.2. Placas de circuito impresso x problema ambiental.....	27
3.2.1. Problema ambiental	27
3.2.2. Legislação.....	30
3.2.3. ACV – Avaliação do ciclo de vida das PCIs	32
3.2.4. Métodos de reciclagem.....	40
3.3 Design Sustentável	46
3.3.1 Desenvolvimento Sustentável.....	46
3.3.2. Materiais e sustentabilidade	49
3.3.3. Design para a montagem e desmontagem (DfA e DfD).....	54
3.4. Placas de circuito impresso (propriedades e pré-requisitos de projeto)	58
3.4.1. Condutividade elétrica.....	59
3.4.2. Fadiga térmica-mecânica.....	60
3.4.3. Resistência mecânica e vibração	62
3.4.4. Corrosão e umidade.....	63
3.4.5. Técnicas empregadas para caracterização das placas.....	64
4 ESTUDO DE PLACAS E DESENVOLVIMENTO DE PROPOSTAS.....	74
4.1. Materiais e métodos.....	74
4.1.1. Estudo inicial de duas placas	74
4.1.2. Estudo de propostas de fixação mecânicas para PCIs	75
4.2. Resultados e discussões	75
4.2.1. Estudo inicial de duas placas	76
4.2.2. Estudo de propostas de fixação mecânicas para PCIs	79
4.3. Considerações parciais	88

5 PROPOSTA FINAL: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	90
5.1. Materiais e métodos	90
5.1.1. Protótipos iniciais	90
5.1.2. Testes e análises iniciais	93
5.1.3. Protótipos finais	94
5.1.4. Testes e análises finais	97
5.1.4.1. Avaliações realizadas antes dos testes	98
5.1.4.2. Teste de ciclagem térmica	100
5.1.4.3. Teste de Vibração	103
5.1.4.4. Névoa salina	104
5.2. Resultados e discussões	107
5.2.1. Protótipos iniciais	107
5.2.2. Testes e análises iniciais	109
5.2.3. Protótipos finais	111
5.2.4. Testes e análises finais	112
5.2.4.1. Avaliações realizadas antes dos testes	112
5.2.4.2. Ciclagem térmica	116
5.2.4.3. Vibração	126
5.2.4.4. Névoa salina	129
5.3. Considerações parciais	141
6 CONCLUSÃO	142
7 CONCLUSION	144
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	146
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente inovação, têm-se hoje, cada vez mais, a produção de produtos que, acabam gerando resíduos e aumentando enormemente o volume dos lixões e aterros sanitários. Tratando-se especificamente dos eletrônicos, percebe-se um grande problema: o resíduo tecnológico. Esse resíduo é de difícil descarte, tendo em vista que sua reciclagem é complexa e cara. Desta forma, pensar em alternativas para o descarte desses materiais tecnológicos de maneira que não prejudiquem o meio ambiente, está chamando a atenção de muitos estudiosos de diferentes áreas.

Arelado a isso, há uma pressão da sociedade por produtos e sistemas ecologicamente corretos, e isso tem impulsionado novas legislações ambientais, principalmente na Europa. Uma destas tornam os produtores responsáveis pelos custos da coleta, do tratamento e da recuperação de seus produtos. Essas regras insistem no fato de que os produtos têm de ser projetados de modo a reduzir seu impacto ambiental, notadamente com o aumento da taxa de reciclagem. Assim, a tarefa de projetar um produto sustentável torna-se imprescindível para a sociedade atual.

Dos produtos eletrônicos, um dos principais componentes que não se chegou a uma solução eficaz de reaproveitamento e de reciclagem é a placa de circuito impresso (PCI). Ambientalistas, governantes e a sociedade em geral estão preocupados no sentido de pensar alternativas de reaproveitamento dos materiais da melhor maneira possível, já que hoje essas placas estão sendo apenas acumuladas em centros de triagem, sem uma solução plausível de execução de reciclagem.

Uma das principais dificuldades apontadas é a separação dos componentes e materiais, visto a diversidade destes para desempenhar as funções necessárias aos equipamentos. Este é um aspecto importante, a desmontabilidade dos produtos, influenciando diretamente na reciclabilidade destes materiais e componentes. Pois, para se separar os componentes eletrônicos e reaproveitar os materiais é preciso retirá-los da solda, sendo estes processos em alta temperatura que inutiliza geralmente os componentes pela temperatura aplicada, geralmente acima de 200 °C (DUAN et al., 2011).

Nota-se assim cada vez mais a importância da criação de produtos com menos materiais e com maior facilidade de desmonte no fim do seu ciclo-de-vida (*design for disassembly*). Alguns estudos estão sendo feitos para reduzir ou retirar completamente a solda no processo de confecção de uma placa de circuito impresso. Entre esses processos, destacam-se duas formas alternativas, uma desenvolvida pela empresa Würth Elektronik (TWINflex®) na Alemanha (WÜRTH ELEKTRONIK, 2010) e outra pela empresa Verdant Electronics nos

Estados Unidos da América (VERDANT ELECTRONICS, 2010). Estas alternativas apresentam soluções iniciais para o problema, ou diminuindo o uso da solda ou substituindo a solda por outro elemento de fixação como a resina, assim, não solucionando o problema da separação em si. Conclui-se que as formas que os componentes eletrônicos são fixados atualmente nas placas de circuito impresso ainda carecem de soluções adequadas. Somando-se a todos esses fatos, considera-se então como tema de pesquisa a ser trabalhado no doutorado os mecanismos de fixação presentes em uma placa de circuito impresso.

Conforme a norma IPC-A-600G (IPC, 2004), existe um grau aceitável de imperfeições de características específicas de placas de circuito impresso, que pode ser determinado pelo uso final pretendido. Assim são três classes gerais estabelecidas com base na confiabilidade funcional e de desempenho, tendo o foco do presente trabalho na Classe 1, que são produtos eletrônicos em geral, incluindo produtos de consumo, sendo o principal requisito a função da placa de circuito impresso, onde as imperfeições estéticas não são importantes. Esta classe de aplicação de produto representa o maior volume de produção, sendo os produtos de maior utilização e assim de maior consumo, tendo geralmente uma pequena vida útil, gerando grandes problemas ambientais.

No presente trabalho buscou-se o desenvolvimento de métodos alternativos de fixação para componentes de circuitos impressos, com o objetivo de projetar e testar um sistema de fixação sem a utilização da solda metálica, que facilite a remoção dos componentes para posterior reciclagem deste tipo de produto. Nesse contexto, foram estudados alguns assuntos relevantes para o desenvolvimento de novas alternativas de fixação para componentes de circuito impresso, tais como: Os componentes e materiais existentes nas placas de circuito impresso, seus tipos de fixação, ligas de solda existentes e alternativas para o processo tradicional; Avaliou-se o problema ambiental, legislação e métodos de reciclagem; Relatou-se a importância do design para a sustentabilidade das placas de circuito impresso; E investigou-se as propriedades e requisitos necessários de fixação e funcionamento com as técnicas empregadas para caracterização das placas.

Com relação ao procedimento experimental, são apresentados os materiais utilizados e os métodos empregados para confeccionar e testar os protótipos, sendo também especificados os equipamentos utilizados. Na sequência serão apresentados os resultados, as conclusões parciais dos testes iniciais e finais e as conclusões gerais deste estudo e por último as sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal propor e avaliar métodos alternativos para a fixação de componentes em uma placa de circuito impresso com o objetivo de substituir o método tradicional de soldagem para facilitar a separação dos componentes e assim sua reciclagem.

O objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento e caracterização de um método de fixação de componentes eletrônicos com o objetivo de substituição do método tradicional de soldagem.

Os objetivos específicos são:

- Estudar os componentes e materiais existentes em uma placa de circuito impresso, detalhando a quantidade de materiais existentes;
- Analisar os tipos de solda utilizados em placas de circuito impresso, estudando os materiais utilizados e as propriedades requeridas;
- Avaliar e propor um processo para fixação de um componente eletrônico em uma placa de circuito impresso;
- Propor novas formas de fixação dos componentes eletrônicos em uma placa de circuito impresso, propondo alternativas aos processos de solda nas placas de circuito impresso;
- Prototipar e testar esses sistemas alternativos para fixação dos componentes na placa de circuito impresso comparando com o sistema tradicional.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta conceitos e métodos importantes à compreensão e ao posicionamento do tema da pesquisa, dando uma visão geral da literatura sobre placa de circuito impresso com foco em sustentabilidade aplicada ao tipo de fixação de componentes eletrônicos. Neste, apresenta-se uma visão holística da PCI, cobrindo uma ampla gama de trabalhos publicados. Compreende os seguintes tópicos: Placas de Circuito Impresso (configuração); Placas de circuito impresso (propriedades e pré-requisitos de projeto); Placas de circuito impresso x problema ambiental; Design Sustentável. O quadro 1 mostra as referências citadas organizadas em categorias apropriadas. Como pode ser visto neste quadro, há uma extensa literatura sobre a reciclagem de placas de circuito impresso, mas não há estudos extensos sobre novos tipos de montagem e de fixação dos componentes, dado que a maioria dos estudos indica o problema ambiental da solda de Chumbo-Estanho e alternativas de soldas *Lead-Free*.

Quadro 1 - Revisões anteriores sobre Placas de circuito impresso.

Escopo	Referências
1. Placas de circuito impresso (configuração)	
Estrutura e materiais das PCIs	Ansi/Ipc (1998); Bernardes et al. (1997); Gao, Li e Zhang (2002); Goosey e Kellner (2002 e 2003); Guo, Guo e Xu (2009); Hall e Williams (2007); He et al. (2006); Hwang (1996); Ipc (2003 e 2004); Jawitz (1997); Ladou (2006); Lassen e Lokee (1999); Marques, Cabrera e Malfatti (2013); Nakahara (2008); Theo (1998); Wilkinson, Duffy e Crowe (2001); Wong e Lu (2009).
Métodos de fixação dos componentes em PCIs	Ayob e Kendall (2005 e 2008); Barnes (2010); Fenner (2008) Freedman (2008a); Grigoletto e Ferreira (1999); Grigoletto et al. (2003 e 2006); Maestrelli e Grigoletto (2006).
Solda com base Pb	Andrae (2010); Duan et al., 2011); Grigoletto et al. (2003); Harris e Whitmore (1993); Hwang (1996); Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007); Würth Elektronik (2010).
Ligas de <i>Lead-Free</i>	Andrae (2010); Coombs (2008); Freedman (2008b); Grusd (1998); Guo (2007); Lee et al. (2007); Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007); Nousiainen et al., 2006; Subramanian (2007); Suganuma (2001); Wu e Wong (2007); Zou et al. (2009).
Adesivos condutores e press-fit	Andrae (2010); Li e Wong (2006); Mo (2005); Morris (2005); Morris e Liu (2007).
Tipos de falhas	Coombs (2008); Kamat, Spilar e Yeager (1995); Khandpur (2005).
Alternativas para o processo tradicional	Fjelstad (2007 e 2008); Keeping (2000); Khandpur (2005); Marques et al. (2014); Schischke, Hagelüken e Steffenhagen (2010); Veit et al. (2005); Veit (2005); Verdant Electronics (2010); Würth Elektronik (2010).
2. Placas de circuito impresso (propriedades e pré-requisitos de projeto)	
Condutividade elétrica	Askeland (2001); Cambridge Engineering Selector (2014); Halliday, Resnick e Walker (2012); Hwang (1996).
Fadiga térmica-mecânica	Askeland (2001); ASTM E1823-96 (1996); Boulaajaj, Cabrera e Prado (2008); Coombs (2008); Meyers e Chawla (1999); Suresh (1998); Zuchowski (2000).

Resistência mecânica e Vibração	Ashby and Jones (2005); Beer et al. (2013); Cimm (2015); Coombs (2008); Hibbeler (2010); IPC-2221 (1998); Khandpur (2005); Melconian (2007); Zeng et al. (2013).
Corrosão e umidade	Bardal (2004); Callister (2007); Gentil (2011).
Técnicas empregadas para caracterização das placas	ASTM (2011); Coombs (2008); Defense Logistics Agency (2014); Doro (2004); Ge Measurement & Control (2015); IPC-9252 (2001); IPC-9252A (2008); IPC-9701A (2006); IPC-TM-650 (2009); Jedec (2002); Juran (1988); Khandpur (2005); Smart Group (2011).
3. Placas de circuito impresso x problema ambiental	
Problema ambiental	Aea Technology (2004); Almeida et al. (2013); Basdere e Seliger (2003); Bernardes et al. (1997); Brasil (2010); Brigden et al. (2005); Brodersen et al., 1992; Cobbing (2008); Cui e Forssberg (2003); Cui e Zhang (2008); Chancerel et al. (2009); Deutsche Umwelthilfe (2007); Dimitrakakis (2009); Ebert e Bahadir (2003); Emery, Williams e Griffiths (2002); Eps Canada (2006); Ernst, Popp e Eldik (2000); Flandinet et al. (2012); Goosey e Kellner (2003); Guo, Guo e Xu (2009); Hagelüken (2006); He et al. (2006); Hilty (2005); Hilty, Som e Köhler (2004); Hoffmann (1992); Huang et al. (2007); Huang, Guo e Xu (2009); Huisman et al. (2007); Jang e Townsend (2003); Janz, Rotter e Bilitewski (2008); Lacoursiere (2005); Lee et al. (2004); Lee, Song e Yoo (2007); Leung et al. (2008); Li (2007); Luda (2011); Menad, Bjorkman e Allain (1998); Murugan et al. (2008); Murugan et al. (2008); Ongondo, Williams e Cherrett (2011); Owens et al. (2007); Puckett et al. (2002); Rahman et al. (2001); Richter, Lorenz e Bahadir (1997); Riess et al. (2000); Robinson (2009); Rocha (2009); Rotter (2002); Schlummer et al. (2007); Sepúlveda et al. (2010); Taurino, Pozzi e Zanasi (2010); Teller (2006); Unep (2005); Vasile et al. (2008); Vehlow et al. (2000); Veit, Pereira e Bernardes (2002); Wang et al. (2005); Widmer et al. (2005); Williams et al. (2008); Wong et al. (2007); Yokoyama e Iji (1997); Zheng et al. (2009); Zhou e Qiu (2010).
Legislação	Andrae (2010); Araújo et al. (2012); Boeni, Silva e Ott (2008); Boks (2006); Brasil (2010); Cui e Forssberg (2003); Chancerel et al. (2009); Chiodo (2005); Eswarajah et al. (2008); European Commission (2003a e 2003b); Gao, Li e Zhang (2002); Goosey e Kellner (2003); Jie, Ying-Shun e Mai-Xi (2008); Kang e Schoenung (2005); Murugan et al. (2008); Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007); Ongondo, Williams e Cherrett (2011); Sinha-Khetriwala, Kraeuchib, e Schwaninger (2005); Sutherland, Gunter e Weinmann (2002); United University Union (2007); Veit, Pereira e Bernardes (2002); William (2001).
Avaliação do ciclo de vida (ACV)	Abetre (2006); Almeida et al. (2010); Andersen, Walnum e Andrae (2010); Andrae, Itsubo e Inaba (2007); Araújo et al., (2012); Bevilacqua, Giacchetta e Ciarapica (2007); Stevels (2007); Bigum, Brogaard e Christensen (2012); Bonnema (2006); Bovea e Pérez-Belis (2012); Bovea e Wang (2003); Cerdan et al. (2009); Deubzer (2007); Ekvall e Andrae (2006); Epa (2005); Fargnoli, Minicis e Tronci (2014); Fehr, Castro e Calçado (2010); Griese et al. (2000); Grote et al. (2007); Hauschild, Jeswiet e Alting (2005); Huang, Guo e Xu (2009); Ilgin e Gupta (2010); Johansson e Björklund (2010); Li e Guan (2009); Ljungberg (2007); Marques (2008); Marques, Guanabara e Kindlein (2007); Marques, Marrero e Malfatti (2011); Mehta e Wang (2001); Meira e Kiperstok (2003); Mihaescu e Carstea (2003); Niu e Li (2007); Ramani et al. (2010); Rodrigues (2007); Rubin et al. (2014); Sakao (2007); Sheldon (1997); Saganuma (2001 e 2003); Townsed et al. (2008); Turbini et al. (2003); Umeda et al. (2012); Zhang e Forssberg (1999).
	Antrekowitsch et al. (2006); Bendaoudl, Tilmatinel e Medlesl (2004); Bhaskar et al. (2004); Brebu et al. (2005); Cui e Forssberg (2003); Cui e Zhang (2008); Cunliffe, Jones e Williams (2003); Descalescu et al. (1999); Dimitrakakis (2009); Ding et al. (2008); Duan et al. (2011); Emery, Williams

Métodos de reciclagem	e Griffiths (2002); Eswaraiah et al. (2008); Europa (2006); European Commission (2003a 2003b); Fauve-Buresi (2006); Flandinet et al. (2012); Fogarasi et al. (2013); Gao, Li e Zhang (2002); Gungor e Gupta (1998); Guo, Guo e Xu (2009); Hall e Williams (2007); He et al. (2006); Henstock (1988); Hicks, Dietmar e Eugster (2005); Hischer, Wäger e Gauglhofer (2005); Huang, Guo e Xu (2009); Hung-Lung et al. (2007); Jie, Ying-Shun e Mai-Xi (2008); Kaminsky (1995); Kang e Schoenung (2005); Kasper et al. (2011); Kers et al. (2008); Kiewiet et al. (1978); Kinoshita et al. (2003); Koyanaka et al. (1997); Lee et al. (2000 e 2004); Lee, Kim e Lee (2012); Li et al., 2007 e 2008; Li, Xu e Zhou (2007); Long et al. (2010); Lu et al. (2000); Luda (2011); Mecucci (2007); Menad, Bjorkman e Allain (1998); Mohabuth, Hall e Miles (2007); Murugan et al. (2008); Niu e Li (2007); Oishi (2007); Pento (1999); Rafirouiu et al. (1999); Ralston (1961); Schmelzer, Wolf e Hoberg (1996), Svte (2007); Szczygiel (1998); Tanskanen (2013); Taurino, Pozzi e Zanasi (2010); Taylor (1988); Tsydenova e Bengtsson (2010); Tuncuk et al. (2012); Veit et al. (2005 e 2006); Veit, Pereira e Bernardes (2002); Vlad et al. (1998); William (2001); Wu, Li e Xu (2008a, b e c e 2009); Yang et al. (2009); Yokoyama e Iji (1997); Zeng et al. (2013); Zhang e Forssberg (1997 e 1999); Zheng et al. (2009).
4. Design Sustentável	
Desenvolvimento Sustentável	Abnt (2004); Abrelpe (2013); Capra (2003); Araújo et al. (2012); Cempre (2011); Garetti, Rosa e Terzi (2012); Grippi (2001); Ljungberg (2007); Manzini e Vezzoli (2002); Navarro (2001); Owens et al. (2007); Wced (1987); Wenzel, Hauschild e Alting (1997).
Materiais e sustentabilidade	Ashby (1999); Ashby (2012); Beall (2000); Cambridge Engineering Selector (2014); Kuo (2010); Ljungberg (2003 e 2007); Manzini (1993); Rahimifard, Abu Bakar e Williams (2009).
Design para a montagem e desmontagem (DfA e DfD)	Assay e Lambert (1999); Bayer Materialscience (2013); Bonenmerger (2005); Boothroyd e Alting (1992); Boothroyd, Dewhurst e Knight (2010); Brennan, Gupta e Taleb (1997); Cambridge Engineering Selector (2014); Carrell et al. (2011); Coombs (2008); Dieter (1997); Dufrou et al. (2008); Genc, Messler e Gabriele (1998); Honeywell International (2002); Jaarsma (2001); Kindlein et al. (2002 e 2007); Kindlein, Platcheck e Cândido (2003); Ljungberg (2003); Puente (2001); Silva et al. (2006); Spahr (1991); Tanskanen e Takala (2006); Tres (2006); Veerakamolmal e Gupta (2000); Williams e Shu (2001).

3.1 Placas de circuito impresso (configuração)

Nesse capítulo procura-se explicar o produto que é a placa de circuito impresso, apresentando no item 3.1.1 a estrutura e os materiais presentes. No item 3.1.2 explica-se os métodos de fixação de componentes existentes e no item seguinte 3.1.3 os tipos de falhas usuais neste produto. E já no ítem 3.1.4 apresentam-se dois métodos alternativos para o processo tradicional que estão sendo pesquisados.

3.1.1 Estrutura e materiais

Para Guo, Guo e Xu (2009) as placas de circuito impresso (PCI) são a plataforma com vários furos perfurados sobre a qual os componentes eletrônicos, tais como chips (circuitos

integrados), semicondutores e capacitores são montados. A PCI proporciona a interconexão elétrica entre os componentes através de linhas de cobre que permitem que a corrente flua entre os componentes, sendo responsáveis pelo processamento de sinais elétricos e transformá-los em informações. São encontradas em praticamente todos os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE), sendo a base da indústria eletrônica, pois é uma parte essencial e sendo cruciais para a fabricação e vendas de cerca de US\$ 1 trilhão de EEE cada ano. Nos últimos anos, a taxa média de manufatura de PCI em todo o mundo aumentou 8,7%, e este número é muito maior no sudeste da Ásia (10,8%) e na China continental (14,4%), segundo Ladou (2006).

Desde a invenção da tecnologia de circuito impresso pelo Dr. Paul Eisner em 1936 (NAKAHARA, 2008), vários métodos e processos foram desenvolvidos para a fabricação de placas de circuito impresso (PCIs) de vários tipos, sendo que as maiorias destes processos não se alteraram significativamente ao longo dos anos. O processo de fabricação de uma PCI é extremamente complicado, exigindo um grande investimento em equipamentos e mais de 50 etapas distintas (GOOSEY E KELLNER, 2003).

Classificação

Conforme a norma IPC-A-600G (IPC, 2004), existe um grau aceitável de imperfeições de características específicas de placas de circuito impresso, que pode ser determinado pelo uso final pretendido. Por esta razão, três classes gerais foram estabelecidas com base na confiabilidade funcional e de desempenho.

Classe 1 - Produtos eletrônicos em geral: Incluem produtos de consumo, alguns computadores e periféricos de computador adequados para aplicações onde as imperfeições estéticas não são importantes, e o principal requisito é a função completa da placa de circuito impresso.

Classe 2 - Produtos eletrônicos dedicados a serviço: Inclui equipamentos de comunicações, máquinas comerciais sofisticadas, e os instrumentos onde o alto desempenho e vida útil prolongada são necessários, e para o qual o serviço ininterrupto é desejado, mas não é crítico e onde certas imperfeições estéticas são permitidas.

Classe 3 - Produtos eletrônicos de alta confiabilidade: Inclui equipamentos e produtos onde o desempenho continuado ou performance sob demanda é crítica. O tempo de inatividade não pode ser tolerado, e os equipamentos devem funcionar quando necessário, tais como sistemas de suporte à vida ou sistemas de controle de vôo. Placas de circuito impresso

nesta classe são adequadas para aplicações onde os altos níveis de segurança são necessários e o serviço é essencial.

Devido a isso, foi selecionada a classe 1 a ser aplicada este tipo de estudo, pois representa o maior volume de produção, maior utilização e assim de maior consumo, tendo geralmente uma pequena vida útil gerando grande problemas ambientais. Além disso, os critérios de confiabilidade são mais acessíveis para este, pois há estudos mais acessíveis divulgados em meio científico.

Conforme Nakahara (2008) as placas de circuito impresso podem ser classificadas de muitas maneiras diferentes de acordo com seus vários atributos. Uma estrutura fundamental comum a todas elas é que devem fornecer caminhos condutores elétricos que interligam os componentes a serem montados sobre elas. Existem duas maneiras básicas para formar esses condutores:

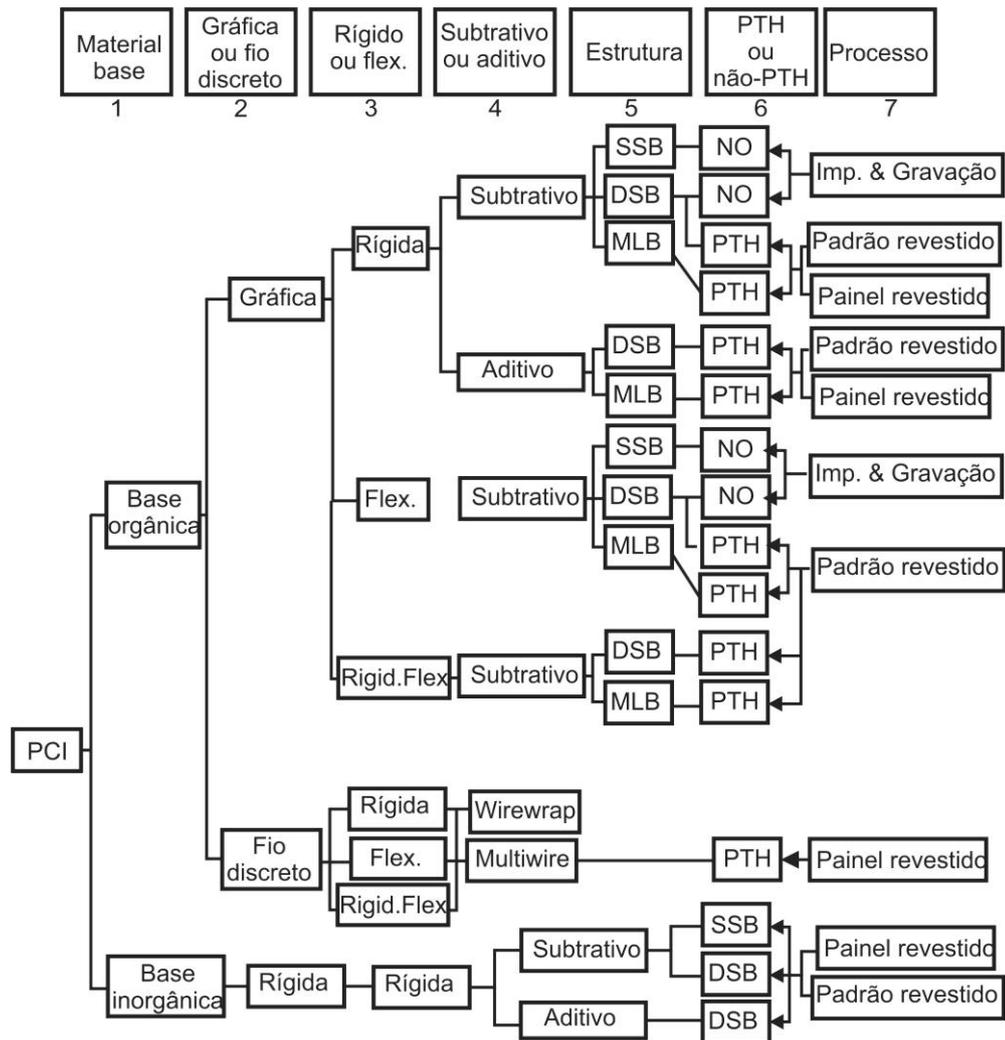
1. Modo subtrativo: No processo subtrativo, a parte indesejada da folha de cobre no substrato da base é gravada, deixando no lugar o padrão desejado condutor.

2. Modo aditivo: No processo aditivo, o padrão de formação de condutor é conseguido através da adição de cobre para um simples (não cobre a folha) substrato no padrão e lugares desejados. Isso pode ser feito através de metalização do cobre, a seleção da pasta condutora, ou no estabelecimento de isolamento do fio sobre o substrato sobre os caminhos condutores pré-determinados.

As classificações das PCIs, conforme Nakahara (2008), figura 1, levam em consideração todos esses fatores, ou seja, processos de fabricação, bem como o substrato do material. Para o autor (2008) a classificação pode ser por tipos: Placas lado simples (*Single-sided*); placas com ambos os lados (*Double-sided*); placas multicamadas (*Multi-layer*) e placas rígidas e flexíveis. O uso desta figura é a seguinte:

- A coluna 1 mostra a classificação das PCI's pela natureza do seu substrato; A coluna 2 mostra a classificação dos PCI's pela forma como o padrão condutor é fotografado; A coluna 3 mostra a classificação dos PCI's por sua natureza física; A coluna 4 mostra a classificação dos PCI's pelo método de formação de condutor atual; A coluna 5 mostra a classificação dos PCI's pelo número de camadas condutoras; A coluna 6 mostra a classificação dos PCI's pela existência ou ausência de PTHs (*Plated Through Hole*); A coluna 7 mostra a classificação dos PCI's pelo método de produção.

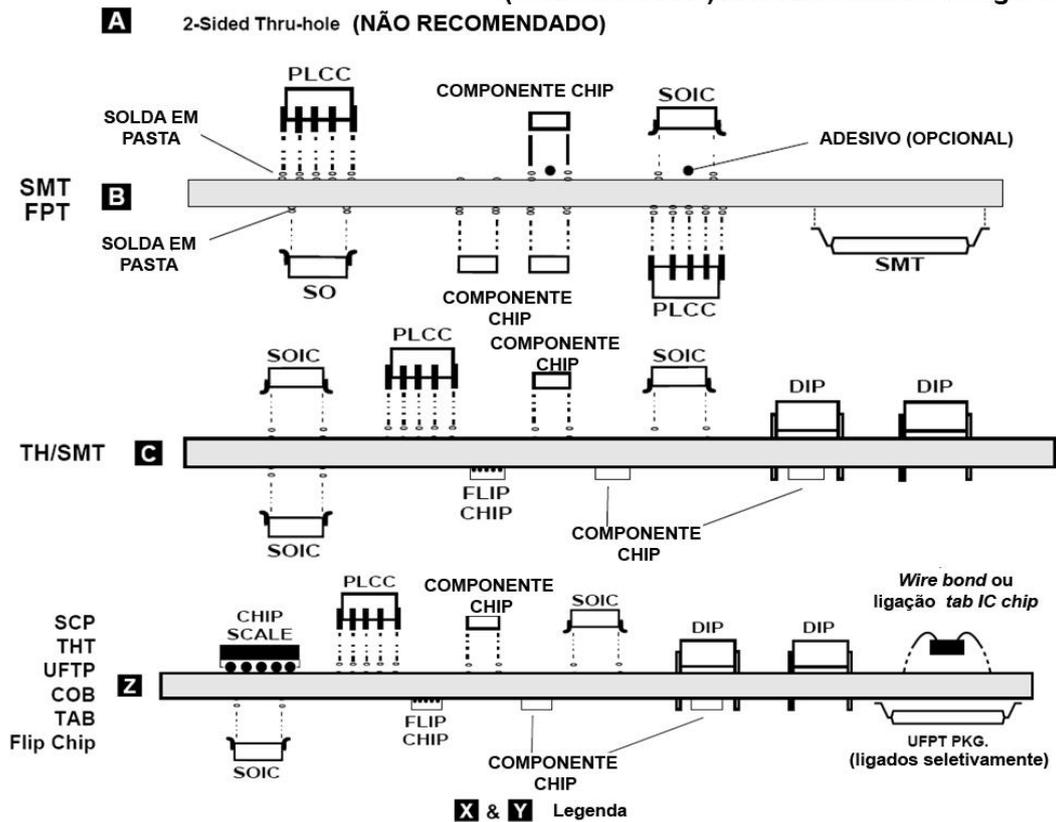
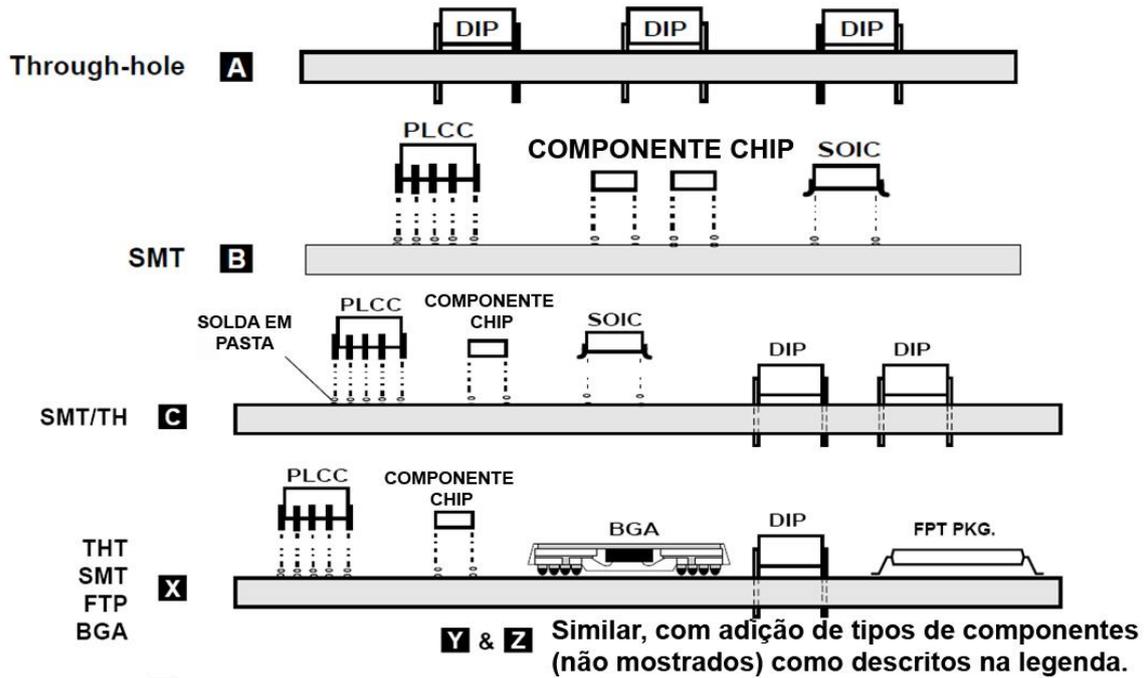
Figura 1 - Classificação das placas de circuito impresso.



Fonte: Adaptada de Nakahara (2008).

Já a norma ANSI/IPC-2222 (ANSI/IPC, 1998) e a norma IPC-2221A (IPC, 2003) fornecem informações de projeto para tipos diferentes da placa. A seleção de classe é dependente das necessidades dos clientes que utilizam a aplicação. A figura 2 mostra a relação de dois tipos de montagens, em apenas um lado e com componentes de ambos os lados. Segundo esta norma, os tipos de placa são classificados como: Tipo 1 - Placas de circuito impresso face simples; Tipo 2 - Placas de circuito impresso dupla face; Tipo 3 - Placa multicamada sem vias cegas (*blind*) ou ocultado (*Buried*); Tipo 4 - Placa multicamada com vias cegas e/ou ocultado; Tipo 5 - Placa multicamada de núcleo-metal sem vias cegas ou ocultado; Tipo 6 - Placa multicamada de núcleo-metal com vias cegas ou ocultado.

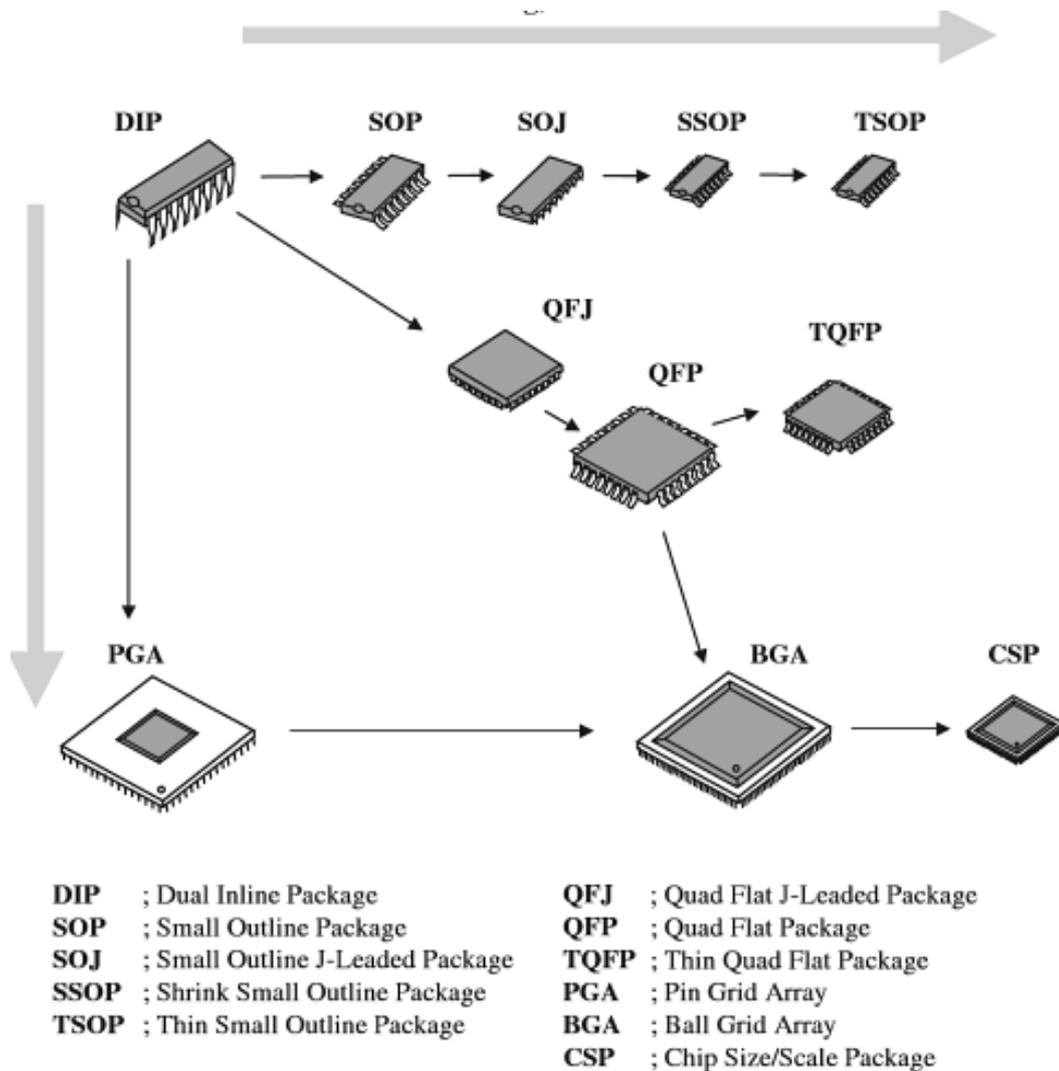
Figura 2 - Componentes montados em um lado e ambos os lados da placa.



Legenda:
 Classe A = Montagem somente de componente through-hole
 Classe B = Somente componentes montados na superfície
 Classe C = Montagem mista de simples through-hole e componentes montados na superfície
 Classe X = Montagem mista complexa, through-hole, montagem em superfície, fine pitch BGA
 Classe Y = Montagem mista complexa, through-hole, montagem em superfície, ultra fine pitch, chip scale
 Classe Z = Montagem mista complexa, through-hole, ultra fine pitch, COB, flip chip, TAB

Os componentes eletrônicos são a estrutura de um circuito, isto é, são os componentes que fazem parte de qualquer circuito elétrico ou eletrônico (desde os mais simples aos mais complexos) e que estão interligados entre si. Os componentes eletrônicos presentes em uma placa dependem da aplicação desta, podendo fazer parte os semicondutores (circuito integrado ou chips), transistores, diodos, capacitores, resistores, conectores, etc (BERNARDES et al., 1997). Há uma grande quantidade de configurações para os circuitos integrados, alterando o modo de encapsulamento que assim altera a sua montagem. Na figura 3, apresentam-se alguns tipos de configuração, entre eles os componentes DIP (*Dual Inline Package*), TSOP (*Thin Small Outline Package*), QFJ (*Quad Flat J-Leaded Package*) e CSP (*Chip Size/Scale Package*), dentre outros (HWANG, 1996; WONG e LU, 2009).

Figura 3 - Configurações de encapsulamentos de CI montados em superfície.



Fonte: Adaptada de Wong e Lu (2009).

Diferentes componentes têm uma composição complexa de materiais (BERNARDES et al., 1997; WILKINSON, DUFFY e CROWE, 2001; MARQUES, CABRERA e MALFATTI, 2013), sendo, portanto bastante complexa também a reciclagem dos resíduos de PCI. Em geral, as PCIs montadas com componentes consistem em aproximadamente 40% em peso de metais, 30% de plásticos e 30% de cerâmica (HE et al., 2006). Para os resíduos de PCI sem montagem de componentes eletrônicos, a composição do material é cerca de 28% em peso de metais (cobre essencialmente) e 72% em peso de materiais não metálicos (GAO, LI e ZHANG, 2002).

Para Guo, Guo e Xu (2009), a escolha dos materiais utilizados para fabricação de PCIs depende da aplicação. Por exemplo, resinas epóxi bifuncionais são adequadas para placas de circuito simples, de dois lados. Já mais sofisticadas resinas epóxi multifuncional ou ésteres de cianato são necessários para placas espessas com multi-camadas (JAWITZ, 1997; HALL e WILLIAMS, 2007). Placas flexíveis geralmente são feitas de poliéster e de bases poliamida. Dois tipos comuns de PCIs são feitas de fibra de vidro reforçada com resina epóxi (referido comercialmente como FR-4) ou de papel de celulose reforçada com resina fenólica (FR-2). PCI do tipo FR-4 são usados em EEE de alto valor e tipos de FR-2 são usados em televisores e em eletroeletrônicos (LASSEN e LOKKE, 1999). As PCIs contêm quantidades significativas de metais, incluindo os componentes elétricos e solda usados para anexá-los para as placas (GOOSEY e KELLNER, 2002). A planta de fundição Rönnskar na Suécia analisou a composição típica (tabela 1) dos resíduos das PCIs (THEO, 1998) para mostrar a variedade de componentes, representando % em peso dos componentes e alguns em gramas/tonelada.

Tabela 1 - Composição típica das placas de circuito impresso.

Elemento	Ag	Al	As	Au	S
Conteúdo	3300 g/t	4,7%	<0,01%	80 g/t	0,10%
Elemento	Ba	Be	Bi	Br	C
Conteúdo	200 g/t	1,1 g/t	0,17%	0,54%	9,6%
Elemento	Cd	Cl	Cr	Cu	F
Conteúdo	0,015%	1,74%	0,05%	26,8%	0,094%
Elemento	Fe	Ga	Mn	Mo	Ni
Conteúdo	5,3%	35 g/t	0,47	0,003%	0,47%
Elemento	Zn	Sb	Se	SiO₂	Sn
Conteúdo	1,5%	0,06%	41g/t	15%	1,0%
Elemento	Te	Ti	Sc	I	Hg
Conteúdo	1 g/t	3,4%	55 g/t	200 g/t	1 g/t
Elemento	Zr	Sr			
Conteúdo	30 g/t	10 g/t			

Fonte: Adaptada de Theo (1998).

3.1.2 Métodos de fixação dos componentes em PCIs

Para Freedman (2008a), os componentes eletrônicos estão ligados a placas de circuito impresso em quatro formas, como mostra a figura 4:

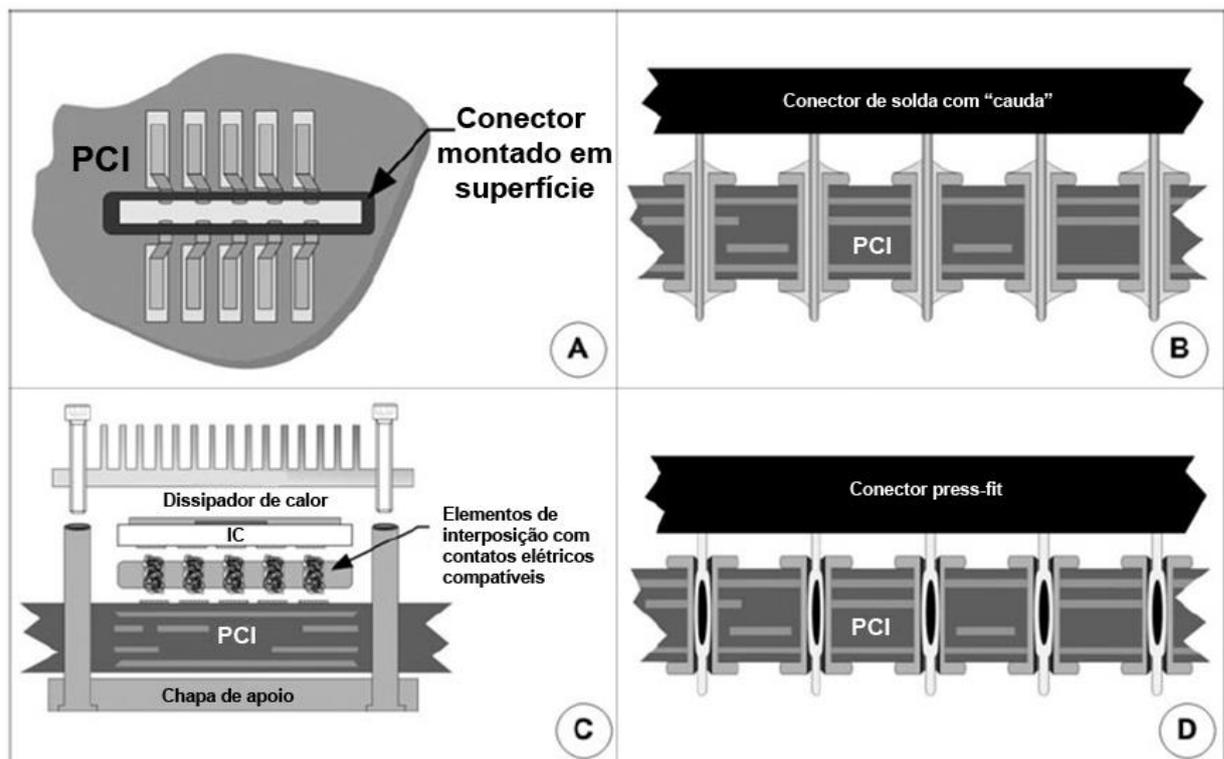
A) Solda por refluxo através de tecnologia de montagem superficial (SMT - *Surface-Mount Technology*) para componentes de dispositivos de montagem superficial SMD (*Surface-Mount Device*);

B) Solda por onda para soldar componentes com extremidades, utilizando tecnologia através do furo (THT - *Through-Hole Technology*) geralmente componentes montados através de furos (PTH- *Plated Through Hole*);

C) Pressão de interconexão, um método com menos solda confiando nas forças mecânicas para forçar a interligação dos elementos juntos para fazer contato;

D) Press-fit, outro método mecânico, com menos solda.

Figura 4 - Quatro métodos de fixação para placas de circuito impresso (PCIs): (a) SMT; (b) PTH; (c) Pressão de interconexão e (d) Press-fit.



Fonte: Adaptada de Freedman (2008a).

As soldas são de longe o mais comum dos métodos de interconexão e as soldas usadas na montagem através de furos (PTH) são em massa e volume mais utilizado que pastas de solda na refusão de solda. Nos EUA, em julho de 2009 Barnes concluiu que 254 livros e 216 teses de doutorado/mestrado e milhares de tipos diferentes de artigos tinham sido publicados sobre os materiais de interconexão (IM) e de temas estreitamente relacionados (BARNES,

2010). Esta compilação de Barnes manifesta que grandes quantidades de idéias e pesquisas têm sido produzidas na área multidisciplinar da interligação, o que significa que é uma área interessante para estudo. A verdadeira compreensão da soldagem demanda pesquisas de diversas disciplinas. Para soldas de Sn-Pb a confiabilidade é muito bem compreendida, mas as soldas livres de chumbo (*Pb-Free*) são até hoje muito menos investigadas e por isso menos confiáveis.

Para Grigoletto et al. (2006) a soldagem é a técnica de unir duas ou mais partes que constituem um todo promovendo a fixação das mesmas e assegurando que haverá continuidade do material e que suas características mecânicas e químicas serão conservadas. Para Fenner (2008) apenas a soldagem pode ser realizada a baixas temperaturas o suficiente para ter lugar na presença de materiais orgânicos, tais como placas de circuito impresso (PCIs) e em polímeros em encapsulamentos de componentes eletrônicos. Assim, a soldagem é uma tecnologia fundamental que permite a montagem eletrônica. Conforme Grigoletto et al. (2006), a soldagem de componentes eletrônicos tem sido realizada principalmente por dois processos na indústria de eletro-eletrônicos: soldagem por dupla onda e soldagem por aquecimento em forno de refusão.

Para a soldagem por dupla onda, os componentes eletrônicos convencionais são inseridos em orifícios presentes na placa de circuito impresso, no caso, os componentes chamados PTHs (*Plated Through Hole*). Os componentes que são soldados sobre a superfície da placa, os SMDs (*surface-mount device*) precisam ser fixados por adesivos especiais sobre a superfície da placa e posteriormente passam pela solda fundida para que a soldagem seja realizada (GRIGOLETTO et al., 2003; AYOB E KENDALL, 2005 e 2008).

A emissão de resíduos no processo de soldagem por dupla onda ocorre durante a soldagem dos componentes, devido à volatilização de vapores do fluxo de solda e à emissão do óxido de chumbo para o ar. A soldagem por onda produz uma escória que permanece na superfície da liga de solda fundida, devido à contaminação com cobre, latão e outros elementos químicos vindos dos terminais dos componentes. A solda de estanho-chumbo utilizada na produção de placas é reciclada pela indústria que fornece a mesma (GRIGOLETTO et al., 2003). As placas montadas que apresentam pequenos defeitos são refeitas por processo manual e neste caso, há emissão de resíduo de solda para o ambiente. Caso o resultado não for adequado para sua utilização, ocorre o descarte da placa montada (GRIGOLETTO et al., 2003; MAESTRELLI e GRIGOLETTO, 2006).

O processo de soldagem dos componentes por refusão, muito usado para a fabricação de computadores e equipamentos de comunicação móveis, compreende a soldagem dos

componentes eletrônicos sobre as trilhas metalizadas das placas de circuito impresso e para isto é usada a liga de solda dispersa em fluxo (HWANG, 1996). O processo é iniciado pela escolha da pasta de solda mais adequada aos materiais e às condições dos equipamentos disponíveis. O depósito da pasta de solda pode ser realizado sobre a placa de circuito impresso pelo processo de serigrafia ou pelo uso de um dosador. No processo de serigrafia uma tela ou um “stencil” é colocado sobre a placa de circuito impresso e a pasta de solda é pressionada por um rodo. A pasta passa através de uma chapa perfurada (*stencil*) ou por uma tela recoberta por resina, que possuem as aberturas necessárias para permitir a realização do depósito desta no formato exigido pelo “lay-out” ou projeto da placa (GRIGOLETTO e FERREIRA, 1999; GRIGOLETTO et al., 2003).

A pasta pode ser depositada por meio de seringas manuais ou automáticas que permitem o depósito de quantidades definidas da pasta sobre locais específicos da placa. Depois do processo de deposição da pasta, os componentes são colocados manualmente ou automaticamente sobre a pasta molhada onde estes devem permanecer fixados até o final do processo. As placas são introduzidas em forno de aquecimento regulado para condições de operação adequadas para o perfil característico da pasta de solda, para a densidade dos componentes e para o tamanho da placa a ser soldada (GRIGOLETTO e FERREIRA, 1999; GRIGOLETTO et al., 2003).

As placas montadas passam por uma inspeção visual onde a soldagem é avaliada. Caso os componentes apresentem problemas de colocação ou de soldagem, a placa passa por um processo de reparo manual ou, no pior caso, a placa é refugada. Este processo de soldagem apresenta como resíduos a pasta de solda retirada de depósitos insatisfatórios, restos de solda em fio advindos do reparo das placas e liga de solda solidificada em placas montadas e emissões da liga de estanho-chumbo para o ar (GRIGOLETTO et al., 2003).

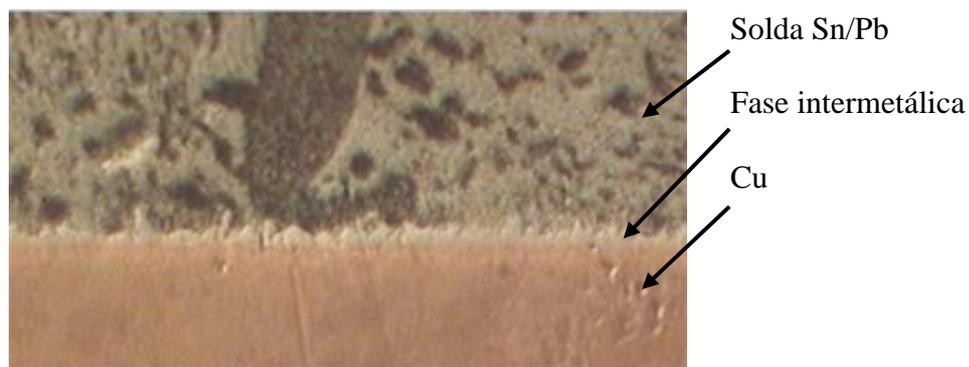
Para Grigoletto et al. (2003) e Maestrelli e Grigoletto (2006), considerando que a necessidade de velocidade de resposta, praticidade e versatilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos têm como consequência a redução da vida útil dos mesmos, os fabricantes do setor deveriam fornecer informações para as recicladoras sobre os elementos usados para a construção do resíduo eletro-eletrônico e sua composição, direcionando a separação e tratamento de seus resíduos. Seria aconselhável que todos os produtos eletrônicos possuíssem um selo de identificação de produto ambientalmente correto.

3.1.2.1 Soldas com base Pb

Segundo Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007), a soldagem é um processo onde quimicamente e mecanicamente dois metais são unidos utilizando uma liga com um ponto baixo de fusão. As ligas de estanho-chumbo têm sido tradicionalmente utilizadas para a soldagem de componentes eletrônicos e conforme as necessidades do processo possuem as seguintes composições: 63Sn/37Pb, 60Sn/40Pb e 62Sn/36Pb/2Ag, sendo estes os percentuais em massa dos constituintes metálicos das mesmas (HARRIS e WHITMORE, 1993; HWANG, 1996). O chumbo é um metal que possui boa condutibilidade elétrica e é muito maleável. Quando adicionado ao estanho, formam-se ligas que possuem baixo ponto de fusão e elevada molhabilidade, propriedades importantes para a soldagem de componentes eletrônicos, os quais possuem limitações de temperatura, em função dos materiais com que são confeccionadas as placas de circuito impresso e dos próprios materiais que constituem os componentes eletrônicos (HARRIS e WHITMORE, 1993; HWANG, 1996; GRIGOLETTO et al., 2003; DUAN et al., 2011).

A mais comum e mais antiga solda é a solda eutética 63Sn-37Pb, sendo usada desde o nascimento da indústria eletrônica, figura 5. A solda 63Sn-37Pb tem um ponto de fusão relativamente baixo (183°C), comportamento de molhabilidade boa, boas propriedades mecânicas e elétricas (alta condutividade elétrica) e o custo da liga é baixo (ANDRAE, 2010).

Figura 5 - Imagem da solda Sn/Pb produzida pela empresa Würth Elektronik GmbH.



Fonte: Adaptada de Würth Elektronik (2010).

3.1.2.2 Solda *Lead-free*

Conforme Coombs (2008), Freedman (2008b) e Subramanian (2007) a legislação impulsiona novas tecnologias como a soldagem *Lead-Free*, uma tecnologia, isenta de chumbo, que é utilizada porque nasceu da necessidade de banir o chumbo que causa danos ao

homem e ao meio ambiente (UNITED UNIVERSITY UNION, 2007). A eventual eliminação da solda baseada no chumbo tem grandes implicações para o processamento, montagem, confiabilidade e aspectos de custo de encapsulamento eletrônico, devido à temperatura de fusão da solda, temperatura de processamento, molhabilidade, fadiga mecânica e termo-mecânica, etc. (GUO, 2007). Na tabela 2 mostram-se algumas ligas *Lead-Free* estudadas atualmente.

Tabela 2 - Ligas de soldas *Lead-Free* candidatas.

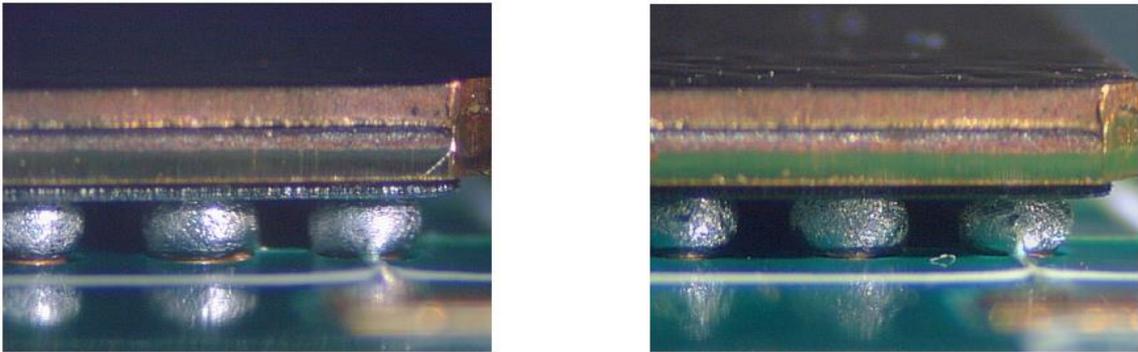
Propriedades →	Ponto de fusão (°C)	Custo metal (em libras)*	Densidade em 25°C (libras/in ³)	Custo metal (por in ³)	Liga patenteada
Liga ↓					
63Sn/37Pb (padrão)	183	\$2,67	0,318	\$0,85	Não
42Sn/59Bi5Sn/10Bi/5Zn	138	\$3,54	0,316	\$1,12	Não
n					
77.2Sn/20In/2.8Ag	179-189	\$23,47	0,267	\$6,27	Sim
85Sn/10Bi/5Zn	168-190	\$3,70	0,273	\$1,01	Não
91Sn/9Zn	199	\$3,63	0,263	\$0,95	Não
95Sn/5Sb	232-240	\$3,80	0,263	\$1,00	Não
90Sn/7.5Bi/2Ag/0.5Cu	186-212	\$5,19	0,273	\$1,42	Não
96.5Sn/3.5Ag	221	\$6,24	0,368	\$1,67	Não
98Sn/2Ag	221-226	\$5,25	0,266	\$1,40	Não
99.3Sn/0.7Cu	227	\$3,92	0,264	\$1,03	Não

*Somente custo do metal – não inclui custos de fabricação, margens, etc.

Fonte: Adaptada de Freedman (2008b).

Conforme Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007), as ligas de solda sem chumbo migraram de um sistema binário para sistemas complexos contendo mais que dois elementos. A substituição das ligas de estanho-chumbo foi amplamente discutida e estudos realizados por equipes de especialistas dos EUA e Japoneses e a conclusão das pesquisas realizadas pelo NEMI – Iniciativa dos fabricantes nacionais de eletrônicos (*National Electronics Manufacturing Initiative*) foi que a indústria de montagem eletrônica deveria utilizar ligas com os elementos estanho, prata e cobre, chamadas ligas SAC, possuindo a composição Sn-3,9Ag-0,6Cu ($\pm 0,2\%$). As principais diferenças do uso de solda *Lead-Free*, para fins de inspeção visual, são apresentadas na figura 6.

Figura 6 - Solda BGA Tin/Lead (chumbo-estanho) na esquerda e solda BGA *Lead-Free* ao lado.



Fonte: Adaptada de Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007).

A figura 6 apresenta ao lado esquerdo o componente com o método de solda BGA - Matriz de esferas de solda (*Ball Grid Array*) utilizando a solda com chumbo-estanho (Tin/Lead), onde pode-se observar o aspecto brilhoso, e ao lado direito apresenta o componente BGA com o uso da solda livre de chumbo, onde é possível observar seu aspecto rugoso e sem brilho. Assim, não é complicado perceber a diferença na identificação do uso das duas soldas de ligas com chumbo e sem chumbo. A seguir são descritos os principais impactos do uso da solda *Lead-Free*, segundo Nogueira, Queiroz-Neto e Manzato (2007) são:

Preço/estabilidade do custo dos materiais: Esta mudança obriga os fabricantes de componentes para a indústria, a buscar as mudanças mais adequadas para seguir vendendo seus produtos no mercado europeu depois do 1º de julho de 2006 e criar os desafios mais interessantes para as soldas sem chumbo para os fabricantes de eletro-eletrônicos. As temperaturas de fusão das novas ligas substitutas são mais altas, além de oferecer uma molhabilidade mais lenta das superfícies metálicas, por isso, são mais caras. Sendo que a molhabilidade é um fator importante para o processo onde a liga metálica no estado líquido se espalha sobre a superfície do material base no estado sólido aumentando a sua superfície, assim sendo este processo mais lento, mais complicado o processo de união.

Alta temperatura de fusão: As temperaturas de fusão das novas ligas substitutas são superiores as atuais estanho-chumbo (SnPb), já que se encontram compostas tipicamente por estanho-prata-cobre (SnAgCu) e estanho-cobre (SnCu). A solda tradicional de estanho/chumbo (eutética de composição 63Sn-37Pb) funde a 183 °C enquanto que um tipo de solda sem chumbo funde a 227 °C.

Conforme Guo (2007), em altas temperaturas necessárias para refusão de ligas sem chumbo (*Pb-free*), a umidade absorvida no encapsulamento pode resultar na delaminação (que é a separação das trilhas de cobre do substrato) e na falha. Por outro lado, estas ligas em geral parecem melhorar a fadiga termomecânica, mas novamente induz riscos de choques

mecânicos e a formação de “*whiskers*”. O ponto de fusão mais elevado acarreta o uso de energia mais elevada e também sobre preocupações com a confiabilidade do encapsulamento, tais como empenamento do substrato e estresse térmico (ANDRAE, 2010). Quando os tamanhos das esferas de ligas metálicas são reduzidos ao tamanho nanométrico, o ponto de fusão pode ser reduzido de 217 °C para 213,9 °C (ZOU et al., 2009).

Em muitos aspectos da solda sem chumbo, mais trabalho é necessário para estabelecer uma base científica sólida para promover suas candidatas (SUGANUMA, 2001; NOUSIAINEN et al., 2006; WU e WONG, 2007). Para Grusd (1998), ao escolher os metais alternativos, a consideração também deve ser dada aos seus riscos para a saúde. Estudos recentes nos EUA e na Europa chegaram às seguintes conclusões sobre a toxicologia do chumbo e alguns metais alternativos:

- Pb foi identificada como altamente tóxico (alto risco - que é considerado nocivo para o sistema reprodutivo).
- Cd é extremamente tóxico e não deve ser utilizado (alto risco). Muitas empresas, como a Ford Motor Company proibiram materiais contendo Cd.
- Sb é muito tóxico e não deve ser muito usada (risco médio - na Europa este material é considerado potencialmente cancerígeno).
- Ag e Cu são utilizados nas ligas sem chumbo em pequenas concentrações - na Europa estes materiais são vistos como de baixo risco.
- Sn e Zn são elementos essenciais na dieta humana, ainda podem ser tóxicos se tiver alta exposição (baixo risco).
- Bi é um metal relativamente benigno, com um histórico de usos medicinais (baixo risco).

3.1.2.3 Adesivos condutores

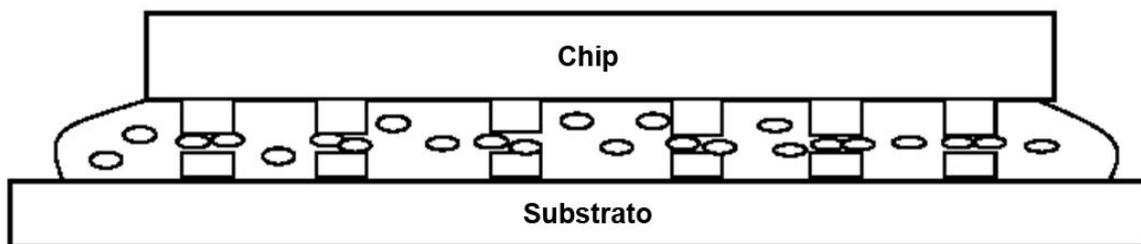
Uma maneira de descrever os adesivos eletricamente condutores é como uma espécie de solda polimérica que tem sido investigado pela indústria eletrônica. Estes Adesivos Eletricamente Condutores (ECA - *Electrically conductive adhesive*) consistem de uma matriz aglutinante polimérica (cerca de 50% em volume ou 20% em peso), geralmente tipo resina epóxi bisfenol-A, e enchimentos de metal onde o metal é geralmente Ag, Au, Cu, ou Ni (ANDRAE, 2010). Li e Wong (2006) sugerem que os adesivos ECAs geralmente são mais ecológicos do que as soldas com Pb e a limpeza de fluxo é eliminada, e menos etapas de processamento global são necessárias. Além disso, temperaturas mais baixas de cura são usadas para oferecer menor consumo de energia. No entanto, as ECAs são apenas usadas em

determinadas aplicações em substituições das soldas convencionais devido às propriedades dos diferentes materiais e problemas de confiabilidade, tais como baixa condutividade, resistência de contato instável, baixa resistência a união, e a migração de Ag.

As ECAs já são utilizados para prender os chamados Flip Chips (C4 - conexão de chip de colapso controlado) em PCIs e para fixação de unidades de displays em, por exemplo, telefones celulares, mas foram consideradas muito inseguras para serem aplicadas como material de interligação em larga escala (ANDRAE, 2010). O principal impulso para o desenvolvimento dos adesivos ECA foi a preocupação dos perigos ambientais da solda com Pb. Muito mais pesquisas têm sido feitas sobre soldas Sn-Ag-Cu do que adesivos ECAs (MORRIS, 2005).

Para Morris e Liu (2007), dependendo da proporção de partículas de metal, ECAs são geralmente divididos em três grupos; Adesivos Condutores Isotropicamente (ICA - *Isotropically conductive adhesives*), Adesivo Condutor Anisotropicamente (ACA - *anisotropically conductive adhesives*) e Adesivos Não Condutores (NCA - *non conductive adhesives*). Além disso, as pastas de ECAs podem ser utilizadas em processos convencionais, tais como a impressão serigráfica e cura convencionais em fornos de refluxo (MO, 2005). Um adesivo utilizado, ACA, é um adesivo que consiste de partículas condutoras dispersas em uma matriz adesiva. A fração de volume de partículas condutoras é de cerca de 5-10%. Estas partículas podem ser metais puros como o ouro, prata ou níquel, ou partículas de metal revestido com núcleos de plástico ou vidro. A confiabilidade de um adesivo ACA é principalmente decidida pelas propriedades termomecânicas das partículas condutoras. A figura 7 mostra um esboço de interligação tipo Flip Chip possibilitada pela ACA, sendo que o Flip Chip é um método para a interconexão de dispositivos semicondutores.

Figura 7 - Adesivo ACA no papel de interligação Flip Chip.



Fonte: Adaptada de Andrae (2010).

3.1.3 Tipos de falhas

Coombs (2008) argumenta que, deve-se distinguir entre um defeito e uma falha. Uma falha é uma designação de um sistema de teste para um item que não atenda aos critérios previstos. Um defeito refere-se especificamente a placa e um defeito no projeto, fabricação, aparência, etc. Nem todos os defeitos podem ser detectados pelo sistema de teste. Para fins de teste elétrico, as falhas podem ser definidas como os resultados dos testes de medição do sistema que não sejam os programados para serem representativos de uma boa placa. As falhas detectadas podem ou não afetar a funcionalidade da placa de circuito, embora na maioria dos casos elas vão afetar. Ainda o autor (2008), classifica as falhas como:

- Curtos circuitos: Curtos, curtos fortes, ou curtos-circuitos são definidos aqui como erros (indesejados e inesperados) de baixa resistência entre as ligações de duas ou mais redes ou pontos isolados. Curtos são produzidos em uma variedade de maneiras, incluindo problemas de exposição, corrosão, fotolitos contaminados, mau alinhamento de camadas, matéria-prima defeituosa e nivelamento da solda inadequada.

- Circuitos abertos: Circuitos abertos representam uma falta de continuidade dos circuitos esperados, ou em outras palavras, uma falta de ligação. Isto divide uma rede de circuitos de tal forma que a rede é dividida em duas ou mais peças. Circuitos abertos são relatados como falhas do teste de continuidade do produto. São produzidos em uma variedade de maneiras, incluindo “*overetching*”, “*underplating*”, fotolitos contaminados, matérias-primas contaminadas, erros de registro de camada e danos mecânicos.

- Dispersão: Um vazamento ou “rede de vazamento” é essencialmente um tipo de curto. Vazamentos são também referidos como curtos de alta resistência, e diferem dos curtos fortes na medida em que apresentam um maior valor de resistência. Como no caso dos curtos fortes, dispersão é uma falha do teste de isolamento do produto. Causas da dispersão comuns são a umidade, produtos químicos, ou detritos. A contaminação pode ocorrer durante a fabricação entre camadas, laminação, metalização, máscara de solda, ou em qualquer fase, devido ao manuseio.

- Falhas fonte de alta tensão “Hi-Pot”: *Hi-Pot* é uma abreviatura de elevado potencial e tradicionalmente é um termo dado a uma classe de instrumentos de teste de segurança elétrica usada para verificar a isolamento elétrica em placas de circuito impresso. Teste *Hi-pot* é importante para a inspeção de material antes dos circuitos serem gravados. Em condições normais, qualquer dispositivo elétrico vai produzir uma quantidade mínima de corrente de fuga, devido às tensões e apresentar capacitância interna do produto. No entanto, devido a falhas de projeto ou de outros fatores, o isolamento em um produto pode quebrar, resultando

em fluxo da fuga de corrente excessiva. A corrente resultante que flui através do isolamento, conhecido como corrente de fuga, é monitorado pelo testador *Hi-Pot* fonte de alta tensão.

Já para Khandpur (2005), os problemas de confiabilidade devido a mudanças no isolamento são de dois tipos: falha de resistência de isolamento e falha de baixa impedância.

Falha de resistência por isolamento: Isto indica uma mudança de impedância alta para baixa impedância. Geralmente ocorre lentamente durante um período grande de tempo. Como a densidade de componentes nas placas aumenta e diminui o espaçamento entre os seus condutores, qualquer degradação do material isolante entre as linhas de circuito tem um efeito pronunciado sobre a confiabilidade da placa (KAMAT, SPILAR e YEAGER, 1995).

Falha por baixa impedância: No caso da PTH, a baixa impedância do circuito deve ser assegurada. A usual falha é devido aos resultados de choque térmico em uma fratura que geralmente produz uma mudança abrupta de baixa para alta impedância.

3.1.4 Alternativas para o processo tradicional

Empresas de equipamentos eletrônicos com a mudança de paradigma tratando a questão da sustentabilidade, colocando o conceito de ciclo de vida nos seus processos e produtos, estão inclinadas a projetarem seus produtos para que estes retornem a seu processo. Através disso são pensadas alternativas para o tradicional processo de solda, que melhorando a forma de união, estas placas de circuito impresso possam de maneira mais viável serem recicladas e terem seus materiais reaproveitados. Diversos estudos têm sido feitos (MARQUES et al., 2014) dentre eles apresenta-se dois processos, um aplicado pela empresa Würth Elektronik GmbH (WÜRTH ELEKTRONIK, 2010) para produzir uma placa de circuito impresso com a possibilidade de ter seus materiais separados e reciclados com mais facilidade. O outro pela empresa Verdant Electronics (FJELSTAD, 2007 e 2008), que estuda uma alternativa de união dos componentes em uma placa de circuito impresso sem a utilização de solda.

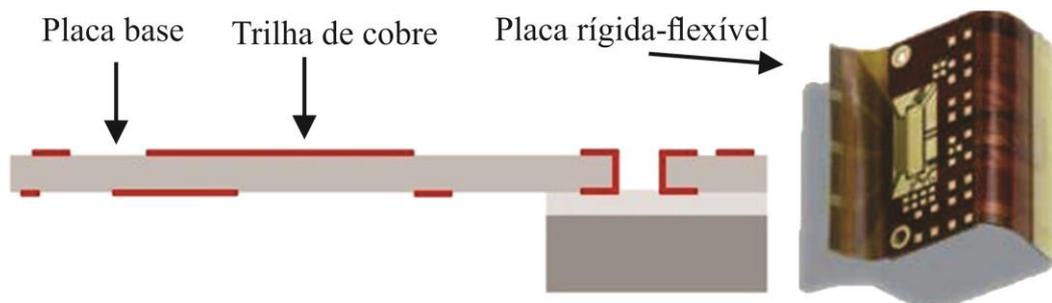
3.1.4.1. Empresa Würth Elektronik (TWINflex®)

Na Alemanha um trabalho conjunto entre a Technische Universität Dresden e a empresa Würth Elektronik GmbH tem estudado técnicas para produzir placas de circuito impresso que podem ter seus materiais separados e reciclados após o fim do seu ciclo de vida (VEIT et al., 2005 e VEIT, 2005). Würth Elektronik, pertencente ao grupo Würth, produz PCIs, componentes passivos e eletromecânicos e componentes eletrônicos em tecnologia

press-fit. Desde há alguns anos, a Würth Elektronik começou a desenvolver uma PCI com uma tecnologia intitulada MicroVia, que utilizava material flexível, chamado TWINflex®. A flexibilidade, na forma e na função, torna este conceito ajustado para circuitos tridimensionais, flexíveis e de alta densidade. A folha flexível de circuitos é montada sobre um substrato homogêneo de plástico ou metal (WÜRTH ELEKTRONIK, 2010).

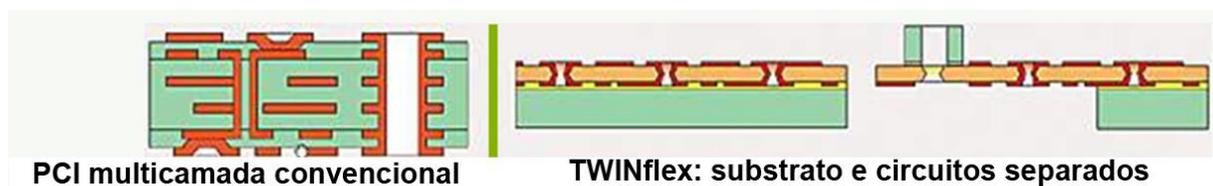
A TWINflex® separa as funções mecânicas e elétricas da placa de circuito impresso habitual. Materiais caros (como metal nobre) podem ser recuperados de forma eficiente. Outros materiais podem ser facilmente desmontados e reutilizados sem qualquer preparação. Há uma redução de custos no fim de vida através da separação fácil do material de base e dos circuitos. A utilização de substâncias perigosas na fabricação de PCI pode ser drasticamente reduzida por meio da alteração de processos de fabricação (WÜRTH ELEKTRONIK, 2010). Este conceito é mostrado nas figuras 8 e 9.

Figura 8 - Placa de circuito impresso com o processo e o conceito TWINflex® da empresa.



Fonte: Adaptada de Würth Elektronik (2010) e Schischke, Hagelüken e Steffenhagen (2010).

Figura 9 - Placa de circuito impresso tradicional e o conceito TWINflex®.

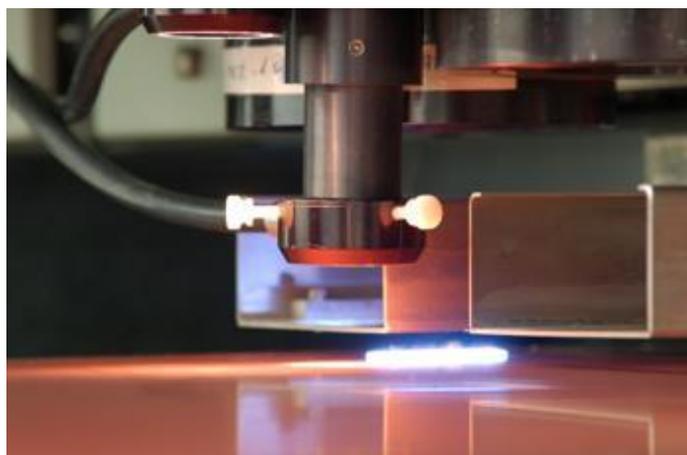


Fonte: Adaptada de Würth Elektronik (2010) e Schischke, Hagelüken e Steffenhagen (2010).

Khandpur (2005) argumenta que os novos produtos eletrônicos são cada vez menores, mais rápidos, mais leves e mais baratos, a fim de serem capazes de competir no mercado de hoje, por isso da utilização da HDI (Interligação de Alta Densidade), que encontra-se em pequenos buracos, identificado como “microvias”. Estes buracos são muito pequenos, definidos pela Associação de Indústrias de Conexão Eletrônicas (IPC - *Association Connecting Electronics Industries*), com diâmetro igual ou inferior a 150 micrômetros (μm).

A tecnologia “Microvias” são buracos minúsculos perfurados por laser, gravação a plasma e foto-imagem (KEEPING, 2000) para gerar a conexão elétrica entre as camadas em uma placa de circuito multicamadas, figura 10. Estas microvias “*Via in pad*” significam que os buracos microvias estão localizados diretamente nas pastilhas de solda e desempenham um papel decisivo na miniaturização das placas de circuitos. Como microvias não são furos cegos, não há forças capilares surgindo. O depósito de solda preenche o mínimo de espaço vazio.

Figura 10 - Microvias sendo perfuradas a laser.



Fonte: WÜRTH ELEKTRONIK (2010).

Esta tecnologia oferece algumas vantagens: Opção de layout com espessamento entre componentes BGAs menores; miniaturização com a tecnologia “*Via in Pad*”; geração de custo-benefício de alta densidade de fios; componentes estão se tornando menor o tempo todo; alta confiabilidade; redução dos efeitos de indutância e capacitância. O uso de tecnologia microvia compensa economicamente, pois a produção de furos microvias é significativamente mais barata do que buracos perfurados mecanicamente quando realizado para produtos com alta confiabilidade, classe 3 conforme a norma IPC-A-600G (IPC, 2004). Então este é um sistema que separa os componentes mecânicos dos elétricos, com uma tecnologia desenvolvida pela empresa, diminuindo a utilização da solda, não eliminando ela totalmente.

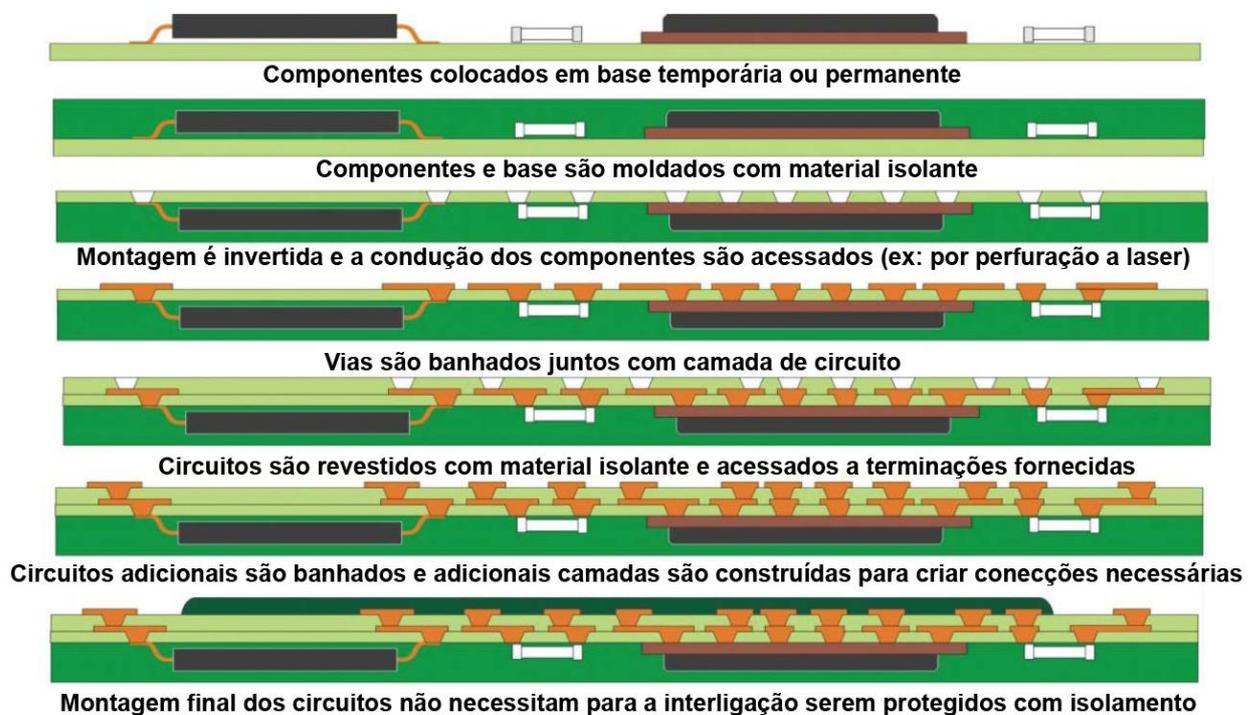
3.1.4.2. Empresa Verdant Electronics

A empresa californiana Verdant Electronics (VERDANT ELECTRONICS, 2010) propôs um novo conceito de produção totalmente livre de solda (FJELSTAD, 2007 e 2008), desenvolvendo um processo chamado “OCCAM process”. Este é um processo de interligação

de ordem inversa, onde os componentes são interligados por recobrimento de cobre depois que eles são montados em suas posições finais em um módulo encapsulado, assim, acabando com a convencional placa de circuito impresso. Protótipos montados usando esta nova tecnologia estão sendo caracterizados. O processo é adequado para a fabricação de alta densidade, alto desempenho, alta confiabilidade e ambientalmente compatível com a diretiva RoHS (Restrição de Certas Substâncias Perigosas - *Restriction of Certain Hazardous Substances*) com soluções da próxima geração de produtos tanto para consumidores usuais como para aplicações militares e aeroespaciais.

No presente processo, os componentes são colocados em um filme removível viscoso em uma base temporária ou permanente. O filme e a base imobilizam temporariamente até que a estrutura é encapsulada com uma resina epóxi ou outro material resistente. Toda a matriz torna-se assim um conjunto monolítico, com cada componente agora permanentemente imobilizado por toda parte. Os fundos dessas terminações podem ser expostos pela remoção da base temporária e filme ou fazendo buracos em uma forma permanente por meios como a abrasão mecânica, remoção por jato de água, material ou ablação por laser. Todo o processo é mostrado na figura 11, eliminando a solda.

Figura 11 - Processo básico para construção de um único componente da camada.

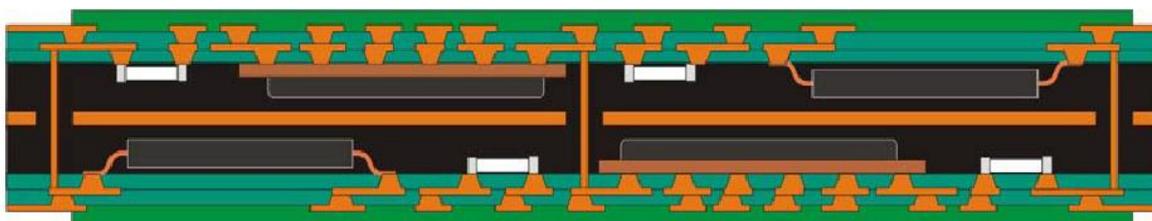


Fonte: Adaptada de Verdant Electronics (2010).

A montagem depois é metalizada com cobre usando métodos de processamento de aditivo de circuito impresso padrão (*build-up*), com padrões de circuito criado para fazer as

interligações necessárias entre os terminais de todos os componentes. Na maioria dos casos, mais de uma camada será necessária, portanto, uma camada de isolamento é colocada sobre ele e o processo é repetido até que todas as interconexões necessárias sejam feitas. A camada final do circuito pode ser ligada a qualquer interface do usuário, displays e conexões de energia que são necessários para a operação e em seguida revestida com uma camada isolante conformada ou rígida de proteção. Na figura 12 pode-se observar um exemplo de uma estrutura conectora mais avançada.

Figura 12 - A interconexão de lado a lado pode ser aumentada por várias estruturas conectoras ou circuitos flexíveis.



Fonte: Adaptada de Verdant Electronics (2010).

A idéia de eliminar a solda não é nova, mas os meios propostos anteriormente para fazê-lo, como por exemplo, substituir com adesivo condutor, o que não foi aceito pelo mercado, presumivelmente devido às dificuldades de funcionamento ou falta de confiabilidade das placas obtidas por esse processo. Esse processo inerentemente elimina a exposição a altas temperaturas, o risco de “*Whiskers*” de estanho, vulnerabilidade a choques mecânicos e falha por fadiga térmica por ciclo. Outros benefícios previstos incluem o design simplificado (geometrias mais justas para fatores de forma de elevada densidade), menos processos (incluindo a eliminação de todo o processamento de solda e questões associadas), diminuição dos custos de material e infraestrutura de abastecimento (FJELSTAD, 2008).

A empresa Verdant Electronics substituiu a solda por uma resina, alterando a produção da placa, porém sem alterar o problema da separação dos componentes nas placas de circuito impresso após a sua vida útil, pois possivelmente esta resina também dificulta o processo de desmontagem além de ser um material termofixo. Este tipo de material é considerado impossível de ser reciclado mecanicamente, sendo sugerida como potencial as reciclagens química e energética com questionamentos (MANCINI et al., 2011; SMITH E HASHEMI, 2012).

3.2. Placas de circuito impresso x problema ambiental

No item 3.2.1 são contextualizados os problemas ambientais em relação às questões de resíduos sólidos, especialmente em relação aos produtos eletrônicos, evidenciando a legislação ambiental existente atualmente em relação a estes produtos no item 3.2.2. No item 3.2.3 é abordada a análise do ciclo de vida das placas e em seguida no item 3.2.4 são apresentados os métodos de reciclagem para as placas de circuitos impressos.

3.2.1. Problema ambiental

Com o rápido desenvolvimento das tecnologias e da sociedade, as exigências de maior desempenho e maior demanda de EEE (equipamentos elétricos e eletrônicos) fazem a substituição destes cada vez com mais frequência, tendo um tempo médio de vida relativamente curto, de 2-3 anos (FLANDINET et al., 2012). Isso resulta em grandes quantidades de resíduos eletrônicos, que devem ser solucionados (LACOURSIERE, 2005; HE et al., 2006; LEE, SONG e YOO, 2007; HUANG, GUO E XU, 2009; ROBINSON, 2009; LUDA, 2011), pois é um grande problema social e uma ameaça ao meio ambiente relatado há algumas décadas até aos dias de hoje (BRODERSEN et al., 1992; LEE et al., 2004; LI e GUAN, 2009; JOHANSSON e BJÖRKLUND, 2010; MARQUES, CABRERA e MALFATTI, 2013; RUBIN et al., 2014; HE, J. et al., 2015). E isto reflete nas placas de circuito impresso (PCIs) que são a base da indústria eletrônica.

Conforme diversos pesquisadores (CUI e FORSSBERG, 2003; MURUGAN et al., 2008; GUO, GUO e XU, 2009), a produção de EEE constitui um dos setores de maior crescimento da indústria de transformação no mundo, esperando um aumento em 3-5% por ano (CUI e FORSSBERG, 2003). Em paralelo, há uma expectativa de vida caindo para os produtos eletrônicos, baixas taxas de reciclagem, grande variabilidade entre os resíduos REEE (resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos) devido à contínua mudança na concepção dos produtos, aumento do comércio global legal e ilegal destes (PUCKETT et al, 2002; BRIGDEN et al., 2005; WONG, et al., 2007; DEUTSCHE UMWELTHILFE, 2007; COBBING, 2008; WILLIAMS et al., 2008; SEPÚLVEDA et al., 2010; ONGONDO, WILLIAMS e CHERRETT, 2011). O número de aparelhos utilizados per capita na escala global continuará a aumentar, enquanto seu tamanho irá diminuir ainda mais e microprocessadores vão invadir os objetos mais e mais a cada dia (HILTY, SOM e KÖHLER, 2004; HILTY, 2005).

Para Murugan et al. (2008) e Chancerel et al. (2009), a taxa de geração de resíduos REEE atinge níveis elevados em todo o mundo e continua a aumentar, sendo um dos mais rápidos e crescentes fluxos de resíduos. Em 2002 era estimado que os equipamentos eletrônicos ocupassem aproximadamente 4% dos resíduos municipais (EMERY, WILLIAMS e GRIFFITHS, 2002) e já em 2005 para Widmer et al. (2005), esses itens já constituíam 8% dos resíduos sólidos urbanos. Huisman et al., (2007) coloca que em 2007 a geração era de 8,3-9,1 milhões de toneladas por ano, o que corresponde a cerca de 17 kg per capita por ano. O Brasil, em 2010, produzia cerca de 2,6 kg por ano de resíduos eletrônicos por habitante (BRASIL, 2010). A proporção de RPCIs (resíduos de placas de circuito impresso) no resíduo eletrônico é de cerca de 3% (BERNARDES et al., 1997; BASDERE e SELIGER, 2003; UNEP, 2005; ROCHA, 2009).

Sepúlveda et al. (2010) coloca que as PCIs usadas têm atraído mais atenção do público e dos pesquisadores, pois a abundância de materiais tóxicos, incluindo metais pesados e BFRs (*Brominated flame retardant* – Retardantes de chama bromados) podem ser facilmente encontrados nestas e que causam enormes danos ao meio ambiente (CUI e FORSSBERG, 2003; AEA TECHNOLOGY, 2004; WANG et al., 2005; EPS CANADA, 2006; OWENS et al., 2007; LEUNG et al., 2008; VASILE et al., 2008; ZHOU e QIU, 2010; ALMEIDA et al., 2013), se não forem devidamente tratados (visto na figura 13).

Figura 13 - A) Despejo de placas de circuito tratadas com ácido e resíduos de processamento ao longo do rio Lianjiang na China. B) Recuperação de ouro a partir dos resíduos de PCI usando banhos ácidos.



Fonte: Puckett et al. (2002).

Conforme Guo, Guo e Xu (2009), em geral, os componentes de resíduos de PCIs podem ser divididos em frações metálicas (MFS) e as frações não-metálicas (NMFS). A típica composição de NMFS consiste em resinas termofixas (epóxi), fibra de vidro, plásticos,

materiais de reforço, BFRs e outros aditivos e ocupam cerca de 70% de peso dos resíduos de PCI. Resinas termofixas não podem ser refundidas ou remoldadas devido à sua estrutura de rede, consideradas então como não-recicláveis (GUO, GUO e XU, 2009). Os não-metais reciclados de resíduos de PCIs podem ser reutilizados como enchimento de reforço nos compósitos PP (ZHENG et al., 2009).

Diversos autores (RICHTER, LORENZ e BAHADIR, 1997; MENAD, BJORKMAN e ALLAIN, 1998; RIESS et al., 2000; VEHLLOW et al., 2000; RAHMAN et al., 2001; CUI e FORSSBERG, 2003; EBERT e BAHADIR, 2003; SCHLUMMER et al., 2007; DIMITRAKAKIS, 2009; TAURINO, POZZI e ZANASI, 2010), argumentam que os plásticos REEE contêm Retardantes de Chama Bromados (BFR), incluindo Bifenilos polibromados (PBB) e Éteres Difenil Polibromado (PBDE) e com a combustão destes NMFS produz a formação de gases altamente tóxicos, as Dibenzodioxinas e Dibenzofuranos Polibromados (PBDD/Fs) e as Dibenzeno-P-Dioxinas Policloradas (PCDD/Fs) além da fibra de vidro reduzir significativamente a eficiência de combustível. Tradicionalmente estes materiais não-metálicos são depositados em aterro ou incinerados, o que causará desperdício de recursos e potenciais problemas ambientais (ROTTER, 2002; JANG e TOWSEND, 2003; HAGELÜKEN, 2006; HUANG et al., 2007; OWENS et al., 2007; JANZ, ROTTER e BILITEWSKI, 2008).

Já a fração metálica consiste de cobre ~ 16%, estanho-chumbo ~ 4%, ferro e de ferrita ~3%, níquel ~ 2%, prata ~ 0,05%, ouro ~ 0,03%, paládio ~ 0,01%, e assim por diante e até mesmo elementos raros, como Ta, cobertas com, ou misturado com vários tipos de plásticos e cerâmicas (HOFFMANN, 1992; YOKOYAMA e IJI, 1997; RICHTER, LORENZ e BAHADIR, 1997; ERNST, POPP e ELDIK, 2000; RIESS et al., 2000; VEHLLOW et al, 2000; VEIT, PEREIRA e BERNARDES, 2002; GOOSEY e KELLNER, 2003; TELLER, 2006). Li (2007) argumenta que a pureza dos metais preciosos nas PCIs é de mais do que 10 vezes do que a quantidade nos minerais ricos nesses elementos. Cui e Zhang (2008) argumenta que o principal objetivo econômico para a reciclagem de resíduo eletrônico é proveniente da recuperação de metais preciosos. É claro que o resíduo eletrônico varia consideravelmente com a sua idade, origem e fabricante, portanto não há nenhuma composição de sucata, mesmo entre os valores apresentados como médias típicas.

3.2.2. Legislação

Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) são definidos na Diretiva *WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment)* como os “equipamentos elétricos ou eletrônicos que constituem resíduos [. . .], incluindo todos os componentes, subconjuntos e consumíveis que fazem parte do produto no momento da devolução.” Alternativamente, as terminologias “lixo eletrônico” e “*e-waste*” são amplamente utilizadas (CHANCEREL et al., 2009).

Para Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007), diferentes indústrias têm estado sujeitas, desde há vários anos a um aumento dos requisitos legislativos. Grandes fabricantes de eletroeletrônicos estão eliminando elementos nocivos de seus produtos para atender a uma norma da União Europeia que entrou em vigor em 1º de julho de 2006. A diretiva de Restrição de Certas Substâncias Perigosas em produtos (*RoHS - Restriction of Certain Hazardous Substances*), proíbe a comercialização na Europa de produtos eletroeletrônicos que contenham metais pesados como chumbo, cádmio, mercúrio e cromo e dos Retardantes de chama Bifenilos Polibromados (PBB) e Éteres Difenil Polibromado (PBDE), segundo Nogueira, Queiroz-neto e Manzato (2007).

Conforme os autores Cui e Forssberg (2003) e Boks (2006) estão em vigor atualmente políticas e quadros legais em várias regiões do mundo, incluindo a União Europeia (por exemplo, *WEEE, RoHS*) e o Japão (por exemplo, a *HARL - Home Appliance Recycling Law*). As instalações de reciclagem são agora confrontadas com o desafio de melhorar as suas atividades de reciclagem e recuperação, recebendo uma quantidade maior de componentes e materiais, com um custo razoável e, ao mesmo tempo, atender o número crescente de requisitos legais (WILLIAM, 2001; SUTHERLAND, GUNTER e WEINMANN, 2002).

Com referência as placas de circuito impresso, há uma forte pressão por parte de empresas europeias de não aceitarem mais produtos eletrônicos produzidos com uma placa de circuito impresso com a solda do tipo estanho-chumbo, devido à toxicidade desse tipo de solda. Com as leis européias cada vez mais restritivas a este tipo de material, torna-se importante o estudo de outro tipo de solda, menos agressiva ao meio ambiente (NOGUEIRA, QUEIROZ-NETO e MANZATO, 2007). De acordo com a Diretiva Comunitária Européia 2000/0159 C5-0487/2002 (*RoHS*) sobre a limitação do uso de certos materiais prejudiciais ao meio ambiente, os Estados Membros eram obrigados a partir de primeiro de julho de 2006 para garantir que, entre outros materiais, o Pb não fosse usado em materiais de solda utilizado nos equipamentos elétricos e eletrônicos para serem vendidos no mercado (EUROPEAN COMMISSION, 2003a e 2003b; UNITED UNIVERSITY UNION, 2007).

De acordo com a Comissão Européia, se espera um aumento de cerca de 45% entre 1995 e 2020 na quantidade total de resíduos na Europa. Como resposta a essa previsão, a estratégia europeia de resíduos foi fundamentada em três pilares: prevenção, reciclagem e reutilização e melhor disposição final dos resíduos (EUROPEAN COMMISSION, 2003a). A Diretiva 2002/96/EC da Comissão Europeia, quanto aos resíduos de REEE (EUROPEAN COMMISSION, 2003b) define um quadro de requisitos para o tratamento e reciclagem de REEE. Todos os estados membros têm de garantir que, em média, mais de quatro quilos de REEE por hab/ano e que sejam recolhidos separadamente. A diretiva dá prioridade à reutilização dos REEE e quando a reutilização não é aconselhável, todos os resíduos recolhidos separadamente devem ser enviados para recuperação. A infra-estrutura necessária para atender a esses requisitos inclui pontos de coleta, sistemas de logística, usinas de tratamento e comercialização de matérias-primas secundárias. Requer também métodos de acompanhamento para assegurar que os processos aplicados cumprem os requisitos (CHANCEREL et al., 2009).

Em relação ao Brasil, a fim de enfrentar as consequências sociais, econômicas e ambientais do manejo de resíduos sólidos sem prévio e adequado planejamento técnico, a Lei nº 12.305/10 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto 7.404/10. Um dos instrumentos mais importantes da Política é o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Assim, fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o Estado, o cidadão e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos são todos responsáveis pela minimização do volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como pela redução dos impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010). De acordo com esta lei, os produtores e autoridades governamentais devem preparar planos que oferecem diagnóstico da situação, cenários de redução, objetivos e metas de reutilização e reciclagem para diminuir a deposição em aterro. No entanto, esta lei ainda carece de grande parte do acompanhamento da legislação estadual e local e permitindo que os regulamentos em todos os níveis de governo para colocar suas disposições totalmente em prática (ARAÚJO et al., 2012).

Dentre os resíduos obrigatórios presentes na logística reversa se encontram os produtos eletroeletrônicos e seus componentes. O grande problema ainda é a falta de regulamentação aos produtos especiais, entre eles os eletrônicos (definidos no artigo 33º da PNRS) que são órfãos (provenientes do mercado ilegal ou de fabricantes já inoperantes no mercado). Assim uma grande parcela de produtos não tem um correto destino, além da

dificuldade da implantação destes acordos setoriais (BRASIL, 2010; ONGONDO, WILLIAMS e CHERRETT, 2011).

A Responsabilidade Alargada do Produtor (EPR) é uma diretiva para estender a responsabilidade do projeto sobre REEE e têm implicações significativas para os fabricantes sobre custos e rentabilidade. Para Murugan et al. (2008) e Chancerel et al. (2009), é necessário identificar esquemas para administrar e dispor estes resíduos de forma ambientalmente segura. Chiodo (2005) e Jie, Ying-Shun e Mai-Xi (2008) argumentam que há uma crescente consciência ambiental em escala mundial, sendo assim necessário um sistema de gestão ambientalmente correto e economicamente viável para o final da vida útil do equipamento (EoL, *End-of-life*, final da vida útil) dos EEE, sendo uma das estratégias a separação de componentes e desmontagem de produtos eletrônicos, tendo grande importância para o desenvolvimento sustentável. Sendo que os custos efetivos e métodos ambientalmente eficazes são necessários para gerir estes resíduos (VEIT, PEREIRA e BERNARDES, 2002; GAO, LI e ZHANG, 2002; GOOSEY e KELLNER, 2003; KANG e SCHOENUNG, 2005; SINHA-KHETRIWALA, KRAEUCHIB, e SCHWANINGER, 2005; BOENI, SILVA e OTT, 2008; ESWARAI AH et al., 2008).

De acordo com Andrae (2010), esta é uma questão controversa, onde a indústria eletrônica lida com a mudança para a produção de soldas livres de chumbo (*Lead-Free*). A proibição de Pb por parte da RoHS foi proposta pelos legisladores, que estimaram o risco ambiental de Pb em resíduos eletroeletrônicos como alta para os seres humanos e para o ecossistema. Uma das razões para a preocupação do legislador foi a de que, de fato, a reciclagem de eletrônicos não está acontecendo rapidamente e suficientemente. No entanto, vai ser relatado neste próximo capítulo, ítem 3.2.3., a dificuldade da seleção da melhor liga metálica substituta a tradicional Sn-Pb, assim restando muitas dúvidas quanto aos custos e em relação à confiabilidade das alternativas livre de Pb.

3.2.3. ACV – Avaliação do ciclo de vida das PCIs

Segundo Ljungberg (2007), por volta dos anos 90, o Conselho de Negócios do Mundo para o Desenvolvimento Sustentável (*WBCSD - World Business Council for Sustainable Development*) emitiu uma declaração sobre a conexão entre a proteção ambiental, o crescimento econômico e a satisfação das necessidades humanas. A declaração conduziu ao desenvolvimento da ISO 14001 em 1996 pela Organização Internacional para Padronização (ISO) com sede na Suíça. Esta é uma norma que avalia as consequências ambientais das

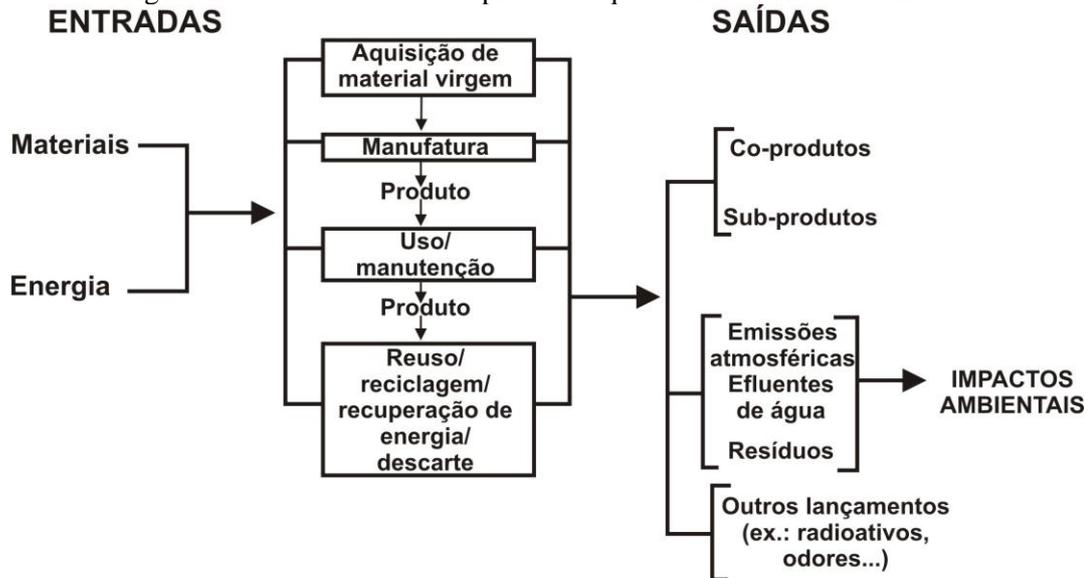
atividades, produtos e serviços de uma empresa, procurando atender à demanda da sociedade. (SCHELDON, 1997).

Conforme diversos pesquisadores (HAUSCHILD, JESWIET e ALTING, 2005; BONNEMA, 2006; CERDAN et al., 2009; ANDRAE, 2010; ILGIN e GUPTA, 2010; RAMANI et al., 2010; BIGUM, BROGAARD e CHRISTENSEN, 2012; BOVEA e PÉREZ-BELIS, 2012; UMEDA et al., 2012; FARGNOLI, MINICIS e TRONCI, 2014; RUBIN et al., 2014), existem muitos métodos e ferramentas ligadas para a avaliação ambiental, tais como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), termo mais usado em inglês o LCA - *Life Cycle Assessment*, todas com a intenção de indicar qual alternativa é melhor em comparação a outras. Estas técnicas procuram identificar em que ponto do processo há maior impacto, maior desperdício e, portanto, maior risco ambiental, para atacar especificamente o ponto que necessita de maior atenção. Por isso essa é uma ferramenta, não apenas de avaliação, mas de mudança conforme os autores Almeida et al. (2010) e Meira e Kiperstok (2003).

De acordo com Pigozzo et al. (2010), a introdução deste conceito requer esforços para aumentar a eficiência em atividades como o design de produtos, processos de fabricação, uso e seleção e adoção de estratégias de fim de linha. A maioria dos pesquisadores usam ACV dentro de uma metodologia DFE - Design para o Meio Ambiente (*Design for Environment*) como uma ferramenta para medir o impacto ambiental do projeto de um produto (ZHANG e FORSSBERG, 1999; MEHTA e WANG, 2001; BOVEA e WANG, 2003; BEVILACQUA, GIACCHETTA e CIARAPICA, 2007; STEVELS, 2007; GROTE et al., 2007; SAKAO, 2007).

Neste contexto, os designers estão sendo forçados a considerar técnicas mais holísticas para o projeto e avaliar produtos e processos, com a necessidade de alterar as práticas de desenvolvimento de produto não sustentáveis atuais (MARQUES, GUANABARA e KINDLEIN, 2007; MARQUES, 2008; MARQUES, MARRERO e MALFATTI, 2011). Esquemáticamente o ciclo de vida consiste em quatro fases que são a aquisição dos materiais, a produção, seguida pela fase de utilização, e por último o fim-de-vida, mostrando as entradas e saídas, caracterizadas por materiais e energia, figura 14.

Figura 14 - O ciclo de vida do produto o qual a ACV atende este modelo.



Fonte: Adaptada de Andrae (2010).

Para Andrae (2010), geralmente é difícil e muitas vezes confuso quantificar as consequências ambientais associadas com materiais, processos e produtos. Dificuldades são, por exemplo, a determinação dos efeitos ambientais associados com os objetos de comparação, a quase impossível tarefa de comparar diferentes efeitos ambientais e a quantidade de dados necessários para comparar relativos produtos. Muitas vezes os dados necessários também são escassos ou inacessíveis, sendo assim difícil então delimitar a análise de carga ambiental. Em relação ao Brasil a análise do ciclo de vida dos REEE é extremamente complexa devido à dispersão dos agentes envolvidos em todo o país e a falta de uma política estruturada para a coleta e reciclagem (ABETRE, 2006; RODRIGUES, 2007; FEHR, CASTRO e CALÇADO, 2010). Mesmo o primeiro passo da caracterização do ciclo de vida, em termos quantitativos, é difícil e controverso, sendo os dados disponíveis no Brasil conflitantes, o que impede a sua utilização para precisas ACVs (ARAÚJO et al., 2012).

Análise do ciclo de vida de produtos eletrônicos

Conforme Andrae (2010), a vasta indústria eletrônica é caracterizada por suas cadeias longas de fornecimento e desse modo muitos impactos ambientais indiretos são associados aos seus produtos. Os produtos de microeletrônica utilizados na vida cotidiana parecem pequenos e inofensivos, mas uma grande quantidade de material e energia é necessária para a produção de componentes eletrônicos, especialmente o Circuito Integrado (IC). Um dos principais materiais em peso nas placas de circuito impresso é o cobre, onde pesquisadores (LI e GUAN, 2009; JOHANSSON e BJÖRKLUND, 2010; RUBIN et al., 2014) indicaram

que pode ser possível utilizar a metodologia de ACV para comparar a recuperação do cobre em placas de circuito impresso por meio de processos eletroquímicos em termos de suas cargas ambientais. Outro exemplo é o estudo dos autores Andersen, Walnum e Andrae (2010), onde compara as emissões climáticas do ciclo de vida de vários componentes eletrônicos, apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Emissão de CO₂ e do ciclo de vida de alguns componentes eletrônicos.

Dispositivos e tecnologia, nação, referência, limite de sistema	Massa por unidade (kg)	Emissões por unidade (kg CO₂)	As emissões por massa (kg CO₂ / kg)
Placas de circuito impresso			
PCI, Comissão Européia (2005), <i>cradle-to-gate</i>	3,8	64	17
PCI, Malásia, Standards and Industrial Research Institute of Malaysia (SIRIM), 2005, <i>cradle-to-gate</i>	0,29	29	100

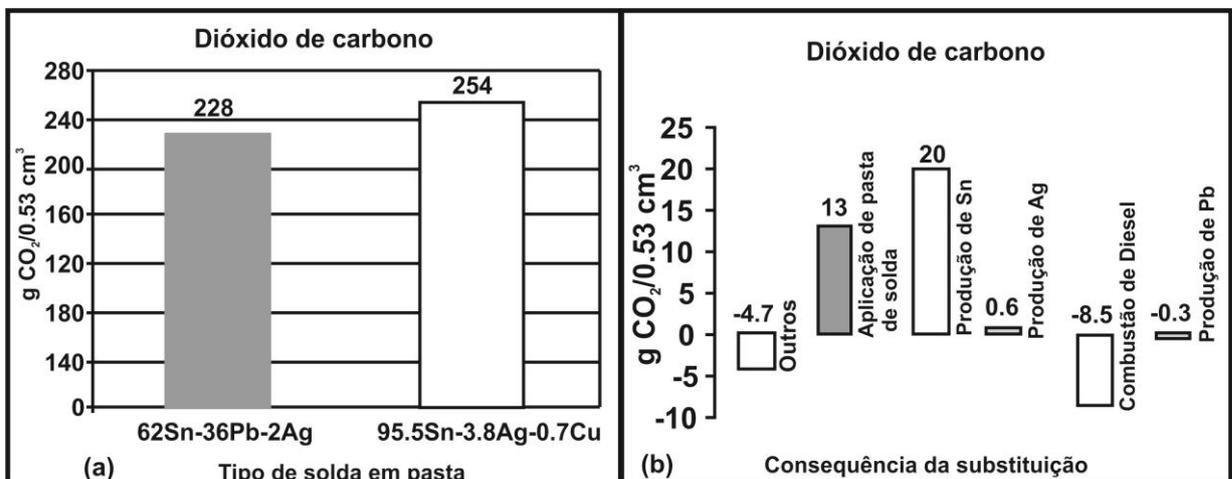
Fonte: Adaptado de Andersen, Walnum e Andrae, 2010.

Em relação às ligas utilizadas nas soldas de EEE, diversos autores (SUGANUMA, 2001; MIHAESCU e CARSTEANU, 2003; SUGANUMA, 2003; DEUBZER, 2007) salientam que a introdução de soldas livres de chumbo irá reduzir a toxicidade e os possíveis riscos na eliminação dos materiais de interconexão em REEE. Ao mesmo tempo, comparadas com a solda tradicional Sn-Pb, os materiais livres de Pb dobram o custo de manufatura para as indústrias de eletro-eletrônicos, aumentando a energia utilizada e a perda de valiosos recursos. A solda livre de Pb nos materiais de interconexão são menos eficientes em recursos e gastos energéticos. Mais energia e, conseqüentemente, mais custos ambientais globais são exigidos pela solda livre de Pb nos processos de soldagem. Além disso, as máquinas de solda serão degradadas pelo aumento da corrosão e terão de ser substituídas em um ritmo mais rápido. Fornos de solda mais eficiente poderiam compensar este efeito negativo (NIU e LI, 2007).

Turbini et al. (2003) apresenta resultados que em 1998, Pb não era uma preocupação como poluente oriundo de aterros nos EUA, e por sua vez as PCIs eram uma pequena parte dos resíduos sólidos urbanos. Porém, este paradigma mudou com a geração cada vez maior de resíduos eletrônicos existentes nos resíduos sólidos urbanos. Griese et al. (2000) argumenta que estudos confirmaram que o Pb era o material com maior potencial de ser poluente e que tinha que ser banido para prevenir emissões sem controle de Pb e estaria claro que as ligas livres de Pb diminuiriam o potencial de impacto ambiental de eletrônicos. Mas que uma ACV completa seria necessária e mais completa para descobrir o comportamento ambiental dos novos materiais que irão substituir.

Ekvall e Andrae (2006) conduziram uma pesquisa comparando uma solda típica Sn-Pb de composição (62% Sn, 36% Pb, 2% Ag em peso) com uma liga livre de Pb (95,5%Sn, 3,8% de Ag e 0,7% de Cu em peso). O foco da pesquisa foi a emissão de Pb e as emissões de CO₂ equivalentes. Os resultados do ALCA - Atributo da Avaliação do ciclo de vida (*Attributional Life Cycle Assessment*) indicaram que a solda livre de Pb contribuiu com 10% a mais para o potencial de aquecimento global do que Sn-Pb. Fato este também confirmado por pesquisa da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA, 2005), comparando Sn-Pb e soldas livres de chumbo (*Pb-Free*). Apesar da má qualidade das métricas econômicas e dados marginais do LCI - Inventário do Ciclo de Vida (*Life Cycle Inventory*), a CLCA - Consequência da Avaliação do ciclo de vida (*Consequential Life Cycle Assessment*) demonstrou que, quando o uso de Pb é eliminado do ciclo de vida da solda, o efeito foi parcialmente compensado pelo aumento do uso de Pb em baterias e outros produtos. A figura 15 - a) mostra a emissão de CO₂ para as soldas e a b) mostra os escores da consequente emissão de CO₂.

Figura 15 - A) Emissões de Dióxido de Carbono a partir dos ciclos de vida dos tipos de solda. B) Consequentes resultados de CO₂ quando subtraindo CLCA para 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu a partir de CLCA de 62Sn-36Pb-2Ag.

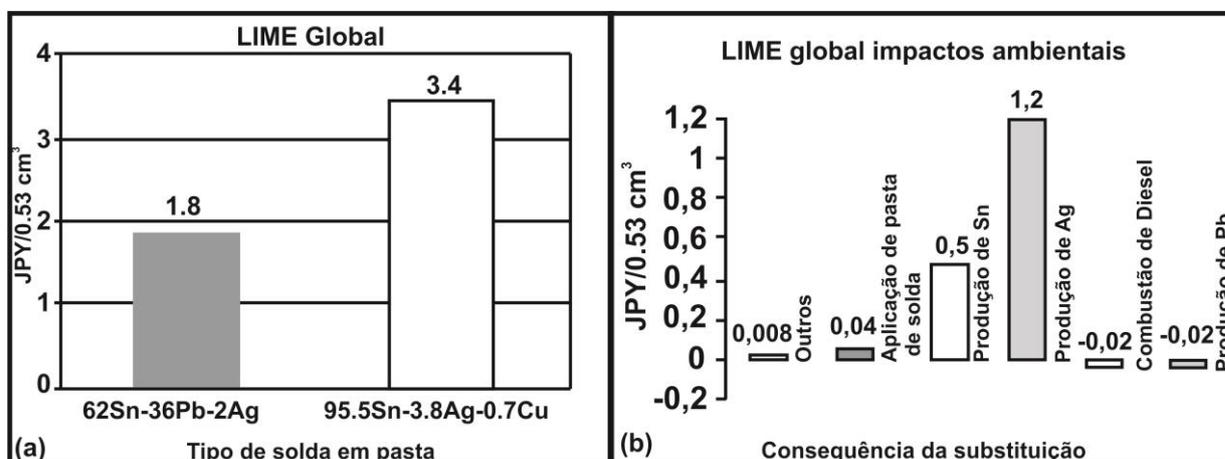


Fonte: Adaptada de Andrae (2010).

Outra pesquisa desenvolvida com o mesmo objetivo de Ekvall e Andrae (2006) foi realizada por Andrae, Itsubo e Inaba (2007) utilizando o método LIME – Avaliação do ciclo de vida baseado em modelagem do ponto final (*Life Cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling*). Este é um método de avaliação de impacto ambiental, que avalia cerca de 1.000 substâncias, não apenas as emissões de CO₂ que muitos estudos se utilizam, dando a possibilidade de uma melhor compreensão do impacto ambiental “total”. Além disso, custos do desenvolvimento de novos produtos versus os seus custos ambientais podem ser estimados utilizando LIME. Neste estudo (ANDRAE, ITSUBO e INABA, 2007), a hipótese

foi de que haveria um resultado negativo do impacto ambiental global, ou seja, uma emissão menor de gases, como consequência da introdução da solda 95,5Sn-3,8Ag-0,7Cu para substituir a solda 63Sn-37Pb. Ambos os resultados de ALCA e CLCA indicaram que a pontuação global de LIME em JPY (Iene Japonês) irá aumentar consideravelmente, quase 90%, figura 16 A). A grande diferença entre 63Sn-37Pb e 95,5Sn-3,8Ag-0,7Cu são o consumo de recursos de Sn e Ag, mostrado na figura 11 B). Esse estudo confirma que o consumo de recursos será mais alto para pastas de soldas com composição Sn-Ag-Cu do que as convencionais Sn-Pb.

Figura 16 - A) Resultados atribuídos ao LIME para 63Sn-37Pb e 95,5Sn-3,8Ag-0,7Cu. Consequentes resultados do LIME quando o substrato CLCA de 63Sn-37Pb a partir do CLCA de 95,5Sn-3,8Ag-0,7Cu.



Fonte: Adaptada de Andrae (2010).

Outro ponto que o autor Andrae (2010) comenta é que dependendo das soldas substitutas, a demanda de bismuto, cobre, zinco, prata e antimônio aumentarão. O autor (2010) realiza uma previsão de que a demanda de Pb irá declinar e que a de Sn irá aumentar. Em muitas análises comparando-se o cenário base e o cenário sem o Pb mostraram que para diversas soldas sem chumbo, há uma pontuação maior neste tipo de solda na avaliação do ciclo de vida do que nas convencionais. Isto em parte é devido ao alto impacto ambiental devido ao esgotamento de recursos de Sn em comparação ao esgotamento de recursos de Pb, pois todas soldas livres de chumbo têm altos níveis de concentração de Sn do que as baseadas em Pb.

Em outro estudo (NIU e LI, 2007) mostra as emissões de Pb na atmosfera AT, Toxicidade do ar OSHA (*OSHA Air Toxicity*) a partir da incineração de placas de circuitos impresso (PCI's), juntamente com as emissões de SO₂ a partir da eletricidade e produção de Sn, foram os pontos mais destacados no presente estudo, tabela 4.

Tabela 4 - Maiores contribuintes para a AT dado por tipo de solda.

Pasta de solda	Estágio do ciclo de vida	Processo unitário	Fluxo	% Contr.
62Sn-36Pb-Ag	Fim de vida útil	Incineração da solda	Emissões de Pb ao ar	34
	Manufatura	Produção de Sn	Emissões de SO ₂ ao ar	23
	Aplicação de pasta de solda	Produção de eletricidade	Emissões de SO ₂ ao ar	18
95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu	Manufatura	Produção de Sn	Emissões de SO ₂ ao ar	44
	Aplicação de pasta de solda	Produção de eletricidade	Emissões de SO ₂ ao ar	26

Fonte: Adaptada de Niu e Li, 2007.

Para a AT em um CLCA, há um aumento significativo detectado devido ao aumento da produção de Sn e geração de energia elétrica para a aplicação de solda, mas este aumento foi compensado por uma diminuição principalmente da incineração evitada de placas impresso contendo Pb.

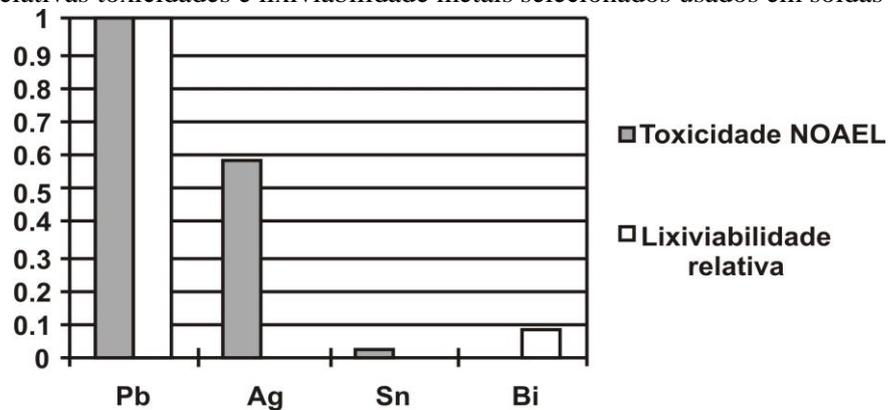
Outra questão importante e controversa é de quanto metal, especialmente Pb e Ag, é lançado e lixiviado atualmente na natureza com origem no lixo eletrônico enviado a longo prazo para aterros sanitários e do lixo eletrônico que é despejado ilegalmente. Foi levantada na pesquisa de Townsend et al. (2008) a lixiviabilidade das placas de circuito impresso com os diversos componentes sendo conectados com as diferentes soldas [63Sn-Pb], [99,3Sn-0,7Cu], [95,5Sn-4Ag-0,5Cu], [96Sn-2,5Ag-1Bi-0,5Cu] e [42Sn-1Ag-57Bi], mostrado na tabela 5 e figura 17. O procedimento de lixiviação para caracterização da toxicidade TCLP (*Toxicity characteristic leaching procedure*) foi um dos métodos utilizados. Há muitas medidas através das quais a toxicidade é expressa. Um destes é o NOAEL - Não Observado Limite Efeito Adverso (*No Observed Adverse Effect Limit*). As relativas lixiviabilidades na figura 17 referem-se a kg de metal lixiviados por kg de metais contidos na solda. A figura 17 mostra que o Pb é mais tóxico que Ag, Sn e Bi e também mais inclinado a lixiviar a partir de conjuntos maiores de circuito impresso em condições extremas. Estes dois fatos são importantes a partir da perspectiva do potencial de Pb em causar danos, sendo claramente maior do que os outros.

Tabela 5 - Resultados dos piores casos de lixiviação de metais usados em soldas.

	Resultados dos lixiviados TCLP [mg/dm ³]	Partes de solda	Partes de metal	Volume de solução de extração TCLP [dm ³]
Pb em 63Sn-37Pb	157	1,7	37	2
Ag em 95.5Sn-4Ag-0.5Cu	0,02	1,5	4	2
Sn em 63Sn-37Pb	0,024	1,7	63	2
Bi em 42Sn-57Bi-1 Ag	21,1	1,8	57	2

Fonte: Adaptada de Townsend et al. (2008).

Figura 17 - Relativas toxicidades e lixiviabilidade metais selecionados usados em soldas e adesivos.



Fonte: Adaptada de Andrae (2010).

A confiabilidade da solda *Lead-Free* ainda não está completamente acertada, pois há muitos efeitos (micção, “whiskers” de Sn, etc), cujas causas não são bem compreendidas, nem previsíveis. Na figura 18 exemplificasse com uma imagem MEV da superfície de uma placa Sn97Cu3 com subcamada de Ni/Au após 1500 choques numa gama de temperatura cíclica de -45°C a + 85°C mostrando “whiskers” de Sn.

Figura 18 - Imagem MEV com “whiskers” de Sn.



Fonte: Skwarek (2011).

Assim, existem muitas ligas possíveis que implicam diferentes graus de confiabilidade (HUANG, GUO E XU, 2009). Em resumo, é uma questão em aberto que medições de campo e avaliações de risco implicariam sobre os custos ambientais causados pela mudança para a eletrônica livre de Pb.

Alguns pesquisadores (LI e GUAN, 2009; JOHANSSON e BJÖRKLUND, 2010; RUBIN et al., 2014) indicaram que pode ser possível utilizar a metodologia de ACV para comparar a recuperação do cobre em placas de circuito impresso por meio de processos eletroquímicos em termos de suas cargas ambientais. Andrae (2010) argumenta que as análises dos impactos ambientais de soldas livre de Pb, em comparação com soldas Sn-Pb ajudariam a evitar alternativas piores. A análise adequada da eco-eficiência dos materiais tem que esperar até que os custos de ciclo de vida sejam estimados. De acordo com Andrae (2010), nenhuma substituição simples para a tradicional solda existe, sendo que a ferramenta de ACV por si só pode não ser capaz de quantificar os riscos e custos ambientais em uma perspectiva global. Ainda para Andrae (2010) ACV é, idealmente, uma ferramenta de triagem bastante rápida, mas ainda poderosa, devendo ser melhorada continuamente na sociedade para detectar tendências e desenvolver a metodologia. ACVs não são um esforço de uma só vez, mas precisam de atualizações contínuas se forem apoiar decisões políticas.

3.2.4. Métodos de reciclagem

Os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) estão sendo tomados em consideração não só pelo governo e por muitos pesquisadores, mas também pelo grande público devido ao seu conteúdo de material perigoso (EUROPEAN COMMISSION, 2003a 2003b; EMERY, WILLIAMS e GRIFFTHS, 2002; CUI e FORSSBERG, 2003; HISCHIER, WÄGER e GAUGLHOFER, 2005; NIU e LI, 2007; LI, XU e ZHOU, 2007; SVTC, 2007; ZHENG et al., 2009; LONG et al., 2010; LUDA, 2011; FLANDINET et al., 2012; FOGARASI et al., 2013; ZENG et al., 2013). Atualmente, as principais opções para o tratamento de resíduos eletrônicos estão envolvidas no reuso, remanufatura e reciclagem, bem como a incineração e deposição em aterro. A hierarquia de tratamento dos resíduos eletrônicos encoraja a reutilização do equipamento inteiro em primeiro lugar, remanufatura, a recuperação de materiais por técnicas de reciclagem, e como último recurso, a eliminação por incineração e disposição em aterros sanitários.

Conforme William (2001), a reciclagem significa o reprocessamento de resíduos de materiais para o fim original ou para outros fins. A reciclagem de resíduo eletrônico implica a

desmontagem e/ou destruição do equipamento para recuperar materiais. Diversos estudos têm sido feitos sobre métodos a serem utilizados para se reciclar as placas de circuitos impressos. Na grande maioria apenas uma parte é reciclada, principalmente com o objetivo de recuperar os metais valiosos, entre eles o cobre, o que é muito pouco pela quantidade e variedade de materiais existentes (VEIT et al., 2005; KASPER et al., 2011; FOGARASI et al. 2013).

A reciclagem de PCI tem sido difícil devido à sua construção multi-componente e multi-camadas, representando desafios para os meios mecânicos de separação (MURUGAN, et al., 2008). Também para Cui e Forssberg (2003) e Guo, Guo e Xu (2009) o REEE é diverso e complexo, em termos de composição de materiais e componentes, bem como processos de equipamentos de manufatura. Portanto, várias operações que levam à separação dos diferentes componentes da PCI estão sendo investigados (YOKOYAMA e IJI, 1997; KOYANAKA et al., 1997; ZHANG e FORSSBERG, 1997; MENAD, BJORKMAN e ALLAIN, 1998; ZHANG e FORSSBERG, 1999; LEE et al., 2000; DUAN et al., 2011; CUI e FORSSBERG, 2003; KINOSHITA et al., 2003; LEE et al., 2004; HE et al., 2006).

Muitos estudos, como pirometalurgia (SZCZYGIEL, 1998), hidrometalurgia (MECUCCI, 2007; OISHI, 2007) e processos físico-mecânicas (ZHANG e FORSSBERG, 1997; VEIT, PEREIRA e BERNARDES, 2002; CUI e FORSSBERG, 2003; VEIT et al., 2005; LI, XU e ZHOU, 2007; ESWARAI AH et al., 2008), têm sido realizados no que diz respeito à reciclagem de REEE. Para Veit et al. (2006) e Lee, Kim e Lee (2012), no entanto, estes métodos têm vários obstáculos para usar como um processo industrial de reciclagem de resíduos PCI, tais como a sua capacidade limitada de processamento, alto consumo de energia, o vazamento de gases tóxicos, e o descarte de reagentes químicos. Portanto, o estudo contínuo sobre reciclagem de REEE é necessário.

Cui e Forssberg (2003), Jie, Ying-Shun e Mai-Xi (2008), Guo, Guo e Xu (2009) e Lee, Kim e Lee (2012) classificam a reciclagem de resíduos eletrônicos nas seguintes etapas principais: (a) desmontagem: desmontagem seletiva, segmentação para reduzir o tamanho adequado e as frações MFs e NMFS, destacando os componentes perigosos ou valiosos para o tratamento especial; (b) a atualização: tratamento mecânico e/ou processamento metalúrgico para atualizar o conteúdo dos materiais desejáveis; (c), refino: purificação dos materiais recuperados através do processamento químico (metalúrgico) de modo que sejam aceitáveis para o uso original.

Yang et al. (2009) considera a desmontagem de placa de circuito impresso uma das tarefas mais difíceis na reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos e considera a análise da desmontagem mecânica necessária para o desenvolvimento de métodos

de desmontagem eficientes para PCI. Vários métodos mecânicos são utilizados para separar metais das PCIs, com base em suas características físicas específicas. São a separação pela forma (GUNGOR e GUPTA, 1998; KERS et al., 2008), através de gabaritos (*jigging*) (SCHMELZER, WOLF e HOBERG, 1996), separação magnética, separação baseada na condutividade elétrica (correntes Eddy), separação baseada na densidade (CUI e FORSSBERG, 2003 e ESWARAIHAH et al., 2008), e a separação eletrostática por método corona, que tem sido muito comentada por Cui e Forssberg (2003), Wu, Li e Xu (2008a, b e c) e Huang, Guo e Xu (2009).

Para Tanskanen e Takala (2006), Tanskanen (2013), Kang e Schoenung (2005), na fase de pré-tratamento, diferentes processos tecnológicos são utilizados para separar o conteúdo de material integrado no produto, de modo que as frações de materiais diferentes podem ser dirigidos para os processos de reciclagem adequados. Este processo é explicado na figura 19.

Figura 19 - Fluxo do processo durante o pré-tratamento do lixo eletrônico.



Fonte: Adaptado de Kang e Schoenung (2005).

Para Hicks, Dietmar e Eugster (2005), Ding et al. (2008) e Duan et al. (2011), com a desmontagem informal na China, por exemplo, E-recicladores (recicladores de eletrônicos) usam ferramentas manuais como talhadeiras, martelos e tochas de corte para abrir conexões de solda e vários tipos diferentes de metais e componentes. O outro meio de separação é quando as placas são aquecidas usando um ventilador eletrônico e, em seguida, separados por força através do uso de um alicate, própria gravidade ou vibração (HUANG, GUO e XU, 2009). Para abrir conexões soldadas, a temperatura de aquecimento é de 40 °C e 50 °C superior ao ponto de fusão da solda para ser necessária uma desmontagem eficaz. Mostra-se na figura 20, os processos usuais de desmontagem, tanto manuais como mecanizados.

Figura 20 - Uma máquina semi-automática de desmontagem (A e B) e um aquecedor simples utilizando métodos primitivos (C e D).



Fonte: Adaptada de Ding et al. (2008) e Duan et al. (2011).

Após a desmontagem, uma ampla gama de métodos utilizados nas fases de atualização e aperfeiçoamento da cadeia de reciclagem pode ser dividida em **métodos mecânicos (ou chamados físicos)** e **metalúrgicos (ou chamados químicos)**, dependendo da natureza dos processos empregados. A reciclagem mecânica dos resíduos eletrônicos tem sido extensivamente revisada e investigada por diversos pesquisadores (YOKOYAMA e IJI, 1997; ZHANG e FORSSBERG, 1997; MENAD, BJORKMAN e ALLAIN, 1998; ZHANG e FORSSBERG, 1999; CUI e FORSSBERG, 2003; KANG e SCHOENUNG, 2006; VEIT et al., 2006; 36. HUNG-LUNG et al., 2007; LI, XU e ZHOU, 2007; MOHABUTH, HALL e MILES, 2007; CUI e ZHANG, 2008; JIE, YING-SHUN e MAI-XI, 2008; LI et al., 2008; GUO, GUO e XU, 2009; DUAN et al., 2011) embora utilizem muita energia no processo mecânico. Entre os processos mecânicos, a redução de tamanho é uma das operações mais críticas (KOYANAKA et al., 1997), pois para obter o máximo de separação de materiais, os REEE devem ser trituradas em pequenos pedaços, mesmo as partículas finas, geralmente abaixo de 5 ou 10 mm (CUI e FORSSBERG, 2003).

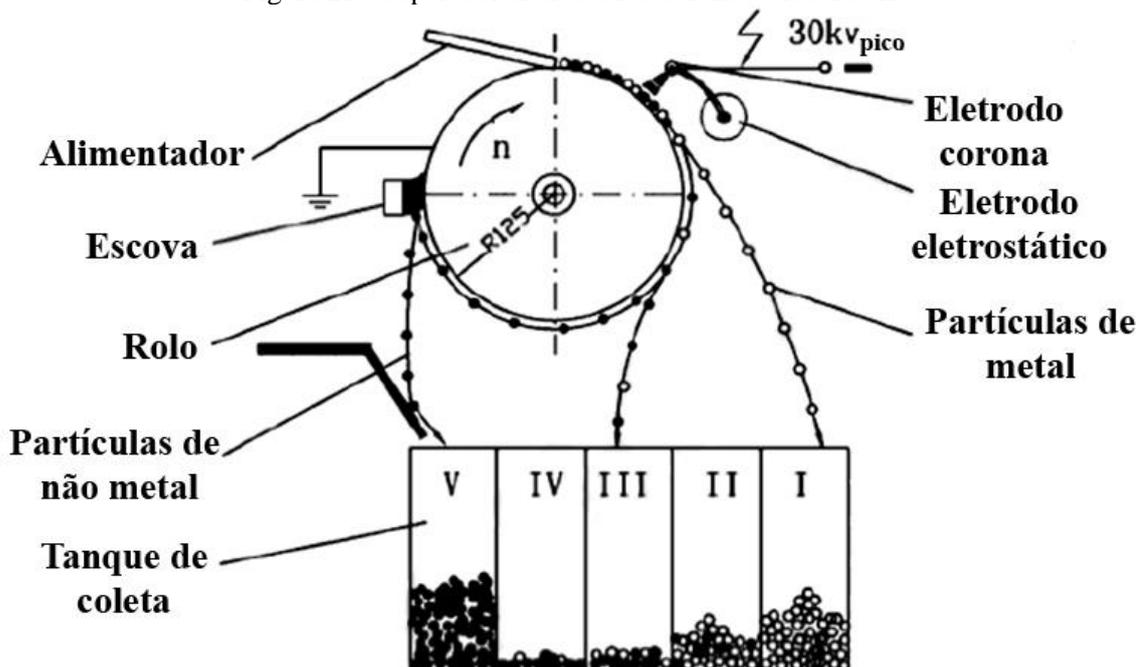
Em processos metalúrgicos, os metais são fundidos (processos pirometalúrgicos) ou dissolvidos (processos hidrometalúrgicos) e são mais ordenados por fazer uso de suas

propriedades químicas/metalúrgicas. O processo pirometalúrgico de transformação, nomeadamente fundição, tornou-se um método tradicional para a recuperação de metais a partir de lixo eletrônico nas últimas duas décadas (KAMINSKY, 1995; CUNLIFFE, JONES e WILLIAMS, 2003; BHASKAR et al., 2004; BREBU et al., 2005; ANTREKOWITSCH et al., 2006; HALL e WILLIAMS, 2007; HUNG-LUNG et al., 2007; CUI e ZHANG, 2008).

No tratamento hidrometalúrgico, os passos principais são o ataque ácido ou a lixiviação cáustica de material sólido. A partir das soluções, os metais de interesse são então isolados e concentrados (ANTREKOWITSCH et al., 2006 e TUNCUK et al., 2012). Tsydenova e Bengtsson (2010) e Fogarasi et al. (2013) argumentam que como principal desvantagem de processos químicos é a geração de novos resíduos perigosos, que são devidos a presença de metais pesados, os retardadores de chama e outras substâncias potencialmente nocivas no lixo eletrônico.

A separação eletrostática corona (CES) para a MFs e as NMFs a partir dos resíduos de PCIs tem sido intensamente estudada por Xu e seus colegas da Shanghai Jiao Tong University, na China (GAO, LI e ZHANG, 2002, LI, XU e ZHOU, 2007; LI et al., 2007; LI et al., 2008; LU et al., 2000; WU, LI e XU, 2008a, b,c e 2009), figura 21 e também por outros autores (RALSTON, 1961; KIEWIET et al., 1978; TAYLOR, 1988; VLAD et al., 1998; DESCALESCU et al., 1999; RAFIROIU et al., 1999; BENDAOU DL, TILMATINEL e MEDLESL, 2004).

Figura 21 - Separador eletrostático corona de laboratório.



Fonte: Adaptada de Li, Xu e Zhou (2007).

A incineração de resíduos eletrônicos por tradicionais incineradores de resíduos sólidos urbanos é perigosa, pois é um catalisador para a formação de dioxinas quando retardadores de chama são incinerados, as PBDD/Fs (DIMITRAKAKIS, 2009). Estima-se que as emissões provenientes da incineração sejam de 36 toneladas por ano de mercúrio e 16 toneladas por ano de cádmio na UE (EUROPEAN COMMISSION, 2003a e 2003b). EUA e UE ainda dependem muito da incineração ou aterro para o destino final de REEE (EUROPA, 2006; FAUVE-BURESI, 2006), porém o aterro levará a poluição secundária causada por metais pesados e a lixiviação de BFRs para as águas subterrâneas.

Taurino, Pozzi e Zanasi (2010) argumenta que tendo em conta os problemas ambientais envolvidos na gestão dos REEE e na reciclagem de plástico pós-consumo destes resíduos há uma necessidade urgente de tecnologias de medição rápida para a identificação dos vários materiais plásticos comerciais e dos vários contaminantes, para melhorar a reciclagem desses resíduos. Entre as técnicas estão a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Para identificar a presença de BFRs e de impurezas diversas, uma combinação de técnicas pode ser utilizada: Fluorescência de Raios-X (XRF), Espectroscopia de Raios-X por Dispersão em Energia (EDX) e Espectroscopia Raman (RS). Estas técnicas são úteis para uma identificação rápida, correta e econômica de um grande volume de plásticos REEE. Para Taurino, Pozzi e Zanasi (2010) e Cui e Forssberg (2003), portanto, é imperativo antes de fornecer e desenvolver métodos eficientes para recuperação e reciclagem de plásticos, em obter informações sobre os componentes que constituem os REEE, bem como o seu conteúdo potencial de substâncias perigosas.

Ainda Cui e Forssberg (2003), a reciclagem dos REEE está apenas no começo. A inovação e planejamento do processo de desmontagem são mais áreas de pesquisa que estão no momento ativas, tendo maior atenção por pesquisadores. Este fato é concordado por Pento (1999), que argumenta que as escolhas de materiais e a seleção de produção e de métodos de montagem têm sido alteradas para facilitar a desmontagem após o uso e para melhorar a capacidade de reuso das partes e dos materiais desmontados. Henstock (1988) ressalta que quando a reciclabilidade se transformar em um fator de decisão de design e manufatura, esta produzirá soluções adequadas.

3.3 Design Sustentável

Nesse capítulo procura-se analisar a importância do design sustentável e sua relação com o desenvolvimento sustentável. No item, 3.3.1., introduz-se o desenvolvimento sustentável, conceituando o design sustentável, falando-se sobre a avaliação do ciclo de vida e sua importância no projeto de produto. Já no item 3.3.2 mostra-se a importância dos materiais existentes e a importância do processo de seleção de materiais para a sustentabilidade. No item 3.3.3. são abordadas as características dos conceitos de design para a montagem e desmontagem, tendo o estudo dos elementos de junção, relatando os tipos de elementos de junção encontrados e a relação com a sustentabilidade.

3.3.1 Desenvolvimento Sustentável

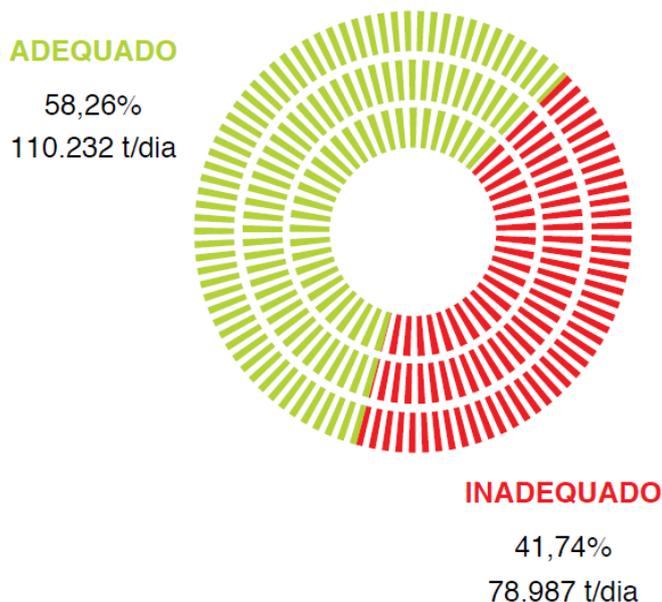
De toda atividade humana, seja ela de que natureza for, resultam sempre materiais diversos. O constante crescimento das populações urbanas, a forte industrialização, a melhoria no poder aquisitivo das pessoas de uma forma geral, contribuem para a aceleração da geração de grandes volumes de resíduos sólidos. Segundo Navarro (2001), a previsão para os próximos 30 anos é de um aumento de 3 bilhões de habitantes, chegando a um total de 9 bilhões de pessoas vivendo na Terra. Esse aumento populacional implica um crescente aumento do uso das reservas naturais do planeta, da produção de bens de consumo e, inevitavelmente, da geração de resíduos sólidos.

Segundo a norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição. Já para Grippi (2001), os resíduos sólidos nada mais são do que matéria-prima fora do lugar. Considera que todos os resíduos sólidos podem ser recuperados ou reutilizados como fonte de matéria-prima para outro fim. A coleta seletiva de lixo é muito recente nas cidades brasileiras. Em 2010, esses programas atingiram apenas 12% da população do país, dos quais equipamentos elétricos e eletrônicos representaram 1,9% do total coletado pelo peso (CEMPRE, 2011 e ARAÚJO et al. 2012)

A Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013) coloca que a geração total de resíduos sólidos urbanos (RSUs) no Brasil em 2013 foi de 76.387.200 toneladas, o que representa um aumento de 4,1%, índice que é superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 3,7%. Conforme indicado na figura 22, o índice de 58,26 % correspondente à destinação final adequada no ano de 2013 e os

41,74% restantes correspondem a 79 mil toneladas diárias, que são encaminhadas para lixões ou aterros controlados, os quais pouco se diferenciam dos lixões, uma vez que ambos não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

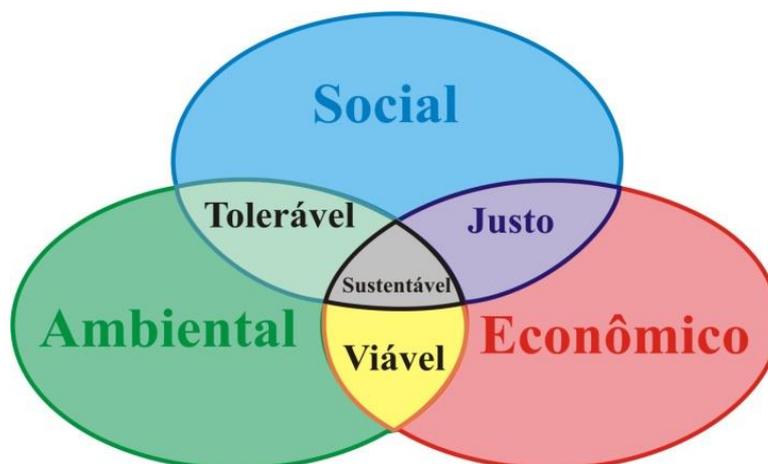
Figura 22 - Destinação final de RSU em 2013 (t/dia).



Fonte: Abrelpe (2013).

Questão cada dia mais discutida na sociedade atual, o desenvolvimento sustentável está em pauta e leva a sociedade em geral na busca de um desenvolvimento ideal, que leve em consideração não apenas o fator econômico em detrimento de outros importantes segmentos da sociedade. O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas necessidades, não focando apenas nas questões ambientais, definição defendida por diversos autores (Capra, 2003). No suporte disto, diversos textos da ONU entre eles o “World Summit Outcome Document” (WCED, 1987), referem o "interdependente e mútuo reforço dos pilares" do desenvolvimento sustentável como o desenvolvimento econômico, o desenvolvimento social e a proteção ambiental. Entre esses três fatores está o desenvolvimento sustentável, conforme esquema ilustrado na figura 23.

Figura 23 - Esquema do desenvolvimento sustentável.



Fonte: Adaptada de Wced (1987).

Relacionando o design e o desenvolvimento sustentável, pode-se detectar uma conexão importante, mostrada por Manzini e Vezzoli (2002), o qual diz que o papel do design pode ser sintetizado como a atividade que, ligando o tecnicamente possível com o ecologicamente necessário, faz nascer novas propostas que sejam social e culturalmente apreciáveis. Nesta situação, a sustentabilidade assume uma perspectiva sistêmica e torna-se uma questão de otimização na utilização dos recursos disponíveis ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Essa otimização poderia ser alcançada com a colaboração de todos os intervenientes no ciclo de vida (designers, fabricantes, fornecedores, clientes, prestadores de serviços), que podem adotar práticas sustentáveis. Designers, sendo responsáveis pela concepção do sistema a partir de seus estágios iniciais, têm um papel relevante nas decisões de sustentabilidade (OWENS, et al., 2007; GARETTI, ROSA E TERZI, 2012).

Manzini e Vezzoli (2002) considera também que o produto deve ser projetado, respeitando, em todas as suas fases, o conceito de ciclo de vida: pré-produção, produção, distribuição, uso e descarte. A partir de tal análise é possível determinar que material é o mais viável ao longo do processo e como o material e a manufatura afetam o ambiente. Assim, uma das tarefas para o desenvolvimento de novos produtos será a de projetar o ciclo de vida total do produto, ou seja, projetar pensando na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Segundo Wenzel, Hauschild e Alting (1997), a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) define ACV como uma técnica para avaliar todas as entradas e saídas de um produto, de um processo ou de um serviço (inventário do ciclo de vida), avaliando os desperdícios associados, a saúde humana e as cargas ecológicas (avaliação do impacto) e interpretando e comunicando os resultados à avaliação (interpretação do ciclo de vida) durante todo o ciclo de vida dos produtos ou dos processos sob a revisão. Para Ljungberg (2007), a avaliação torna mais fácil a

comparação de diferentes materiais, métodos de manufatura, intensidade do serviço, etc., o que é de importância vital quando se desenvolve produtos sustentáveis.

Para Ljungberg (2007), muitos conceitos novos foram criados para chegar ao desenvolvimento de produtos, como também à produção ambientalmente amigável, sendo que alguns exemplos de estratégias comuns para alcançar um design sustentável são mostrados no quadro 2.

Quadro 2 - Conceitos ligados ao desenvolvimento sustentável.

Conceito	Características
Ecodesign	É conhecido também como o Design para o Ambiente (DfE).
Design modular	O reparo e a mudança fáceis dos componentes são importantes. Por exemplo, peças em máquinas copiadoras e em computadores.
Design para a substituição do material	Substituição dos materiais com impacto ambiental elevado por materiais mais sustentáveis.
Design para a redução de desperdício na fonte	Reduz a quantidade de material em termos de produto e embalagem.
Design para a Desmontagem (DfD)	Um produto deve ser fácil de desmontar, como, snap-fits, fechamentos mecânicos, etc., a fim de reciclar os materiais.
Design para a Reciclagem (DfR)	DfR foca na máxima habilidade de reciclagem. Materiais diferentes não devem ser misturados se não for necessário e as peças diferentes devem ser etiquetadas para facilitar no momento da separação, sendo projetado para desmontagem fácil.
Design para a disposição	Assegura que as peças ou os materiais não-recicláveis possam ser dispostos de maneira ecológica.
Design para a reusabilidade	Foca na possibilidade de reuso de diferentes componentes em um produto. As peças poderiam ser limpas e reusadas.
Design para o Serviço (DfS)	O Design de um produto é feito a fim de obter o fácil serviço pós-venda.
Design para redução das substâncias	As substâncias indesejáveis, que são usadas durante o ciclo de vida dos produtos, devem ser minimizadas.
Design para recuperar energia	O Design é feito com os materiais apropriados para queimar com um mínimo de emissões tóxicas ou prejudiciais.
Design para a extensão da vida	Reduzir os resíduos por meio do prolongamento da vida dos componentes ou produtos é o alvo desta estratégia.

Fonte: Quadro adaptado de Ljungberg (2007).

3.3.2. Materiais e sustentabilidade

Segundo Ljungberg (2007), estima-se que há mais de 100.000 tipos de diferentes materiais comerciais no mercado, incluindo todas as variantes na composição dos materiais, nas misturas, etc. Os materiais podem ser divididos em seis grupos: metais, cerâmicos, polímeros sintéticos, materiais orgânicos naturais, materiais inorgânicos naturais e compósitos. No quadro 3 são apresentados os seis típicos grupos de materiais para um produto em relação à sustentabilidade. Para o autor (2007), um material pode ser sustentável para o produto durante o uso e reciclagem, enquanto a sua extração pode conduzir a sérios impactos.

Os compósitos devem ser usados com considerações especiais, além de levar em conta as possibilidades de como separar os materiais específicos. Os polímeros baseados no petróleo devem ser empregados com cuidado se não forem possíveis de reciclar e refundir, ainda mais com o crescente emprego destes materiais em uma vasta gama de aplicações (MANZINI, 1993 e BEALL, 2000).

Quadro 3 - Os seis típicos grupos de materiais para o produto, além de exemplos e aspectos para o desenvolvimento sustentável de produtos.

Grupo de Materiais	Exemplo de Materiais	Típicas vantagens	Típicas desvantagens	Classificação de sustentabilidade *
Metais	-Aço (Fe + C) -Alumínio -Bronze (Ex: Cu + Sn)	- Durável e resistente. - Geralmente formado plasticamente. - Geralmente barato.	- Alto custo para usinagem. - Enormemente sensível a corrosão.	Fácil reciclagem (re-fundição). 2-3
Cerâmicos	Materiais sintéticos como: -Porcelana (argila). - Vidro mineral. Al ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄ , SiC, etc.	- Não tóxico. - Leve. - Duro e durável. - Resistente a corrosão. - Resistente a alta temperatura.	- Frágil. - Alto custo para usinagem quando queimado. - Não suscetível para tensão em carga.	- Fácil de depositar (não tóxico). - Possível, mas caro para refundir. 2-3
Polímeros Sintéticos	- Termoplásticos (Ex: PE, PS, PC, PP). - Dois polímeros como componentes (Ex: Epoxy); - Borracha (Ex: Isopreno).	- Não tóxico. - Leve. - Barato e fácil de conformar. - Geralmente fácil de reciclar (Ex: por refusão ou queima).	- Algumas vezes muito tóxico quando queimado. - Sensível a altas temperaturas.	- Tipicamente não renovável. - Geralmente fácil de re-fundir ou queimar. 1-3
Materiais Naturais Orgânicos	- Madeira. - Algodão. - Seda.	- Renovável. - Leve. - Barato e fácil de conformar/produção.	- Decomposição facilmente. - Não durável. - Tóxico quando impregnado.	- Reciclável, por exemplo, queimando. - Renovável. 2-3
Materiais Naturais Inorgânicos	- Pedra. - Minerais.	- Veja Cerâmicos acima.	- Frágil. - Alto custo para usinagem. - Não suscetível para tensão em carga.	- Veja Cerâmicos acima. 3
Compósitos	- Mistura de Materiais. Ex: PS + fibra de vidro, Cu+W-fibras, Borracha + Fibras Têxteis, Asfalto (Petróleo + Pedra), Compósitos de Polímero de Madeira (WPC).	- Uso otimizado dos materiais. - Geralmente muito forte e lev	- Geralmente caros para produzir. - Propriedades muito variadas para vários compósitos.	- Tipicamente baixa sustentabilidade devido aos problemas de separação dos materiais misturados. 1-2

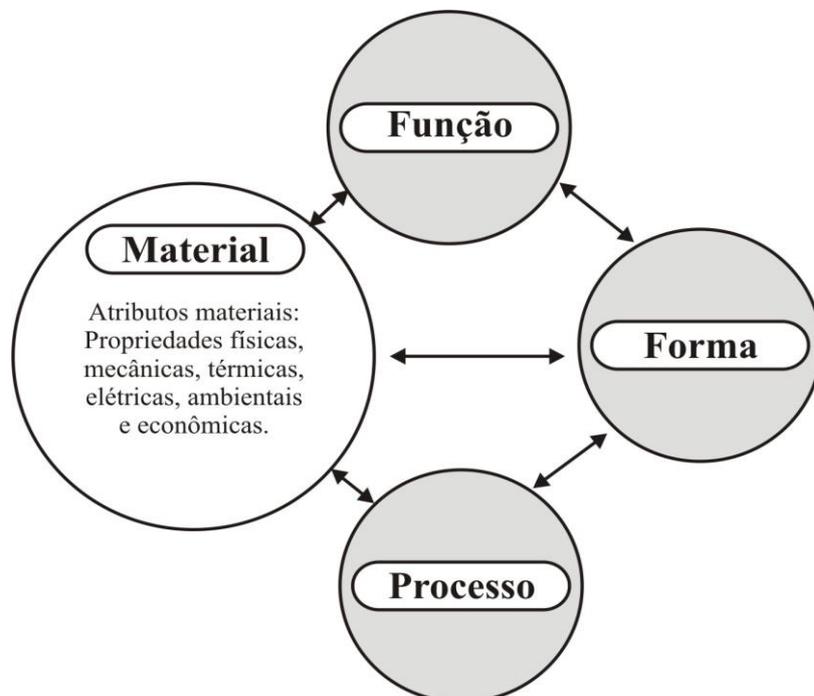
Note que as vantagens/desvantagens e a "sustentabilidade" podem mudar devido ao tipo específico do material e os exemplos não são válidos para todos os materiais de um certo grupo de materiais.

* A sustentabilidade é estimada de uma escala de 1 a 3, onde 3 indica a mais alta (ou melhor) sustentabilidade e 1 a mais baixa.

Fonte: Adaptado de Ljungberg (2007).

Ljungberg (2007) aponta a sustentabilidade de um produto como dependente do material ou dos materiais usados no seu desenvolvimento. Nesse sentido, a seleção dos materiais para um determinado produto é de importância vital, quando este determina o uso dos recursos naturais como a quantidade de energia empregada para a fabricação e o uso do produto. Segundo Baxter (2011), o designer deve ter condições de especificar um projeto, detalhando o mesmo em cima dos resultados obtidos através das configurações, especificando os materiais e processos empregados ao projeto. Ashby (1999), na figura 22, mostra que a seleção do material depende basicamente de três critérios que estão interagindo: a função, o processo e a forma.

Figura 24 - A seleção do material é determinada pela função. A forma às vezes influencia a seleção



Fonte: Ashby (1999).

Na concepção de Ljungberg (2003), é muito importante observar que raramente existe apenas um material considerado o melhor para um determinado produto e a disponibilidade dos materiais no futuro deve também ser considerada. Para lidar com a falta de determinados materiais no futuro ou para impedir a ascensão futura do preço, os seguintes três pontos devem ser levados em conta:

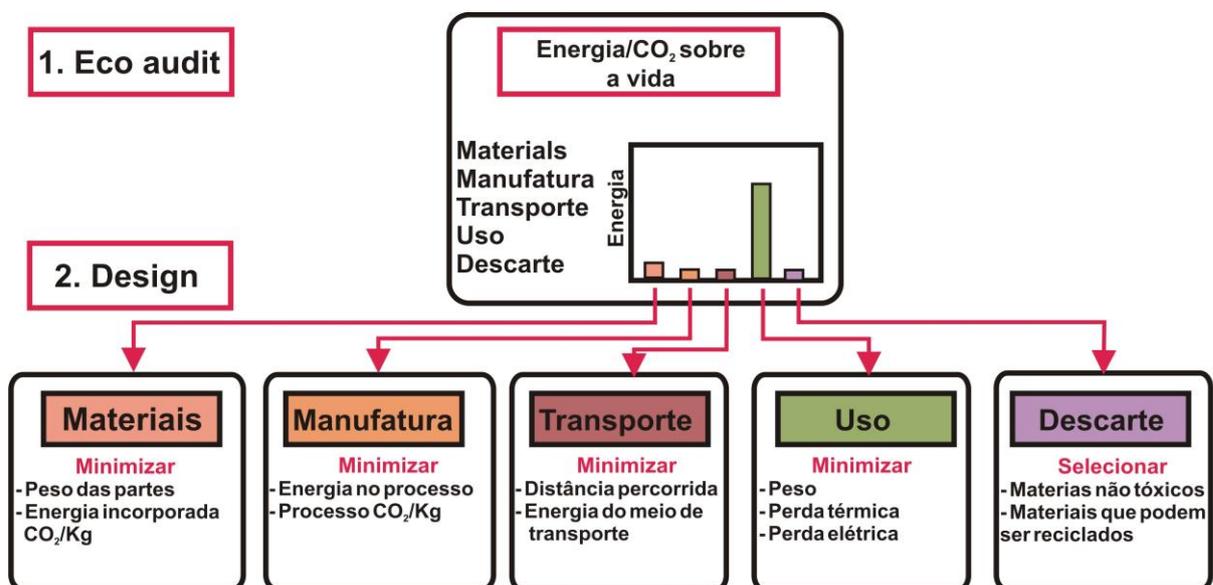
a. Projeto de materiais eficientes. Em muitos produtos a superfície é o interesse. Em vez de empregar grande quantidade de materiais, pode ser possível usar camadas finas do material requerido.

b. Substituições para os materiais compósitos. O uso de um material compósito pode reduzir a quantidade de um material caro, porém, por outro lado, os usos de materiais compósitos podem ser prejudiciais ao meio ambiente, principalmente na questão da separação de materiais.

c. Design para a reciclagem. Reciclagem de materiais caros é uma atividade, que certamente será muito importante no futuro. O desenvolvimento de materiais novos é feito principalmente para atender uma necessidade. Dessa forma, os materiais inspiraram inovações, isto é, o desenvolvimento de produtos novos originados de materiais novos é uma demanda interessante para o futuro.

Na busca de evoluir nas técnicas de seleção de materiais e suas interpretações ou comparações entre diversos existentes, Ashby (1999) criou os “mapas de propriedades”, os quais deram origem ao software de Seleção de Materiais, nomeado de Cambridge Engineering Selector ® - CES, com o apoio dos desenvolvedores da Granta Design ® (CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR, 2014). Este programa possibilita realizar o cruzamento de informações dotadas de propriedades distintas, em que, a partir de um banco de dados pré-definido, faz-se a triagem dos materiais que coincidem com os requisitos solicitados em etapas progressivas de cruzamento, eliminando os materiais que não apresentam as características requeridas pelo projetista. Na versão do software de 2011, outras aplicações foram introduzidas, uma delas o Eco Audit Tool permitindo a comparação de materiais contabilizando todas as etapas do ciclo de vida de um produto (figura 25).

Figura 25 - Software CES Edupack 2014 integrando a ferramenta de análise de ciclo de vida.



Fonte: Adaptada de Cambridge Engineering Selector (2014).

Ashby (2012) considera que o grande desafio está em pensar o uso e a seleção de materiais no sentido de minimizar impactos ambientais e ao mesmo tempo evitar o natural conflito com a necessidade cada vez maior de minimizar custos. Rahimifard, Abu Bakar e Williams (2009) argumenta que as aplicações atuais para a reciclagem de REEE (resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos) são muitas vezes baseadas em conhecimento limitado e não podem lidar com a complexa gama de materiais e produtos destes resíduos. Uma abordagem baseada no conhecimento, tem sido utilizada pelo autor (2009) para investigar a realização de um planejador do processo de reciclagem que visa determinar as opções mais sustentáveis para EoL (final da vida útil) de REEE. Estes estudos mostraram uma melhora de 20-30% sobre o desempenho econômico e ambiental e poderia ser conseguido através da adoção de uma abordagem sistemática para o planejamento de processos de reciclagem.

Devido a requisitos importantes para informação e processamento de conhecimento, foi desenvolvido um sistema chamado CARPP - Planejamento do Processo de Reciclagem com Auxílio do Computador (*Computer Aided Recycling Process Planning*) para auxiliar os projetistas, fabricantes e instalações de reciclagem na determinação dos planos de processos de reciclagem de EoL sob medida. Atualmente, qualquer novo tipo de produto se chegar a uma instalação de recuperação é avaliado de forma semelhante dentro de uma oficina para definir como extrair valiosos materiais e componentes, com pouca consideração ao impacto ambiental das atividades de reciclagem.

Kuo (2010) desenvolveu uma plataforma colaborativa de design que é construída e estruturada com todas as informações necessárias a partir dos softwares Design Assistido por Computador (CAD), do Planejamento de Recursos Empresariais (ERP), e do Gerenciamento do Ciclo de Vida do produto (PLM). Através desta plataforma, os fornecedores são obrigados a fornecer informações sobre o componente para permitir que o design do fabricante para a desmontagem e análise de reciclagem. Os resultados demonstram que os designers podem obter informações sobre desmontagem e reciclagem através do modelo, de modo que as alterações desejáveis podem ser feitas nas primeiras fases do design.

Ljungberg (2007) observa que a seleção dos materiais hoje deve ser dirigida à futura habilidade de reciclar um produto a fim de encontrar-se com as demandas do futuro. Importante destacar este fato, já que as soldas de base Pb foram proibidas para diminuir sua concentração e evitar danos na natureza, entretanto, conforme muitas análises (apresentadas no capítulo anterior) não se chegou a uma solda do tipo *Lead-Free* definitiva, mostrando que muitas são ainda mais prejudiciais ao meio ambiente, ou seja, o problema ainda existe.

3.3.3. Design para a montagem e desmontagem (DfA e DfD)

Em relação a reciclagem que hoje é um importante tema (PUENTE, 2001), a desmontagem dos produtos é importante para conseguir uma correta reciclagem, pois para isto é necessário separar os diferentes componentes. Conforme alguns autores (DIETER, 1997; VEERAKAMOLMAL e GUPTA, 2000; WILLIAMS e SHU, 2001; DUFLOU et al., 2008), se o material dever ser recuperado e reusado no fim da vida útil de um produto, o Design para a Desmontagem (DfD - *Design for Disassembly*) pode ser a chave para uma recuperação economicamente praticável. Fato concordado por Kindlein et al. (2002) que relata que o DfD uma das condições necessárias para atingir a meta da sustentabilidade, pois facilita a desmontagem e por fim a reutilização, o reprocessamento e a reciclagem. Elementos de junção eficazes tendem a facilitar essa desmontagem, tornando mais atrativa sua prática, principalmente em centros de triagem, que são os maiores envolvidos no destino e separação dos componentes de um produto.

Segundo Silva et al. (2006), estes elementos são os sistemas que unem as diferentes partes de um produto, sendo o caminho correto para o desenvolvimento de ecoprodutos passa pela escolha de elementos de união que proporcionem uma relação direta com o DfA - Design para a Montagem (*Design for Assembly*) que visa a facilitar o processo construtivo do produto e com o DfS - Design para o Serviço (*Design for Service*), cuja finalidade é a sustentabilidade durante o período de vida útil do produto.

Ljungberg (2003) considera também que o DfS é importante para aqueles produtos que necessitam serviço de tempos em tempos ou o reparo. É importante evitar a ligação “permanente”, como adesivos, solventes e processos de derretimento, que podem impedir o fácil serviço, nesse caso as dobradiças, as braçadeiras e os parafusos são usados preferencialmente. O máximo aproximadamente de 5 montagens e desmontagem é recomendado na maioria dos casos em produtos.

Conforme Dieter (1997), uma junção pode ser provisória ou permanente. A seleção de um design apropriado para unir as peças é baseada em uma compreensão simultânea de diversas considerações relacionadas ao produto e ao processo de união. Para Boothroyd e Alting (1992), considerando todos os estágios da realização de um produto, a montagem constitui uma parte considerável do custo total, excedendo freqüentemente 50%. Isto tende a levar os projetistas a desenvolverem maneiras mais eficientes de realizar a montagem de um produto, por exemplo, utilizando-se da biônica para criação de novas possibilidades (KINDLEIN et al., 2007). Os 13 termos específicos de elementos pesquisados pelo LdSM, com o detalhamento do princípio de cada um está descrito no quadro 4.

Quadro 4 - Guia de elementos de junção.

Guia de Elementos de Junção	
Adesão	Este princípio de junção requer o uso de material que permita o processo de colagem. O problema deste meio de união é a geração de impurezas e a contaminação dos materiais, impossibilitando a reciclagem/reuso dos mesmos. Ex: Colagem, etc.
Amarração	Os elementos são unidos por meio de fios ou fitas que são enrolados, envolvendo ou transpassando as superfícies a serem unidas. A união é limpa e de fácil separação, não havendo contaminação dos materiais. Ex: Costura, Nó, Atar, etc.
Atrito	Consiste em fixar um elemento a outro somente com a força resultante do atrito entre duas superfícies. Ex: Fricção, etc.
Deformação	Este princípio está relacionado com a mudança na forma da estrutura original, pois o material é deformado plasticamente para provocar a fixação das partes. É um tipo de fixação rígida, na maioria dos casos não permite graus de liberdade. Ex: Distorção, Dobra, Prensagem, Forjamento, etc.
Engate	São uniões feitas por intermédio do acoplamento de uma peça em outra provocando a fixação entre elas. A função maior deste princípio de junção é a de permitir uma maior facilidade para a separação dos componentes do engate. Ex: Acoplador, Encaixe, Gancho, etc.
Interferência	Para que ocorra o princípio da interferência são necessárias diferenças de dimensões nas áreas de junção. A peça externa é chamada de "furo" e a peça interna é chamada de "eixo"; a dimensão do eixo deve ser maior do que a dimensão do furo antes da montagem. Ex: Pressão, etc.
Magnetismo	Este princípio tem a característica de fixar por meio da atração magnética. Existem os ímãs naturais e os induzidos, que podem ser controlados, proporcionando uma união limpa que não geram resíduos nem contamina os materiais. Ex: Imantar, Indução, Atração, Magnetismo, Eletroímã, etc.
Memória	Ocorre por efeito da rigidez de um material, isto é, quando a junção se realiza por meio da pressão exercida sobre um sistema, esta pressão se dá por intermédio da tendência que o material tem em voltar a sua forma original (memória). Ex: Mola, Arruela de Pressão, Anel Elástico, etc.
Preenchimento	Neste princípio ocorre a união mediante a ocupação dos espaços ao redor do produto a ser fixado. Ex: Encher, Ocupar, Obturar, etc.
Rosqueamento	O rosqueamento consiste em fixar as partes por intermédio de espiral que chamamos de rosca. Devem existir normalmente duas peças com rosca para que possamos dar aperto, a peça externa é conhecida como porca e a interna chamada de parafuso. É um método de junção não permanente, resistente à tração. Possui um sentido de aperto (torque). Ex: Rosca, parafuso, porca, etc.
Sucção	Este princípio produz a junção por retirada do ar existente entre as partes, isto faz com que se crie vácuo, permitindo assim a união das superfícies. Pode ser um tipo de junção permanente ou não. Ex: Admissão, aspiração, ventosa, vácuo, etc.
Travamento	Com este princípio provoca-se o bloqueio do movimento em uma ou mais direções. É colocado um anteparo para que a peça não se movimente, limitando os graus de liberdade. Ex: Calço, chaveta, etc.
Fusão	O princípio da fusão consiste em unir peças por meio da solidificação de um ou mais materiais; é um tipo de união permanente, não permitindo grau de liberdade. A fusão de um material como elemento de junção dificulta a desmontagem e/ou separação dos materiais do produto. Ex: Fundição, derretimento, <u>soldagem</u> , etc.

Fonte: Adaptada de Kindlein et al. (2002).

No quadro 4, nota-se que o princípio de junção utilizado nas placas de circuito impresso, que é o foco do trabalho, é a fusão (termo específico), utilizado pela soldagem, sendo um dos principais elementos de junção encontrados com maiores problemas em produtos eletrônicos, pois sabe-se a dificuldade da separação de componentes com este tipo de união permanente.

Kindlein, Platcheck e Cândido (2003) alertam que, porém, que com a tendência atual de miniaturização dos produtos e maior exigência do consumidor em relação ao acabamento e a sua responsabilidade ambiental, tornou-se notória a constante evolução destas formas de união para elementos mais práticos, de rápida montagem e desmontagem, e que respondam com lucro às indústrias, por meio da redução dos custos industriais. Para Duflou et al. (2008) é pouco provável que as desmontagens de muitos produtos pequenos sejam economicamente viáveis. Segundo Carrell et al. (2011), atualmente, os benefícios de desmontagem (ou seja, recuperação de materiais e de remoção de materiais perigosos) desses pequenos produtos não superam o peso do processo de desmontagem atual, não sendo assim desmontados no final de sua vida. Para Duflou et al. (2008), dependendo da extensão de desmontagem, a desmontagem pode ser destrutiva ou não destrutiva e esta última pode ser classificada em duas categorias:

- Desmontagem total: O produto inteiro é desmontado em seus componentes constituintes. Isto pode não ser economicamente viável devido à imposição de restrições externas, como o tempo, fatores econômicos e presença de materiais perigosos.
- Desmontagem seletiva: desmontagem seletiva é o desmantelamento reversível de produtos complexos em menos subconjuntos complexos ou peças únicas (ASSAY e LAMBERT, 1999). Ela envolve a remoção sistemática de partes constituintes desejáveis a partir de um conjunto, assegurando que não há prejuízo de peças devido ao processo (BRENNAN, GUPTA e TALEB, 1997).

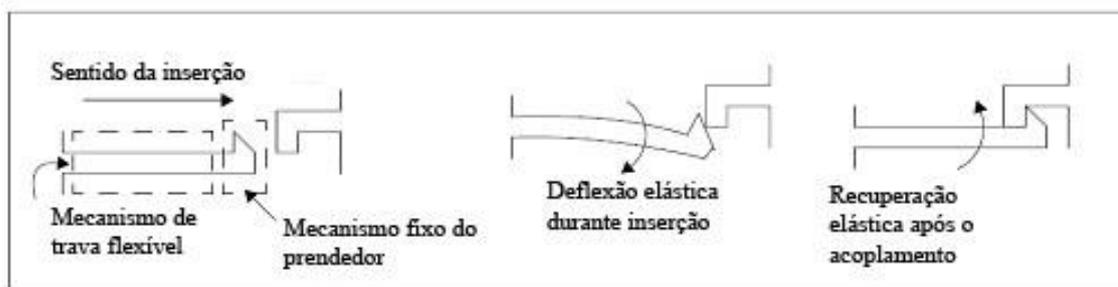
Segundo Boothroyd, Dewhurst e Knight (2010), para a quebra de paradigmas na área de projeção industrial é de suma importância este estudo dos elementos de junção e dos sistemas de fixação entre os componentes de um produto, facilitando a desmontagem do produto no fim de sua vida útil.

Sistemas de fixação diferenciados: *Snap-fit*

Um tipo de elemento de junção que está tendo grandes aplicações em produtos e é um exemplo positivo na questão da sustentabilidade é o snap-fit (HONEYWELL INTERNATIONAL, 2002). Para Genc, Messler e Gabriele (1998) e o guia Snap-fit da Bayer

Materials Science (2013), estes submetem-se à deflexão elástica para permitir o acoplamento durante o processo de inserção e à recuperação elástica para realizar o acessório completo (ou travar) para fornecer a retenção. O acoplamento completo e a recuperação sucessiva para causar o travamento são acompanhados por uma pressão audível ou tátil, “*snap*”, daí derivando seu nome (figura 26).

Figura 26 - Processo de acoplamento do Snap-fit.



Fonte: Adaptada de Genc, Messler e Gabriele (1998).

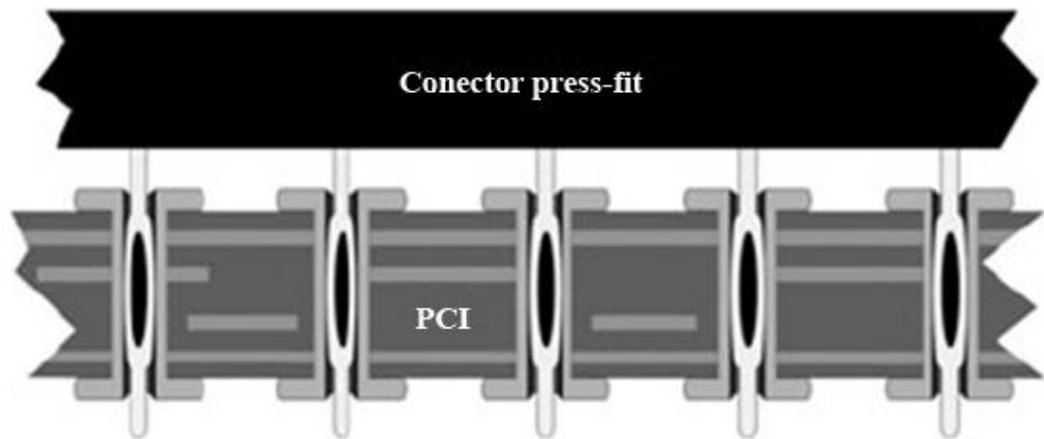
Este tipo de fixação não se restringe às peças plásticas, mas são eficazes também em aplicações metal-metal e plástico-metal. Ele vem sendo estudado e desenvolvido suas aplicações por projetistas, sendo um mecanismo integral de travamento para unir uma parte à outra, não necessitando de peças adicionais, materiais ou ferramentas para realizar a função de união (JAARSMA, 2001; BONENBERGER, 2005; BAYER MATERIALSCIENCE, 2013).

Para Spahr (1991) e apoiado por Tres (2006), entre as razões para usar o snap-fit estão: a redução dos custos de montagem; projetos com facilidade de montagem e desmontagem; substituir os parafusos, as porcas, e as arruelas; são moldados como um componente integral de uma parte de plástico; nenhuma solda ou adesivo são requeridos; adicionalmente, se projetados corretamente, podem ser desmontados e remontados diversas vezes sem nenhum problema.

Sistemas de fixação diferenciados: *Press-fit*

Para Coombs (2008), os componentes eletrônicos estão ligados a placas de circuito impresso em quatro formas, sendo uma destas o press-fit. É um encaixe, que se baseia na deformação mecânica do cabo de conexão em furos para fazer contato elétrico, figura 27.

Figura 27 - Método de fixação press-fit para PCIs.



Fonte: Adaptada de Coombs (2008).

Para Coombs (2008), press-fit é mais fácil e mais confiável do que solda, também necessita menor energia e menor uso de materiais, sendo benéfica para o ambiente. Os furos são banhados na PCI e como o pino de ligação é forçado a entrar na placa, há ligeira deformação no pino press-fit e na borda dos furos, tendo como resultado um contato elétrico e mecanicamente estável. Deve ser evitado quando o conjunto será submetido a ciclos térmicos ou a ambientes agressivos durante a fabricação, montagem e transporte (CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR, 2014).

3.4. Placas de circuito impresso (propriedades e pré-requisitos de projeto)

Nesta parte do trabalho buscou-se conhecer as propriedades requeridas para a fixação e funcionamento adequado dos elementos de junção para a placa de circuito impresso, sendo estes requisitos projetuais. São apresentados os requisitos de projeto necessários, que são a condutividade elétrica (item 3.4.1.), fadiga térmica-mecânica (item 3.4.2.), resistência mecânica e vibração (item 3.4.3.) e corrosão e umidade (3.4.4.). O elemento de junção precisa manter fixos os componentes tanto na temperatura ambiente como em variações de temperatura e ter condutividade elétrica com a menor perda ôhmica possível, evitando o choque mecânico e tendo confiabilidade de ciclos térmicos das conexões, tendo a resistência à corrosão necessária para seu funcionamento. E no último item, 3.4.5., apresentam-se as técnicas empregadas para caracterização das placas, com algumas normas técnicas existentes.

3.4.1. Condutividade elétrica

Para Halliday, Resnick e Walker (2012), os materiais podem ser classificados de acordo com a facilidade com a qual as cargas elétricas se movem no seu interior, sendo que nos materiais chamados de condutores as cargas elétricas se movem com facilidade. Conforme Hwang (1996), por definição, a condutividade elétrica é o resultado do movimento de elétrons eletricamente carregados ou íons de um local para outro com um campo elétrico. A condutividade eletrônica é predominante principalmente nos metais, enquanto a condutividade iônica é responsável pela condutividade de óxidos e materiais não metálicos. Para os metais onde a condutividade elétrica é essencialmente atribuída ao movimento de elétrons, a resistividade aumenta com o aumento da temperatura. Em contraste, a resistividade elétrica diminui (aumenta a condutividade elétrica) com o aumento da temperatura para os não-metais, onde predomina a condução iônica, como no caso dos óxidos e semicondutores. Sendo um dispositivo eletrônico, é mandatório que seja ótimo condutor elétrico uma vez que seu funcionamento é baseado na passagem de elétrons entre os inúmeros componentes que fazem parte da placa.

Conforme o software CES Edupack (CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR, 2014), a resistência ôhmica dos metais aumenta quando sua temperatura aumenta, crescendo também com o aumento do teor de impurezas e com a deformação plástica. Seu cálculo é dado pela Lei de Ohm, e, segundo o Sistema Internacional de Unidades (SI), é medida em ohms.

Para Askeland (2001), em componentes projetados para conduzir energia elétrica, é importante minimizar as perdas de energia. O material então precisa conduzir uma corrente elétrica com facilidade e ter uma perda ôhmica de corrente mínima. A perda ôhmica está associada à resistência ôhmica da liga metálica (baixa condutividade elétrica - alta queda ôhmica). Por princípio, um bom condutor deverá ter a mais baixa resistência ôhmica possível, para se reduzir ao máximo as perdas ao longo do caminho. Para isso, o metal empregado deverá possuir a maior condutividade possível. Na tabela 6, Hwang (1996) mostra a condutividade elétrica de alguns metais utilizadas em ligas de solda atualmente.

Tabela 6 - Condutividade elétrica de elementos de solda e ligas.

Material	Condutividade $10^4 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$	
	0 °C (32°F)	22 °C (71.6°F)
Ag	66.7	62.1
Cu	64.5	58.8
Au	49.0	45.5
Al	40.0	36.5
Zn	18.1	16.9
Ni	16.0	14.3
Sn	10.0	9.1
Pb	5.2	4.8
Bi	1.0	0.8
63Sn/37Pb		6.9
60Sn/40Pb		6.9
50Sn/50Pb		6.4
40Sn/60Pb		5.9
30Sn/70Pb		5.5
20Sn/80Pb		5.2
10Sn/90Pb		4.9
5Sn/95Pb		4.8
62Sn/36Pb2Ag		6.8
1Sn/97.5Pb/1.5Ag		3.5
42Sn/58Bi		2.6
96.5Sn/3.5Ag		9.4
95Sn/5Sb		7.0
48Sn/52In		6.8
70Sn/18Pb/12In		7.2
40Pb/70In		5.2
40Pb/60In		4.1
92.5Pb/2.5Ag/5In		3.2
90Pb/5Ag/5In		3.3

Fonte: Adaptada de Hwang (1996).

3.4.2. Fadiga térmica-mecânica

A placa de circuito impresso está presente em produtos elétricos e eletrônicos que são fontes de calor e por isso estão em constante aquecimento e resfriamento. Além de evitar aquecer demais a placa para não danificar os componentes eletrônicos, há o problema com os sistemas de soldagem atuais utilizando ligas *Lead-free* que precisam ser aquecidos em uma temperatura maior para soldagem e desoldagem, podendo danificar alguns componentes Guo (GUO, 2007).

A definição de fadiga, de modo geral, pela norma ASTM E1823-96 (1996) é o processo de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a flutuações de tensões e deformações que pode culminar em trincas ou completa fratura depois de um número suficiente de flutuações. Já segundo Meyers e Chawla (1999) a fadiga é definida como um processo de degradação das propriedades mecânicas em

direção a fratura do material ou componente submetido a um carregamento alternado e cíclico.

E por fadiga térmica, Suresh (1998) define a resistência à fadiga como a capacidade do material resistir às condições de carregamento alternados, independente da sua natureza, sejam forças, pressões ou variação de temperatura. Alvarenga (2006) considera a fadiga térmica um modo de falha importante que ocorre em materiais e equipamentos submetidos a mudanças bruscas e cíclicas de temperatura. E de acordo com Zuchowski (2000), a fadiga térmica é produzida pelas alterações cíclicas e constantes de temperatura resultam numa variação de energia interna que produzem alterações dimensionais e nas propriedades físicas do material além de acelerar o surgimento de trincas.

Askeland (2001) considera tensões térmicas como tipo de tensões introduzidas em um material devido a diferenças nas dilatações ou contrações que ocorrem durante uma mudança de temperatura. Assim, para um elemento de junção é importante evitar o choque mecânico e ter a confiabilidade de ciclos térmicos de conexões de solda. A fadiga térmica é provocada por solicitações térmicas cíclicas (variações de temperatura), tais como resfriamentos ou aquecimentos bruscos repetitivos ao longo da vida do equipamento. Este tipo de fadiga provoca o aparecimento de muitas trincas internas que dão origem a outro dano ao material. O comportamento em fadiga dos componentes eletrônicos é um fator importante para entender as falhas produzidas nas uniões de solda e para aumentar a confiabilidade dos produtos eletrônicos (BOULAAJAJ, CABRERA e PRADO, 2008).

A fadiga térmica provoca tensões e deformações em componentes metálicos por causa de flutuações cíclicas de temperatura, causando danos semelhantes a choques térmicos repetitivos. E este é um dos mecanismos de envelhecimento que gradualmente reduz a vida útil dos componentes, modificando suas propriedades e levando a abertura de trincas. A fadiga térmica não deve ser confundida com o choque térmico. Na fadiga o dano aparece após inúmeros ciclos de variações bruscas de temperatura, enquanto no choque térmico a falha pode ocorrer de uma só vez. No processo de produção das placas, atualmente há o processo de refluxo (*reflow*) da solda, ou seja, ela é submetida a uma re-solda para aplicação dos componentes, tendo esta variação de temperaturas já no processo de produção. Assim, no processo de produção colocam-se máscaras nos componentes como barreira térmica para proteger estes da variação de temperatura. Alguns dos testes aplicados pela indústria eletrônica são os testes de ciclagem térmica e de choque térmico, explicados no item 3.4.5.

Para Coombs (2008), uma consideração importante na concepção de produtos eletrônicos é garantir que os componentes elétricos operem nas temperaturas que vão manter

ao longo da vida e serem confiáveis. A capacidade de carga atual das trilhas da placa de circuito impresso é uma parte da gestão da temperatura da placa, o que impacta diretamente os componentes. Ainda para o autor (2008), a condutividade térmica do material ou dos materiais utilizados nas PCIs deve ser alta para evitar um superaquecimento do mesmo e dessa maneira interferindo no funcionamento da placa. A carcaça polimérica usada deve resistir às temperaturas atingidas em serviço (temperatura mínima e máxima) para manter a integridade do dispositivo e para garantir uma durabilidade a ela.

3.4.3. Resistência mecânica e vibração

Segundo Hibbeler (2010), a resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por métodos experimentais. Já para Melconian (2007), a resistência estuda as relações entre as cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior do corpo. Beer et al. (2013) salienta ser importante como o material selecionado se comportará sob um carregamento. Os elementos de junção precisam manter fixos os componentes tanto na temperatura ambiente como em altas temperaturas, para que no uso prático de um produto eletrônico, ocorrendo solicitações necessárias, como quedas, a placa não se danificasse e continuasse em operação.

Para isso, é importante entender a fluência do material (“*creep*”), pois é o fenômeno pelo qual metais e ligas tendem a sofrer deformações plásticas quando submetidos por longos períodos a tensões constantes, porém inferiores ao limite de resistência normal do material. Pode ser ativada pela temperatura (sua ocorrência é comum a temperaturas elevadas), e se manifesta com o passar do tempo. Esta deformação produz fissuras no material e pode levar à ruptura. À temperatura ambiente, a deformação das estruturas metálicas é muito pequena, a não ser que a carga adquira uma tal intensidade que se aproxime da tensão de ruptura (CIMM, 2015). Ashby and Jones (2005) considera a fluência como a deformação lenta e contínua com o tempo: a tensão, em vez de depender apenas da tensão, depende da temperatura e do tempo.

Conforme Khandpur (2005) e Coombs (2008), choques, vibração e flexão podem ser algumas das preocupações de confiabilidade para as PCIs, geralmente sendo problemas encontrados em placas maiores. Para Coombs (2008), vibração é um termo que descreve a oscilação de um sistema mecânico, e é definido pelas frequências de oscilação, ressonâncias e a amplitude. Já choque mecânico pode ser definido como um pulso, passo, ou vibração transitória, em que a excitação é não periódica.

Coombs (2008) salienta que a maioria dos choques de equipamentos eletrônicos são devidos às quedas durante o manuseio ou transporte. PCIs que são submetidas a longos períodos de vibração, muitas vezes, sofrem de falha por fadiga, que pode ocorrer sob a forma de fios quebrados ou patas de componentes, juntas de solda fraturadas, quebra de linhas condutivas ou quebra de contatos nos conectores elétricos. Geralmente, choque resulta ou em falha instantânea ou funciona como um concentrador de tensões, reduzindo a força efetiva da conexão ou leva para o fracasso subsequente devido a um choque (s) adicional e vibração.

Para Zeng et al. (2013), a placa necessita de uma certa tenacidade à fratura, pois pode ocorrer um choque, um impacto e ela deve resistir a esse esforço. Conforme Coombs (2008), os requisitos de projeto para choques e vibrações são muitos e variados, e são muito dependentes da aplicação. Algumas fontes de choques e vibrações são muito óbvias, enquanto outras são muito sutis. E para Khandpur (2005), os efeitos de vibração e deformação podem ser minimizados, através de elementos para apertar ou uso de cintas para adequadamente segurar os componentes no lugar. O design de PCI, que será sujeito a vibrações quando em serviço requer uma consideração especial para o layout da placa (IPC-2221A, 1998). O teste de vibração para estas condições é explicado no ítem 3.4.5.

3.4.4. Corrosão e umidade

Gentil (2011, p. 1) define corrosão como a “deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos”. Esta deterioração constantemente faz com que os materiais deixem de ter durabilidade e desempenho para satisfazer os fins a que foram projetados. A maioria dos metais e ligas está sujeita à oxidação ou corrosão em maior ou em menor grau, em uma ampla variedade de ambientes.

Já para Vaz, Acciari e Codaro (2011), a corrosão pode ser explicada como a deterioração do material metálico que se inicia na sua superfície por ação química ou eletroquímica de um meio oxidante, agravada geralmente por esforços mecânicos. Um tipo de corrosão existente nas placas de circuito impresso é a corrosão galvânica, que conforme Gentil (2011, p. 85) resulta quando “dois materiais metálicos com diferentes potenciais, estão em contato em presença de um eletrólito, ocorre uma diferença de potencial e a consequente transferência de elétrons”.

Para Callister (2007), a intensidade deste tipo de corrosão será proporcional à diferença entre os valores dos potenciais desses materiais que constituem o par galvânico. O metal mais ativo se comportará como ânodo e sofrerá corrosão, enquanto o metal mais nobre

se comportará como cátodo e será protegido quanto à corrosão. E para Gentil (2011) e Bardal (2004) as tabelas de potenciais de eletrodo mostram a possibilidade de uma reação, mas não quanto à cinética da reação. Um valor de potencial de oxidação mais positivo só indica que haverá maior liberação de energia quando o metal for oxidado e não que a oxidação ocorrerá mais rapidamente.

Para Gemelli (2001) e Gentil (2011) a resistência à corrosão e a velocidade ou taxa de corrosão de um material metálico são os parâmetros mais importantes a serem determinados e esses parâmetros são determinados geralmente mediante ensaios de curta duração que tentam simular as condições reais às quais serão expostos os materiais em serviço. Portanto, é necessária certa precaução quando se pretende selecionar um material estimando sua vida útil por extrapolação desses parâmetros. Muitos métodos são utilizados para avaliar a corrosão, no entanto, somente alguns deles estão normalizados. Um dos destes é o ensaio de exposição à névoa salina, utilizado pela indústria eletrônica que é explicada no ítem 3.4.5. A corrosão ambiental está tendo um impacto crescente sobre a confiabilidade dos eletrônicos, onde ocorre principalmente em ambientes fechados.

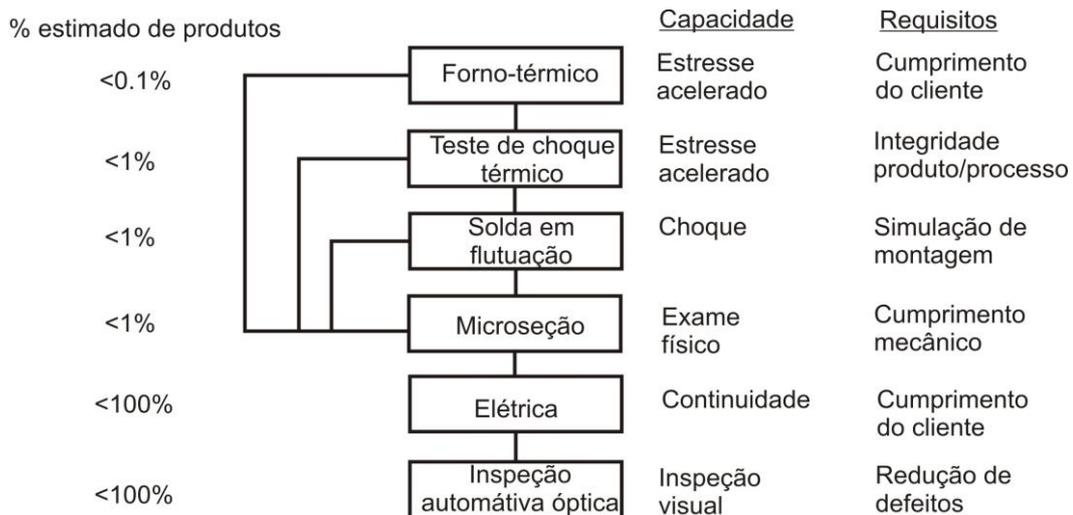
3.4.5. Técnicas empregadas para caracterização das placas

Conforme Coombs (2008), os padrões da indústria ou documentos de orientação como a IPC-9252 (2001), que trata das diretrizes e requisitos para o teste elétrico de placas de circuito impresso sem os componentes, são úteis no desenvolvimento de especificações escritas para um determinado produto. Os documentos padrões devem ser aplicados tendo em consideração a aplicação de destino. A IPC - *Association Connecting Electronics Industries* (Associação de indústrias de conexão eletrônicas) desenvolve normas em relação às placas de circuito impresso tem realizado esforços para distinguir entre as classes em geral de aplicações da placa, sugerindo os requisitos específicos de teste elétrico que atentem a reconhecer os diferentes níveis de criticidade em testes. É possível que os resultados dos testes elétricos se tornem um veículo de melhorias para o sistema de um fabricante de placas de qualidade (IPC-9252, 2001 e IPC-9252A, 2008).

Para Khandpur (2005), o objetivo do teste de confiabilidade é identificar os defeitos latentes que possam surgir na PCI após uma utilização prolongada ou excessiva do circuito em serviço. Estes tipos de defeitos não são claramente visíveis quando o produto está sendo construído ou nas condições simuladas como ciclos repetidos de temperatura extremamente baixas a altas temperaturas (normalmente – 65 °C a 125 °C). A resistência de união e simulação de re-trabalho acessam a integridade estrutural dos furos metalizados, após ciclos

repetidos de soldar e desoldar. Todos estes testes de confiabilidade são descritos na norma IPC-TM-650 (2009). A figura 28 mostra a hierarquia de testes de placa de circuito impresso em relação aos requisitos dos usuários, a capacidade dos ensaios e o percentual de produtos que devem ser testados para garantir a confiabilidade dos produtos eletrônicos.

Figura 28 - Hierarquia de testes de placa de circuito impresso.



Fonte: Adaptada de Smart Group (2011).

Conforme Coombs (2008), a inspeção de confiabilidade consiste na realização de testes específicos para garantir que a PCI funcionará sob a influência de forças climáticas e/ou mecânicas a que será submetido durante o uso. Testes ambientais são realizados em pré-produção de PCIs ou padrões de teste especificamente concebidos para verificar a adequação de projeto e controle de processo de fabricação. Testes específicos são por vezes referidos como parte do processo de admissão da PCI para expor uma situação de falha potencial. Métodos de ensaio específicos para a realização desses testes podem ser encontrados na IPC-TM-650 (2009). Khandpur (2005) na tabela 7 mostra todos os requisitos que são necessários para serem testados para assegurar a garantia de qualidade adequada. Nesta tabela, a seguir definem-se os vários níveis: LR (placas comerciais); HR (altos requisitos de confiabilidade); MIL (especificações militares); 1,2,3 (três níveis de qualidade) conforme a norma IPC-A-600G (IPC, 2004), mostrada no ítem 3.1.1.

Tabela 7 - Características para teste de vários níveis de qualidade.

Requisitos	LR	1	2	3	MIL	HR
Teste de circuito elétrico (100%)					X	X
Capacidade de transporte atual	X		X	X		X
Resistência dielétrica		X	X	X	X	X
“ <i>Etch-back</i> ”						X
Flamabilidade			X	X	X	X
Resistência a isolamento		X	X	X	X	X
Curtos internos	X	X	X	X		X
Choques mecânico						X
Micro-seccionamento					X	X
Resistência a umidade				X	X	X
“ <i>Outgassing</i> ”						X
Adesão por galvanização		X	X	X	X	X
Estrutura PTH					X	X
Solderabilidade	X			X		X
Terminal de extração		X	X	X	X	X
Choque térmico					X	X
Estresse térmico					X	X
Traceabilidade						X
Vibração						X
Características visuais e dimensionais	X	X	X	X	X	X
Deformação e torção		X	X	X	X	X
Absorção de água						X
Legenda:						
- LR = Placas comerciais, com requisitos limitados de ensaios;						
- HR = Altos requisitos de confiabilidade;						
- MIL= Especificações Militares; e						
- 1,2,3 = Três níveis de qualidade designado pelo IPC.						

Fonte: Adaptada de Khandpur (2005).

Teste visual

Um dos primeiros testes que podem ser realizados é inspecionar visualmente a placa, procurando identificar e localizar uma falha na trilha de cobre, como sinais de oxidação e corrosão e problemas gerais na montagem dos componentes e nas juntas de solda. Estas conexões suspeitas são então analisadas com um multímetro para verificar se há passagem de corrente elétrica. Estas falhas na placa de circuito podem causar um mau funcionamento do dispositivo elétrico ou até mesmo fazer o mesmo parar de operar. Para Juran (1988) e Doro (2004), os erros de inspeção são de várias categorias: erros técnicos (falta de capacidade para o cargo, falta de treinamento), erros por inadvertência (distração, descuido, tédio) e erros conscientes (fraude). Padrões fotográficos são especialmente úteis na montagem de placas de circuito impresso. As ferramentas que auxiliam na Inspeção Visual Manual (MVI) variam de uma simples lente de aumento até um microscópio de projeção.

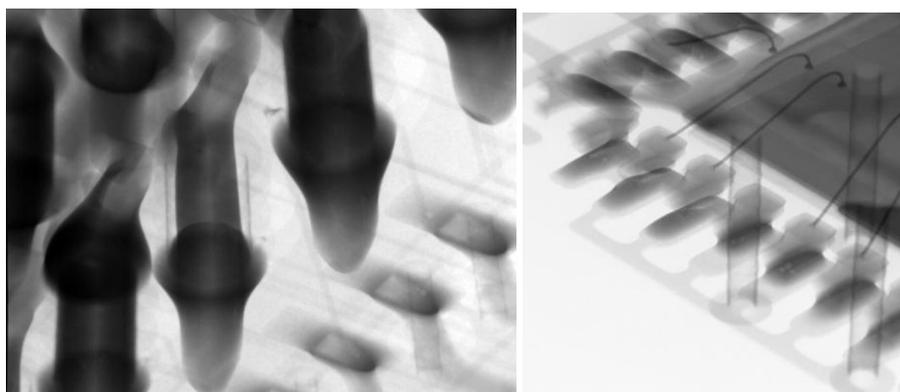
Inspeção por Raios-x

Outro teste inicial que pode ser realizado após a montagem é a inspeção por Raios-x. Para Doro (2004), o uso industrial do raio-x para testes não destrutivos é baseado no princípio de absorção da penetração da radiação. Durante a inspeção, a radiação emitida da fonte passa através da placa de circuito impresso, sendo parcialmente absorvida pelo detector (materiais de diferentes espessuras e densidades irão absorver radiação em diferentes quantidades). O detector por sua vez direciona a imagem, através de um espelho, para uma câmara de vídeo, onde a imagem é digitalizada e enviada ao processador de imagem, a fim de mostrar, ampliar e analisar a imagem.

Nos sistemas de inspeção manual, a avaliação dos defeitos é feita pelo operador através da observação da imagem. Já nos sistemas automáticos a imagem é examinada pixel a pixel pelo computador, que utiliza algoritmos apropriados para verificar se a quantidade e a localização dos materiais estão de acordo com os valores pré-determinados, sendo que esta análise é registrada em arquivos, onde é indicada a localização dos defeitos (DORO, 2004).

Com o surgimento de componentes eletrônicos menores e mais sofisticados, a inspeção de superfície se tornou obsoleta, tornando a inspeção em tempo real por Raios X de alta qualidade mais importante do que nunca, sendo este sistema de Raios X uma solução flexível de alta precisão que facilita a análise de defeitos. A tecnologia de Raios X de alta resolução é amplamente utilizada em ensaios de análise de falhas e qualidade de produção de dispositivos eletrônicos, por exemplo, inspeção de juntas de solda. Qualquer falha de material e característica de qualidade que afete a forma das juntas de solda pode ser detectada: falta de filetes de solda; vazios, bolhas; pontes de solda; defeitos sem umidade (GE MEASUREMENT & CONTROL, 2015). Na figura abaixo, 29, duas imagens do tipo de inspeção por Raios-x, buscando verificar erros das etapas de confecção da placa.

Figura 29 - Inspeção por Raios-X.



Fonte: Adaptada de GE Measurement & Control, 2015.

Teste de funcionamento e continuidade do circuito

Conforme Coombs (2008), a inspeção para a funcionalidade elétrica das PCIs tem como objetivo verificar a continuidade de todos os condutores elétricos e verificar a ausência de curto-circuitos. O teste de resistência é realizado em cada ponto entre as trilhas de cobre com os componentes colocados, posicionando as pontas vermelha e preta em cada ligação, anotando o valor encontrado no display do multímetro quando esta leitura torna-se constante. Pode-se ler a resistência ôhmica dos contatos utilizando um multímetro na escala ôhmica, medindo a resistência entre dois pontos da trilha de cobre. Outro teste seria o de funcionalidade, que para Khandpur (2005) é um método eficaz de localização de componentes com defeito no circuito em reais condições de trabalho. Para as placas multicamadas, os testes funcionais devem ser realizados para determinar a integridade de todas as interligações elétricas, assegurando a existência de continuidade elétrica entre os caminhos especificados e ausência de curto circuito interno, colocando no dispositivo elementos para que esta placa seja funcional e possa ser avaliada.

Teste de ciclagem térmica e choque térmico

Para Coombs (2008) as PCIs estão expostas a tensões térmicas em uma variedade de situações, como uma exposição prolongada em uma temperatura elevada ou ciclos repetidos de temperatura que podem ocasionar várias falhas nas PCIs. As fontes mais importantes de tensão térmica são os choques térmicos e ciclos térmicos durante a fabricação (exemplo da cura da máscara de solda), durante a montagem do circuito (exemplo da cura da cola, refluxo da solda, *reflow*) e ciclos térmicos ambientais no serviço (exemplo da dissipação de calor de funcionamento de componentes eletrônicos).

Khandpur (2005) define que estes testes geralmente são realizados como parte do processo de admissão sempre que o desempenho de alta confiabilidade é esperado. Dois tipos básicos de testes são realizados: testes de estresse térmico e os testes de ciclagem térmica. Conforme Coombs (2008), os testes de ciclagem térmica têm sido o padrão atual da indústria para avaliar a confiabilidade de interconexão de segundo nível.

O método de ensaio da indústria que é amplamente utilizado para o teste de ciclagem térmica é o IPC-9701A (2006). Este fornece orientações detalhadas para os métodos de ensaio de ciclagem térmica com temperatura recomendada para avaliar a confiabilidade das juntas de solda nas superfícies de solda. A tabela 8 lista os parâmetros experimentais típicos para segundo nível de confiabilidade de qualificação. Um diagrama esquemático de uma típica

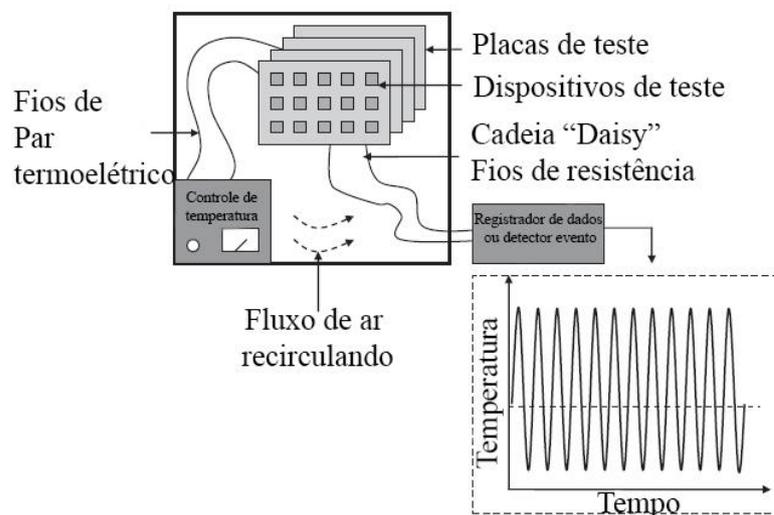
câmara de ciclagem térmica, com as placas instaladas e conectadas a um sistema de aquisição de dados, é mostrado na figura 30.

Tabela 8 - Típicos parâmetros de ensaios de ciclagem térmica para segundo nível de confiabilidade de qualificação.

Parâmetros	Valores
Temperatura máxima (T _{máx.})	100°C
Temperatura mínima (T _{mín.})	0°C
Taxas de rampa de T _{mín} a T _{máx} e T _{máx} para T _{mín}	10°C/min.
O tempo de permanência no T _{máx} e T _{mín}	10 min.

Fonte: Adaptada de Coombs (2008).

Figura 30 - Esquema de um sistema típico de uma câmara de ciclagem térmica e aquisição de dados.

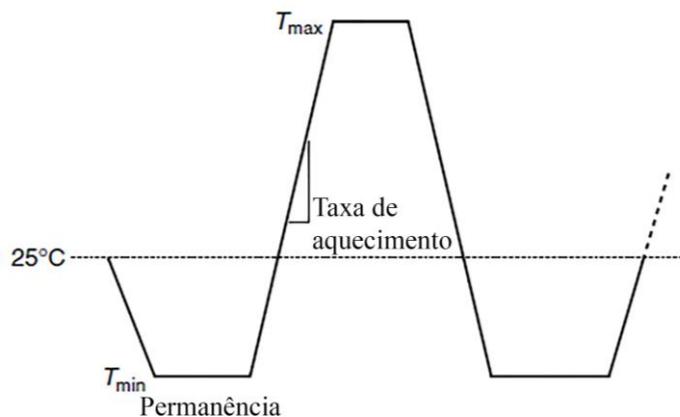


Fonte: Adaptada de Coombs (2008).

Há alguns princípios para a concepção de testes de ciclagem térmica para acelerar a fadiga da solda, sendo que a temperatura máxima do ensaio deve ser inferior a T_g (temperatura de transição vítrea) da placa de circuito impresso, para FR-4 inferior a cerca de 110 °C. Em T_g , o coeficiente de expansão térmica da placa aumenta rapidamente, mas muitas outras propriedades também mudam; por exemplo, o módulo de elasticidade da placa diminui. Para evitar que se aproxima da temperatura de fusão da solda e alterando o mecanismo de solda a deformação, a temperatura máxima também deve ser mantida abaixo de cerca $0.9T_f$, onde T_f é a temperatura de fusão da solda em Kelvin. Para materiais de placas de circuito impresso com valores elevados de T_g ou soldas de baixa temperatura de fusão, esta restrição pode ter precedência. Usando um pico de temperatura acima destes limites resulta em uma aceleração imprevisível (COOMBS, 2008).

Ainda segundo Coombs (2008), a temperatura mínima deve ser elevada o suficiente para que a fluência seja ainda o mecanismo de deformação primária da solda, que é, pelo menos, $0,5 T_f$, ou -45 °C para solda eutética Sn-Pb. Para o autor (2008), há uma preferência por uma temperatura mínima mais elevada (-20 °C ou 0 °C) para assegurar que a fluência ocorra com rapidez suficiente para aliviar a tensão de cisalhamento aplicada durante o tempo de espera permitido. Na figura 31 apresenta-se um perfil do teste de ciclagem térmica. A taxa de ciclos de temperatura não deve ultrapassar 20 °C/min e o tempo de permanência nos extremos de temperatura deve ser de pelo menos 5 min. A proposta de controlar a velocidade do ciclo é para minimizar o choque térmico e as tensões associadas com a diferença de aquecimento ou resfriamento. O tempo de permanência nos extremos de temperatura é um mínimo absoluto necessário para permitir que a fluência ocorra. (COOMBS, 2008).

Figura 31 - Perfil esquemático de ciclos térmicos para o teste de fadiga térmica do conjunto solda.



Fonte: Adaptada de Coombs (2008).

Na norma IPC-9701A (2006), há uma preferência pela condição do ciclo TC1 (0 a 100 °C [32 °F a 212 °F]) e de duração do teste NTC-E (6000 ciclos) para aceitação dos resultados do teste por um setor da indústria em geral. O outro tipo de teste é o choque térmico que, segundo a IPC-9701A (2006), ocorre quando um conjunto é exposto a mudanças rápidas de temperatura causando gradientes de temperatura transitórios, warpages e tensões dentro da parte e/ou montagem. A taxa de variação da temperatura de choque térmico é normalmente maior do que 20 °C [36 °F]/minuto. Conforme Coombs (2008), o teste é útil para determinar o comportamento das placas de circuito impresso com áreas de alto estresse mecânico e a resistência da PCI à exposição a temperaturas extremas altas e baixas. O teste é induzido pela exposição a diferenças severas e rápidas em temperaturas extremas, tipicamente de $+125\text{ °C}$ a -60 °C dentro de dois minutos. Os efeitos do choque térmico podem incluir quebra de cobrimento nos buracos e delaminação. Note-se que o monitoramento contínuo elétrico

durante os ciclos choque térmico irá detectar conexões elétricas intermitentes que não podem ser detectados com técnicas de medição periódica.

Para Khandpur (2005), a confiabilidade de PTH é normalmente testada sob condições simuladas de excursões térmicas de um PTH ao longo de sua vida. A tabela 9 fornece as condições de teste para o choque térmico. As especificações militares que são aplicadas para testar o choque térmico são MIL-P-55110 (DEFENSE LOGISTICS AGENCY, 2014), também encontrado no IPC-TM-650 (2009).

Tabela 9 - Condições de teste para choque térmico.

Baixa temperatura °C	Tempo em minutos	Alta temperatura	Tempo em minutos	Tipo de laminação
-65	15	105	15	PX
-65	15	125	15	GE
-65	15	150	15	GB, GH, GP, GT, GX, GR, FEP
-65	15	204	15	GI

As amostras são testadas para a continuidade ou curtos elétricos. Os tipos de laminados, como por designações militares são:

- PX= Base papel, resina epóxi, retardador de chamas;
- GE = Base vidro (tecido-tramado) base, resina epóxi, retardador de chamas;
- GB = Base vidro (tecido-tramado), resina epóxi, resistente ao calor;
- GH = Base vidro (tecido-tramado), resina epóxi, resistente ao calor e retardador de chamas;
- GP = Base vidro (fibra não tramada), resina politetrafluoretileno;
- GT = Vidro (tecido) base, resina politetraetileno;
- GX = Base vidro (tecido-tramado, resina politetraetileno, para aplicações de micro-ondas;
- GR = Base vidro (fibra não tramada), resina politetraetileno para aplicações de micro-ondas;
- FEP = *Fluorocarbon* sem preenchimento;
- GI = Base vidro (tecido-tramado), resina de poliamida, de propósito geral.

Fonte: Adaptada de Khandpur (2005).

A maioria dos ciclos térmicos de PCAs se destina a acelerar conjuntas falhas de fadiga térmica de solda. Apesar da existência de um padrão de IPC, não existe um padrão de teste acelerado hoje que é adequado para todas as combinações de componentes e de substrato e todos os ambientes de serviço. O teste de choque térmico é normalmente usado para testar os componentes, mas não é necessariamente um substituto para a ciclagem térmica. Porque a rampa de temperatura é extremamente rápida e o tempo de espera nos extremos é geralmente curto, há pouco tempo para a fluência; conseqüentemente, o número de ciclos até à falha é aumentada. Além disso, a mudança rápida de temperatura pode induzir tensões térmicas diferenciais que podem ser maiores do que as experimentadas durante a ciclagem térmica. Estas tensões podem induzir as falhas prematuras, em particular, se a falha não é na solda (COOMBS, 2008).

- Teste de vibração

A vibração em montagens é definida como movimento periódico ou aleatório em direções opostas alternadamente a partir da posição de equilíbrio. A carga de aplicação é tipicamente abaixo do ponto de escoamento (elástica) dos materiais. (IPC-9701A, 2006). Conforme a norma JEDEC: JESD22-B103B – “Vibration, Variable Frequency” (JEDEC, 2002), o teste de vibração de frequência variável é feito para determinar o efeito de vibrações, dentro de uma gama de frequências especificada, sobre os elementos estruturais internos. Este método destina-se a avaliar o(s) componente(s) para uso em equipamentos elétricos. A vibração deste tipo pode perturbar as características de funcionamento, em particular se o esforço repetitivo causa fadiga. Este é um teste destrutivo destinado à qualificação de componentes. Os dispositivos devem ser vibrados com movimento harmónico simples correspondendo aos níveis de teste mostrados na tabela 10, onde pelo menos uma condição de serviço deve ser designada.

Tabela 10 - Níveis de teste dos componentes.

Condição de serviço	Pico de aceleração (G)	Deslocamento Pk-pk (in/mm)	Frequência cruzada Cross-over (Hz)	Frequência Mín./Máx. (Hz)
1	20	0,060/1,5	80	20/2000
2	10	0,040/1,0	70	10/1000
3	3	0,030/0,75	45	5/500
4	1	0,020/0,5	31	5/500
5	0.3	0,010/0,25	24	5/500
6	0.1	0,005/0,125	20	5/500
7	0.01	0,001/0,039	14	5/500
8	0.001	0,0005/0,0127	6.2	5/500

Fonte: Adaptado de JEDEC (2002).

Teste de corrosão e umidade (névoa salina)

A complexidade e os diferentes fatores que atuam durante exposição atmosférica tornam a avaliação antecipada do desempenho e do comportamento de materiais metálicos (com ou sem revestimentos), uma tarefa difícil. Conforme Khandpur (2005) há o teste de umidade e resistência de isolamento, que é um teste realizado para estudar o efeito da alta umidade e da temperatura sobre o desempenho de placas de circuito impresso. As condições de ensaio são normalmente definidas como umidade relativa de 90 a 98 %, com temperatura de 25°C a 65 °C, com um potencial de tensão forçando de 10 a 100 VDC aplicado ao circuito de teste. Após estes ciclos de ensaio necessários sejam concluídos, a PCI é submetida a testes

de resistência de isolamento. Os corpos de prova não devem apresentar bolhas, vazios, empenamento ou delaminação após este teste de resistência à umidade.

Outra avaliação de desempenho é feita utilizando uma elevada quantidade de ensaios laboratoriais, onde a maior parte é executada em câmaras fechadas, nas quais os corpos-de-prova são expostos a névoas salinas de diferentes concentrações e composições. Ensaio conduzidos em câmaras fechadas, onde é possível controlar as condições de exposição, têm como objetivo permitir o controle dos fatores que influenciam na corrosão. Para o ensaio de névoa salina, a norma ASTM B117-11 – “*Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*” (ASTM, 2011) é usada como padrão de ensaio de corrosão em superfícies pintadas, revestimentos metálicos e componentes elétricos. Neste ensaio, os corpos de prova são expostos a uma névoa salina contínua cuja composição corresponde a 5% (em massa) de cloreto de sódio (NaCl), à temperatura de 35 °C.

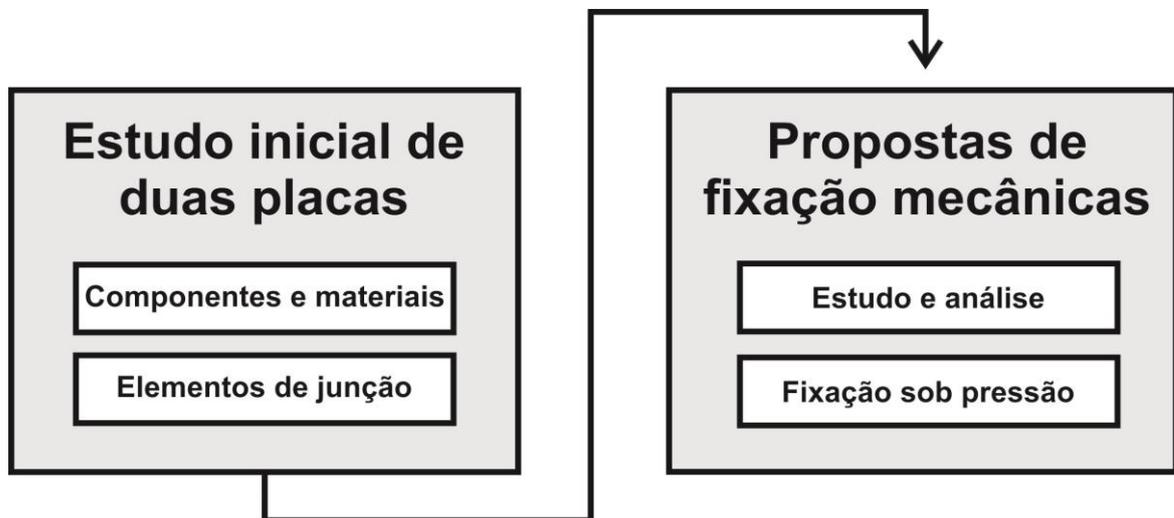
Basicamente os testes realizados atualmente após a confecção de uma PCI são para aplicações que utilizam a solda como meio de fixação dos componentes para a placa base. Assim, para o presente trabalho foi feita uma análise das normas existentes e destes procedimentos para criar métodos de caracterização próprios que satisfaçam ao presente estudo.

4 ESTUDO DE PLACAS E DESENVOLVIMENTO DE PROPOSTAS

4.1. Materiais e métodos

Nesta etapa inicialmente foram estudadas duas placas de circuito impresso em relação a seus componentes, materiais e elementos de junção, itens 4.1.1. Foram também desenvolvidas alternativas de fixação mecânicas para os componentes, item 4.1.2, na qual fez-se análises e optou-se em desenvolver uma fixação mecânica sob pressão. Na figura 32 apresenta-se o fluxograma deste processo.

Figura 32 - Fluxograma do processo.

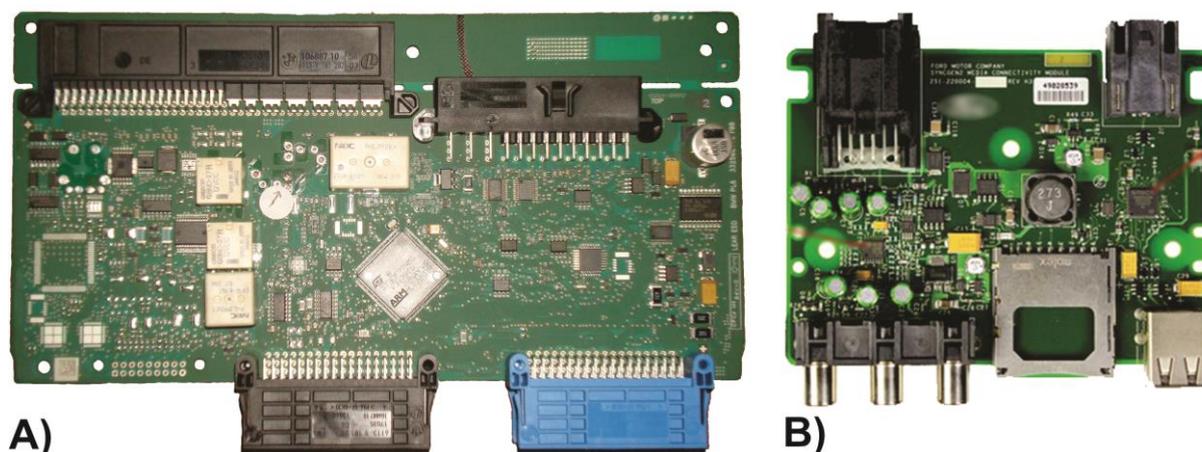


4.1.1. Estudo inicial de duas placas

Análise quanto aos componentes e materiais

Nesta etapa foram realizadas análises de duas placas de circuito impresso, figura 33 com relação aos materiais e componentes presentes. Foram calculados os percentuais dos materiais e dos componentes das placas de circuito impresso, averiguando a reciclabilidade atual destas. Devido à complexidade de componentes e materiais, foram selecionados os materiais e componentes com maior presença, analisando e mostrando o peso em gramas e o percentual que isto representa. Esse estudo ocorreu em parceria com uma empresa de PCI's localizada na cidade de Valls (Tarragona, Barcelona) na Espanha, que forneceu as placas e os dados iniciais. Essas PCI's são produzidas para um cliente, que como parte do termo de confiabilidade teve seu nome excluído, figura 33.

Figura 33 - Placas de circuitos impressos utilizadas para as análises iniciais (A e B respectivamente).



Análise quanto aos elementos de junção

Neste item faz-se uma análise quanto aos seus elementos de junção, caracterizando os problemas, os pontos positivos e negativos existentes nas placas analisadas.

4.1.2. Estudo de propostas de fixação mecânicas para PCIs

No presente trabalho foram estudadas propostas de fixação como alternativa à tradicional solda chumbo-estanho e também a solda tipo *Lead-Free*. As diretrizes norteadoras do projeto foram: diminuir e/ou eliminar o uso da solda nos elementos de junção; utilizar a menor quantidade de materiais e facilitar a desmontagem dos componentes. A partir dos parâmetros técnicos definidos anteriormente, foram propostas alternativas para o projeto, sendo realizadas no software CAD Rhinoceros 4.0 (MCNEEL, 2010) cinco conceitos iniciais para o projeto. Após foram realizadas as primeiras análises quanto às propostas de fixação realizadas. Os critérios de análise foram: possibilidade de fixação mecânica, possibilidade de condutividade elétrica; facilidade de montagem/desmontagem; baixa quantidade de uso de materiais. A partir das análises foi verificada que a fixação dos componentes por pressão poderia ser uma alternativa viável, assim este foi o tipo de fixação a ser empregado em um estudo possível para a placa de circuito impresso.

4.2. Resultados e discussões

Neste item são mostrados os resultados do estudo de duas placas do mesmo tipo de utilização fabricadas pela empresa visitada, mas com diferente configuração e diferentes tipos de soldagem, uma com solda *Lead-Free* (placa A) e outra Sn-Pb (placa B), apresentadas anteriormente na figura 32. Os resultados são em relação aos componentes, materiais e

elementos de junção, item 4.2.1. São apresentadas após as alternativas realizadas para fixação mecânica para as PCI's, item 4.2.2., realizando a análise destas propostas, item 4.2.3.

4.2.1. Estudo inicial de duas placas

Análise quanto aos componentes e materiais que constituem as placas

Com os dados retirados de dois projetos da empresa, foram calculados os percentuais de cada componente e dos materiais nas duas placas de circuito impressos. Pela complexidade de materiais existentes, mostra-se na tabela 11 a composição dos materiais com maior presença nas placas de circuito impressos e uma comparação entre as duas placas estudadas em relação ao percentual de tipos de materiais presentes.

Tabela 11 - Tabela comparativa entre as PCIs A e B com relação aos materiais que as constituem.

Placa A			Placa B		
Materiais	Peso (g)	Percentual total (%)	Materiais	Peso (g)	Percentual total (%)
Poliamida 6	144,05	43,85	E/P-I-GF20+MD10	52,00	28,26
Liga de cobre	37,15	11,31	Semi-componentes	38,50	20,92
PA6 GF10+GB20	25,96	7,90	PCB-Prepreg "Adesivo"	21,00	11,41
PBT+PET+ASA GF30	13,86	4,22	Liga de cobre	19,90	10,83
Ferro macio magnético	10,82	3,29	PBT	13,30	7,25
Liga de aço	5,63	1,71	C2600 bronze	6,30	3,42
Solda em pasta "lead free" L F318	4,80	1,46	Solda em pasta MP100 SN62	2,50	1,36
Total analisado	328,49	100 %	Total analisado	184,02	100 %
Polímeros	218,90	66,64	Polímeros	49,49	26,89%
Metálicos	61,71	18,79	Metálicos	80,27	43,62%
Compósitos	46,07	14,02	Compósitos	53,79	29,23%
Cerâmicos	1,82	0,55	Cerâmicos	0,46	0,25%
Total analisado	328,49	100 %	Total analisado	184,02	100 %

Analisando as duas placas, o componente que possui maior peso é a placa base, com 144,05g (43,85% do total de peso) na placa A e 52g na placa B (28,26% do total de peso). As ligas de cobre mostram ter um percentual grande de presença com 11,31% na placa A e 10,83% na placa B. Outra questão avaliada que mostra a diferença dos componentes conforme o projeto da PCI é o percentual de polímeros presentes na placa A, 66,64%, contra 26,89% na placa B.

A placa A utiliza como solda a lead free ("solder paste lead free L F318"), com 4,8 gramas de peso, representando 1,46% do peso total da placa de circuito impresso. Já a placa B

utiliza a solda com chumbo (“*solder paste* MP100 SN62”) com 2,5 gramas de peso, representando 1,36% do peso total da PCI. Apesar do percentual ser pequeno em uma placa, se somado este peso em gramas para cada placa de circuito impresso fabricada, há um representativo percentual deste material que é potencialmente tóxico se colocado no meio ambiente sem o devido tratamento, expondo ainda mais a gravidade deste problema.

Mostra-se na tabela 11 que há uma ampla diferença na questão dos materiais em relação às duas placas, demonstrando que cada placa é um projeto específico para um determinado uso e isto altera consideravelmente os componentes e materiais. Isto torna a reciclagem deste tipo de produto de alta complexidade, devido então a quantidade de materiais e sua diversidade e a dificuldade de identificar e separar estes materiais. Realizando uma comparação com a tabela 1, de uma análise de componentes e materiais de placas em 1998 para esta, nota-se aqui uma grande quantidade de materiais poliméricos.

Análise quanto aos elementos de junção

Neste item fez-se uma análise das placas quanto aos elementos de junção, caracterizando os problemas, os pontos positivos e negativos existentes nas placas analisadas. Apresenta-se na figura 34 e na tabela 12 uma relação dos tipos de elementos de junção encontrados nas PCI’s. Basicamente se restringem a 3 tipos de fixação que contemplam todos os elementos: de fusão, interferência e engate. O elemento com maior presença e por isso tendo maior atenção no estudo é o de fusão, contextualizado aqui pela solda metálica. Estudam-se assim os problemas diretamente ligados a separação dos componentes que refletem no potencial de reciclagem das placas.

Figura 34 – Tipos de elementos de junção encontrados na placa A.

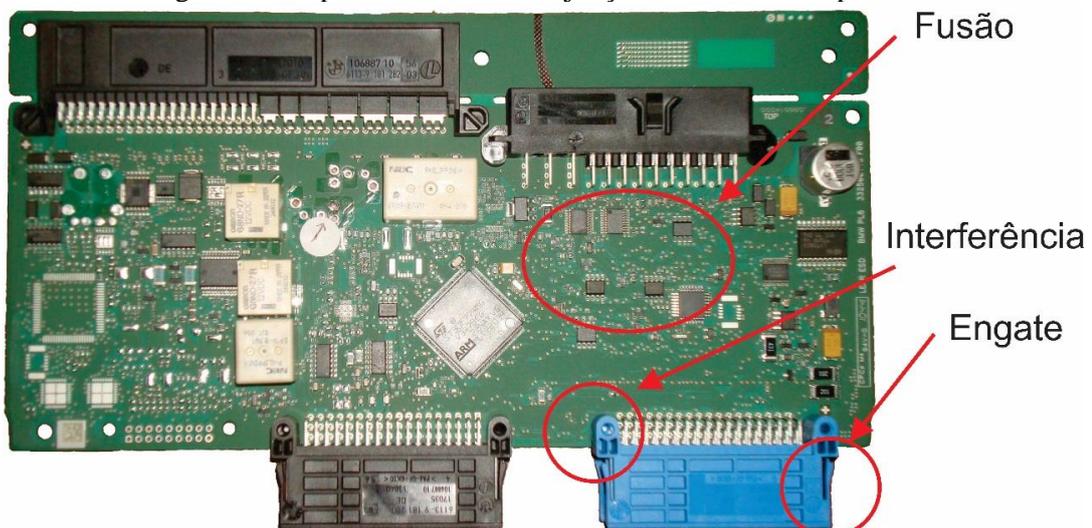
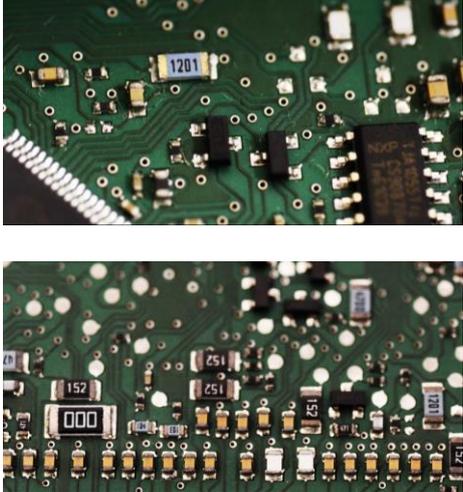
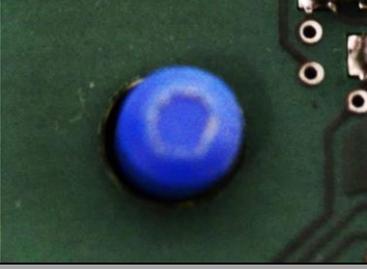
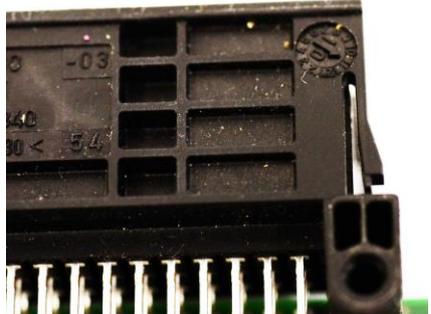


Tabela 12 - Elementos de junção encontrados nas PCIs analisadas.

Elementos de junção presentes	
Fusão	
<p>O princípio da fusão consiste em unir peças por meio da solidificação de um ou mais materiais; é um tipo de união permanente, não permitindo nenhum grau de liberdade. A fusão de um material como elemento de junção não segue os conceitos de sustentabilidade na maioria das situações, uma vez que este sistema dificulta a desmontagem e/ou separação dos materiais do produto, dificultando a reciclagem/reuso dos mesmos. Os pontos positivos ainda hoje são a fácil fabricação e colocação dos componentes, dependendo a liga, tem um ponto de fusão baixo. Os pontos negativos são a dificuldade de separação dos elementos com este tipo de união, além da diversidade de ligas metálicas hoje existentes.</p> <p>- Apresenta-se como solda metálica nos componentes eletrônicos nas PCI's.</p>	
Interferência	
<p>Uma forma de união onde existe a diferença de dimensões nas áreas de junção. O ponto positivo é a fácil montagem dos componentes. Já como ponto negativo é a difícil desmontagem dos componentes por estarem ligados por pressão e a baixa condutividade elétrica que este tipo de união proporciona.</p> <p>- Apresenta-se na forma de elementos unidos sob pressão em interruptores (relés).</p>	
Engate	
<p>São uniões feitas por intermédio do acoplamento de uma peça em outra provocando a fixação entre elas. A função maior deste princípio de junção é a de permitir uma maior facilidade para a separação dos componentes do engate. Os pontos positivos são a fácil montagem e desmontagem, não sendo geralmente uma união permanente. Os pontos negativos são a resistência mecânica baixa na união e a condutividade elétrica baixa.</p> <p>- Apresenta-se na forma de encaixe em conectores e plugs.</p>	

4.2.2. Estudo de propostas de fixação mecânicas para PCIs

Nesse item são apresentados os estudos realizados no software CAD Rhinoceros (MCNEEL, 2010), visualizando o projeto para a primeira análise. Neste primeiro estudo buscou-se o desenvolvimento de ideias para um sistema de fixação sem o uso da solda, tendo as primeiras análises necessárias para o posterior desenvolvimento de protótipos funcionais. Foram realizados seis conceitos iniciais para o projeto, apresentados a seguir, apontando os pontos positivos e negativos.

1- Ligação mecânica com outro elemento

O sistema funcionaria com um sistema de fixação já colocado anteriormente na placa, fixando os componentes com um sistema de acoplamento, permitindo a interligação com o circuito e a fixação propriamente dita (figuras 35 e 36).

Pontos positivos: Não utiliza a solda como forma de união dos componentes; fácil desmontagem e reutilização dos componentes; é um tipo de união não permanente.

Pontos negativos: O processo de montagem e desmontagem dos componentes pode se tornar complexo e demorado; presença de outros componentes com mais materiais sendo utilizados; necessidade de uma mudança muito grande no projeto dos componentes eletrônicos; custo mais elevado devido aos novos componentes e pelo tempo de montagem ser maior, pode se tornar inviável para a indústria.

Figura 35 - Conceito de colocação dos componentes com um elemento acoplado.

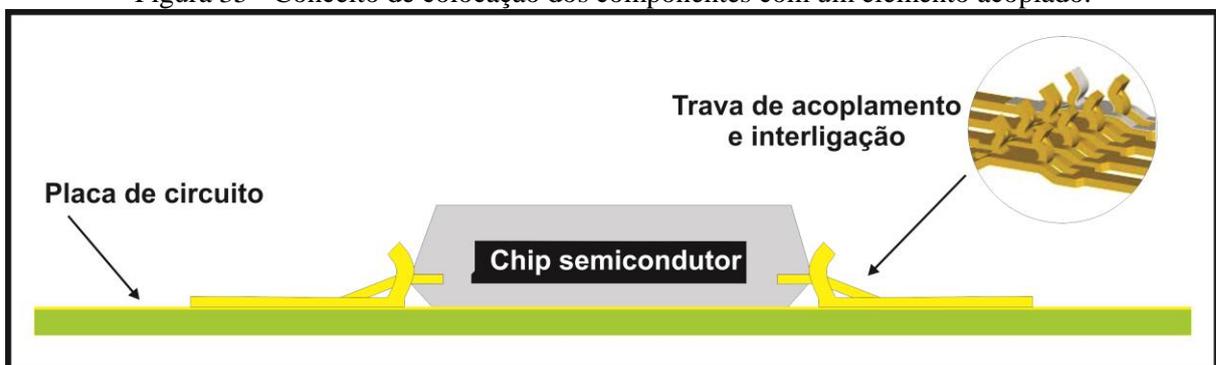
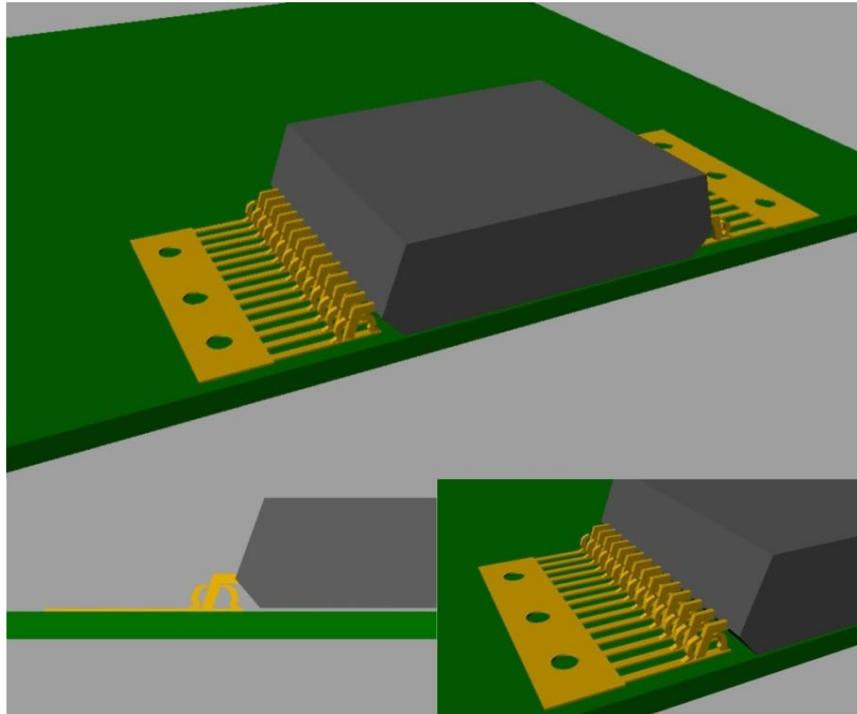


Figura 36 - Conceito representado em CAD do elemento de junção.



2- Ligação a vácuo

Nesta proposta os componentes eletrônicos são fixos primeiramente com um elemento de fixação mecânica, através da interferência, com o intuito de posicionar os elementos no ponto adequado e possuir uma fixação. Para que isso ocorra, os elementos possuem diferenças entre as dimensões nas áreas de união, montando estas com uma pressão, impedindo que se solte momentaneamente. Após o posicionamento dos elementos e a fixação por pressão e interferência, o ar seria retirado da placa que é oca e assim teria uma maior pressão através da fixação à vácuo (figuras 37 e 38), tendo o contato com o circuito externo. O sistema de fixação a vácuo produz a junção por retirada do ar existente entre as partes, isto faz com que se crie vácuo, permitindo assim a união das superfícies. As características deste princípio não permitem nenhum grau de liberdade, pois quando movida a peça, o ar penetra entre as superfícies, eliminando a junção.

Pontos positivos: Não utiliza a solda como forma de união dos componentes; fácil desmontagem e reutilização dos componentes; é um tipo de união não permanente.

Pontos negativos: Processo de montagem dos componentes ser mais complexo; interligação entre os componentes ser fraca, tendo a possibilidade de não ter conexão eletrônica eficaz.

Figura 37 - Conceito de colocação dos componentes sob pressão e fechamento a vácuo.

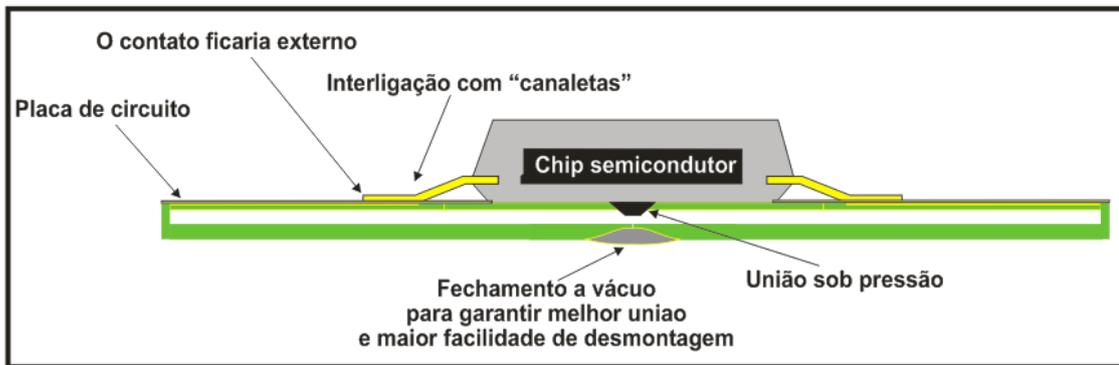
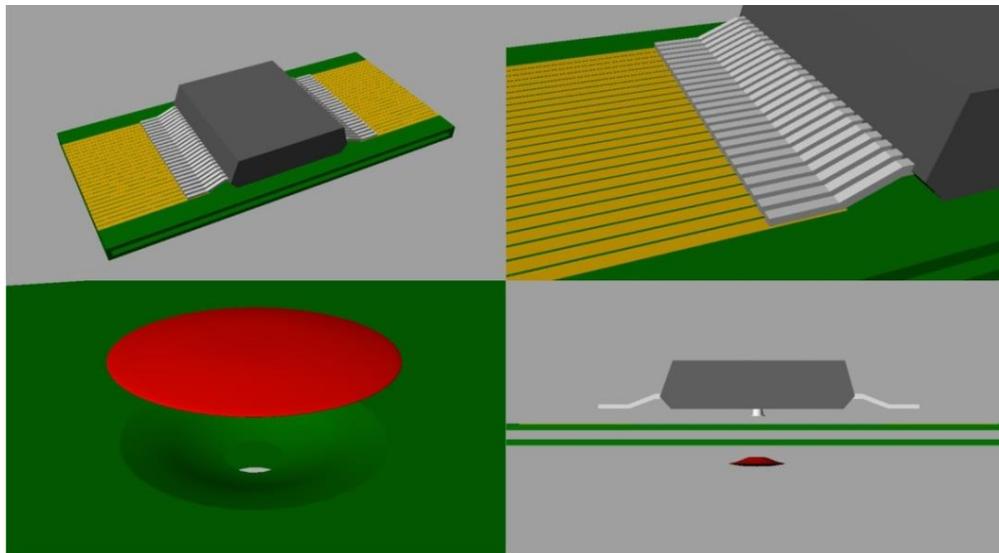


Figura 38 - Conceito de colocação dos componentes sob pressão e fechamento a vácuo feitos em software CAD.



3- Contato com "canaletas" internas

Nesta proposta os componentes seriam fixos e conectados eletronicamente através de "canaletas", recobertas com cobre para possibilitar a conexão eletrônica. Na figura 39 mostram-se dois sistemas de encaixe com "canaletas" que possibilitam o encaixe e conexão dos componentes. Nas figuras 40 e 41 este tipo de conexão é mostrado em software CAD. O contato com o circuito seria externo nas vias e interno nos furos e canaletas.

Pontos positivos: Não utiliza a solda como forma de união dos componentes; é um tipo de união não permanente.

Pontos negativos: Processo de montagem e desmontagem dos componentes ser complexo e demorado; mudança grande nas hastes dos componentes eletrônicos; a ligação mecânica para fixação dos componentes pode ser fraca como também a ligação eletrônica, sendo inviável na indústria.

Figura 39 - Conceito de colocação dos componentes com o contato feito internamente.

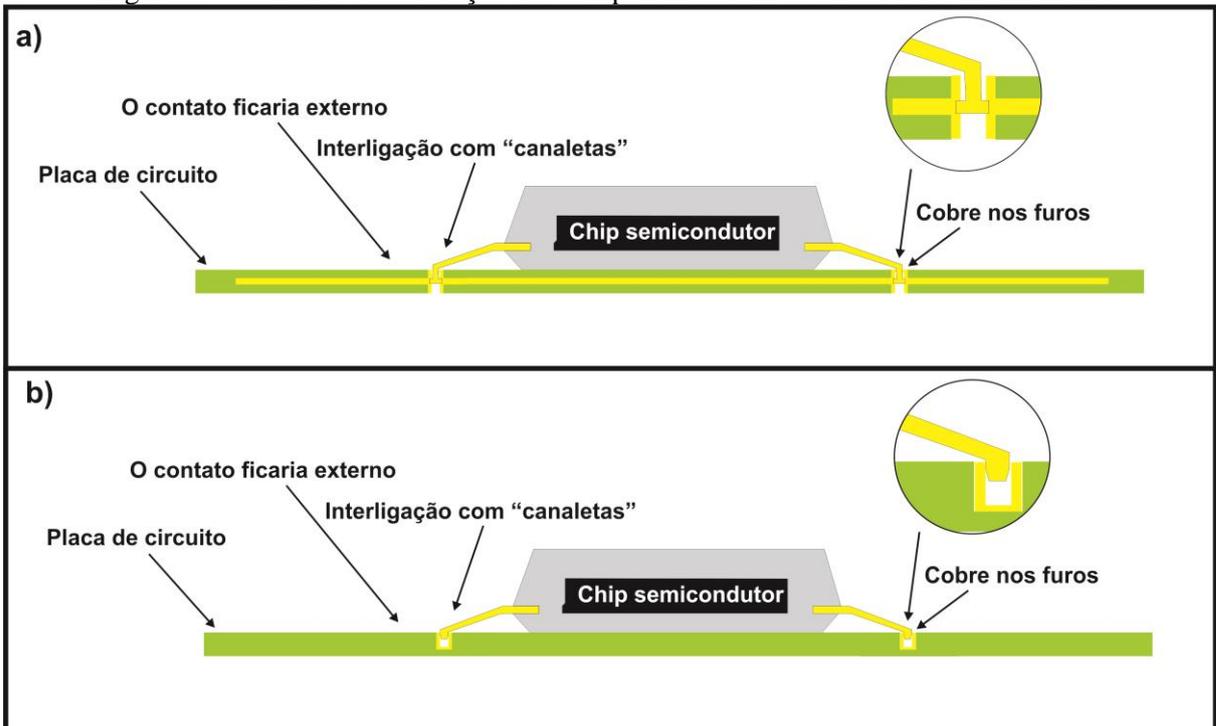


Figura 40 - Conceito de colocação dos componentes feitos em CAD.

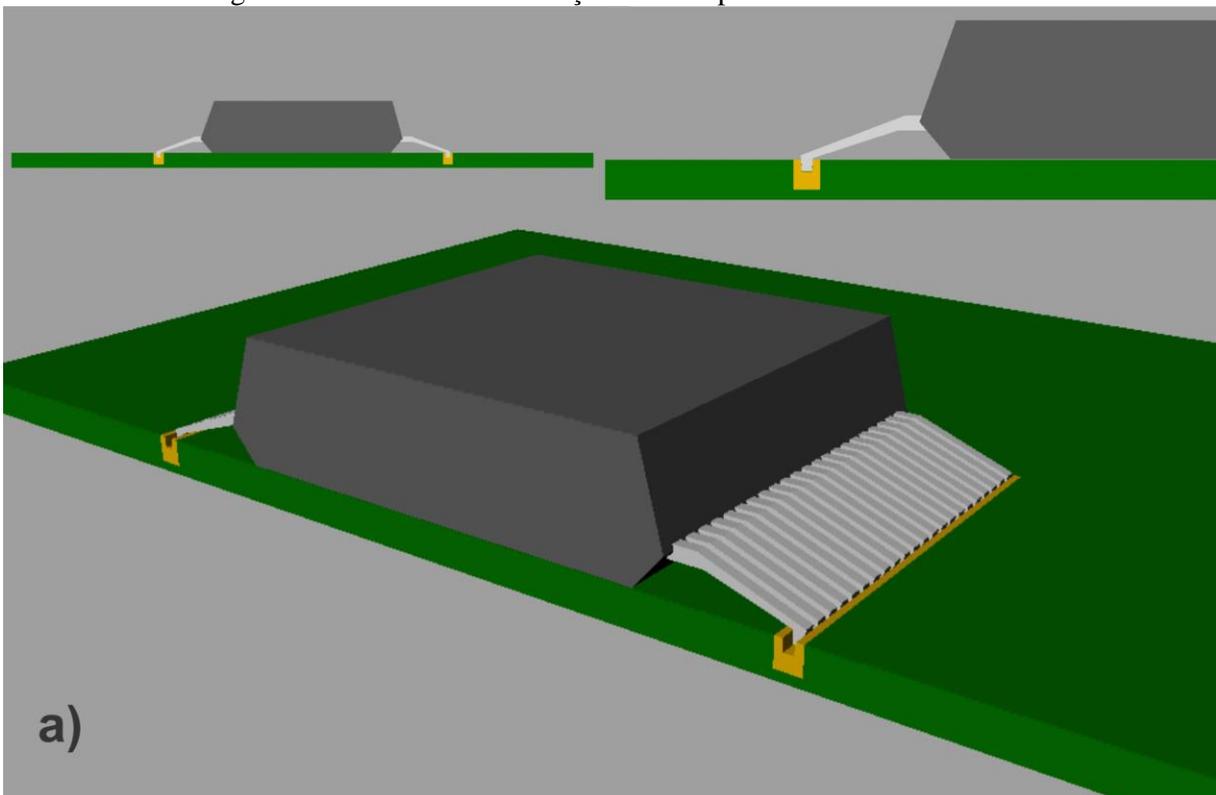
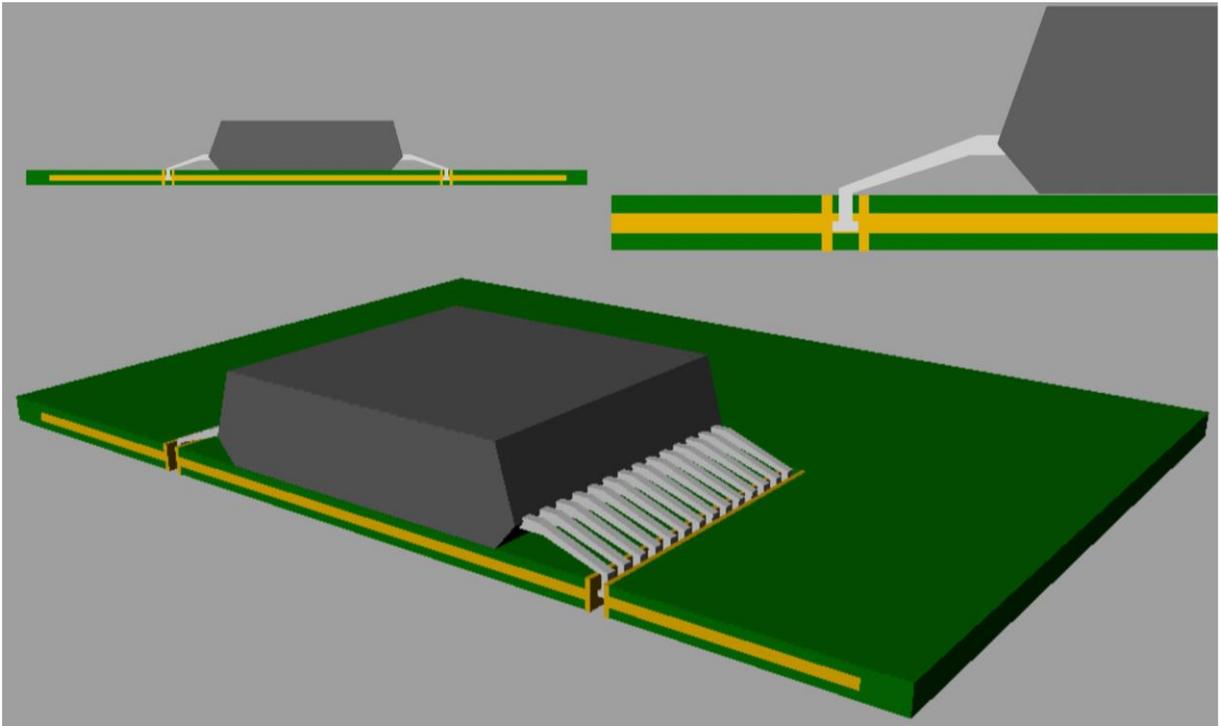


Figura 41 - Conceito de colocação dos componentes feito em software CAD.



4- Contato com “canaletas” e ligação a vácuo

Nesta proposta, com base nas propostas anteriores, os componentes seriam fixos através de “canaletas” para colocação na posição correta, utilizando uma certa pressão e a interferência como elemento de fixação inicial, tendo os componentes diferentes dimensões impedindo que se solte momentaneamente. Após o posicionamento dos elementos e a fixação por pressão e interferência, o ar é retirado da base que é oca e sofre uma maior pressão através da fixação a vácuo, melhorando a resistência e a conexão. A conexão então é realizada por estas “canaletas”, que seriam recobertas com cobre. Na figura 42 mostra-se este sistema de encaixe e conexão proposto e na figura 43 é realizado a simulação em software CAD.

Pontos positivos: Não utiliza a solda como forma de união dos componentes; fácil desmontagem e reutilização dos componentes; é um tipo de união não permanente.

Pontos negativos: Complexidade do processo de montagem dos componentes e o tempo de montagem ser grande; mudança grande nos componentes eletrônicos; a ligação mecânica e eletrônica entre os componentes pode ser fraca.

Figura 42 - Conceito de colocação dos componentes com a alternativa de combinação de ideias.

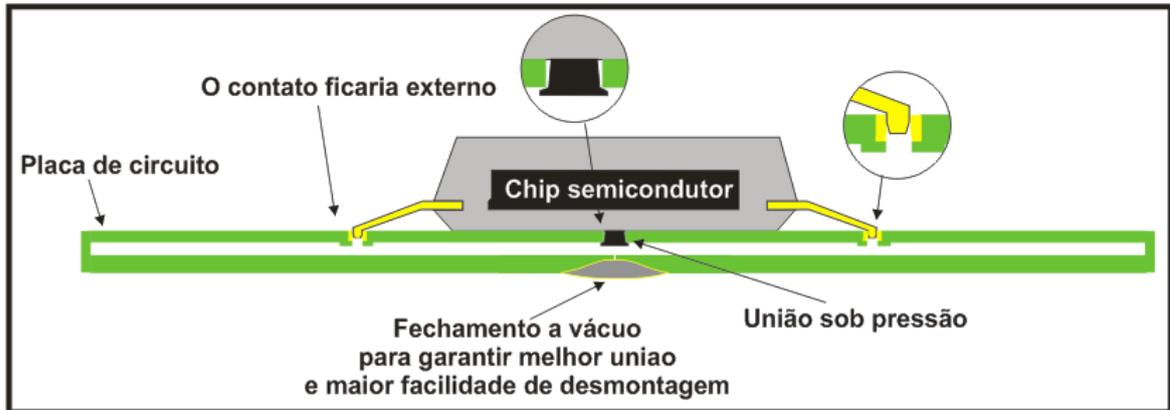
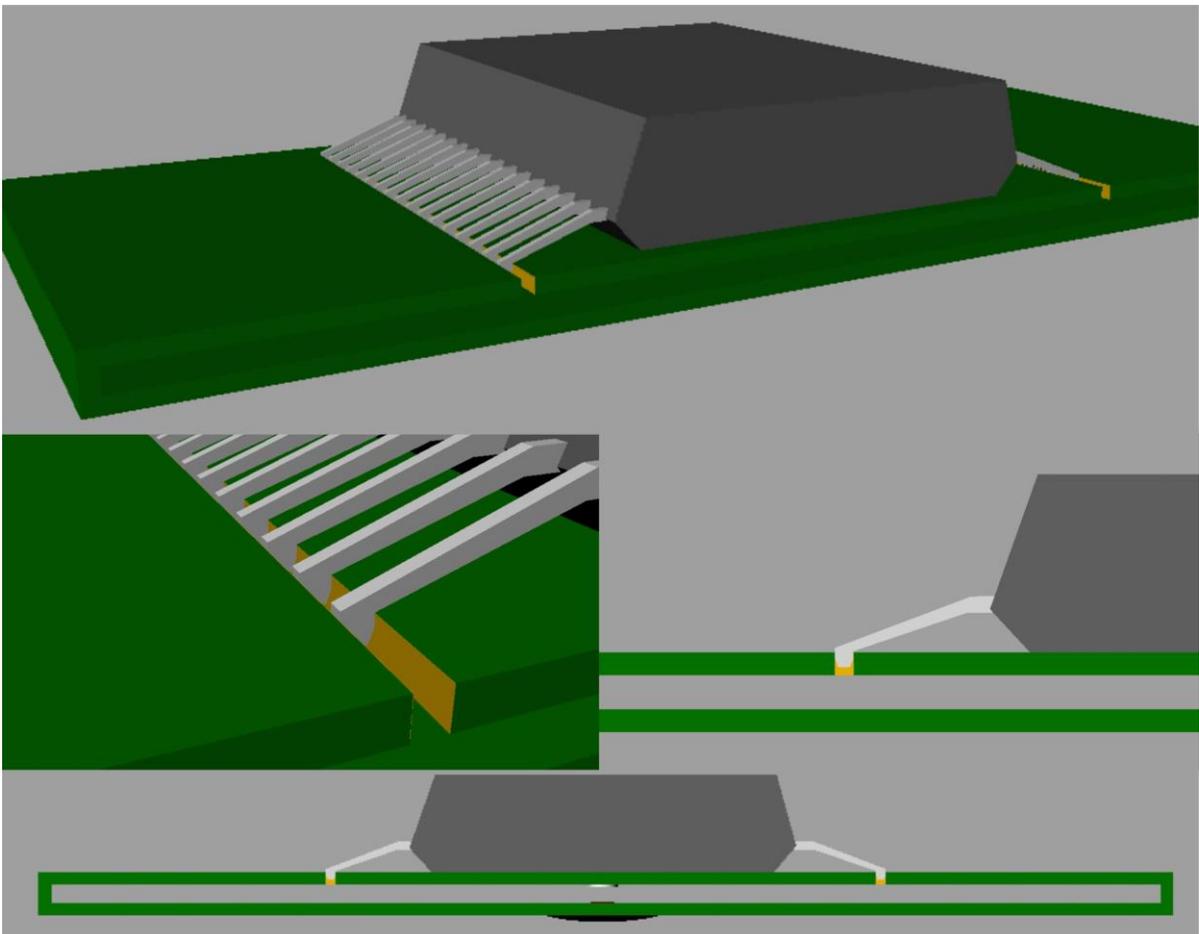


Figura 43 - Conceito de colocação dos componentes realizado em software CAD.



5- Ligação sobre pressão com o contato interno

Neste tipo de ligação, a placa é feita em duas partes, uma com o circuito impresso feito, onde depois de impresso e realizado os furos, os elementos são fixados internamente, com a pressão da outra placa, não necessitando a solda. Os contatos então são realizados internamente, não ficando visíveis os desenhos do circuito. A união dos elementos é realizada através das duas placas colocadas uma sobre a outra, pressionando o dispositivo e as conexões, tendo outros elementos nas laterais para fixar mais o conjunto. Nas figuras 44 e 45 mostram-se duas ideias, alterando o tipo de “haste” para conexão. Estas propostas tiveram o objetivo de alterar o formato da haste para mudar a forma de contato possibilitando uma montagem diferente e um contato maior com a trilha de cobre, por isso deste formato da haste.

Pontos positivos: Não utiliza a solda como forma de união dos componentes; fácil desmontagem e reutilização dos componentes; é um tipo de união não permanente.

Pontos negativos: Processo de montagem dos componentes ser mais complexo e demorado; uso de outro material e elementos de fixação nas laterais para união do conjunto; mudança grande nas hastes dos componentes eletrônicos; a interligação entre os componentes ser complexa e potencialmente fraca.

Figura 44 - Conceito de colocação dos componentes com o contato feito internamente simulado em CAD.

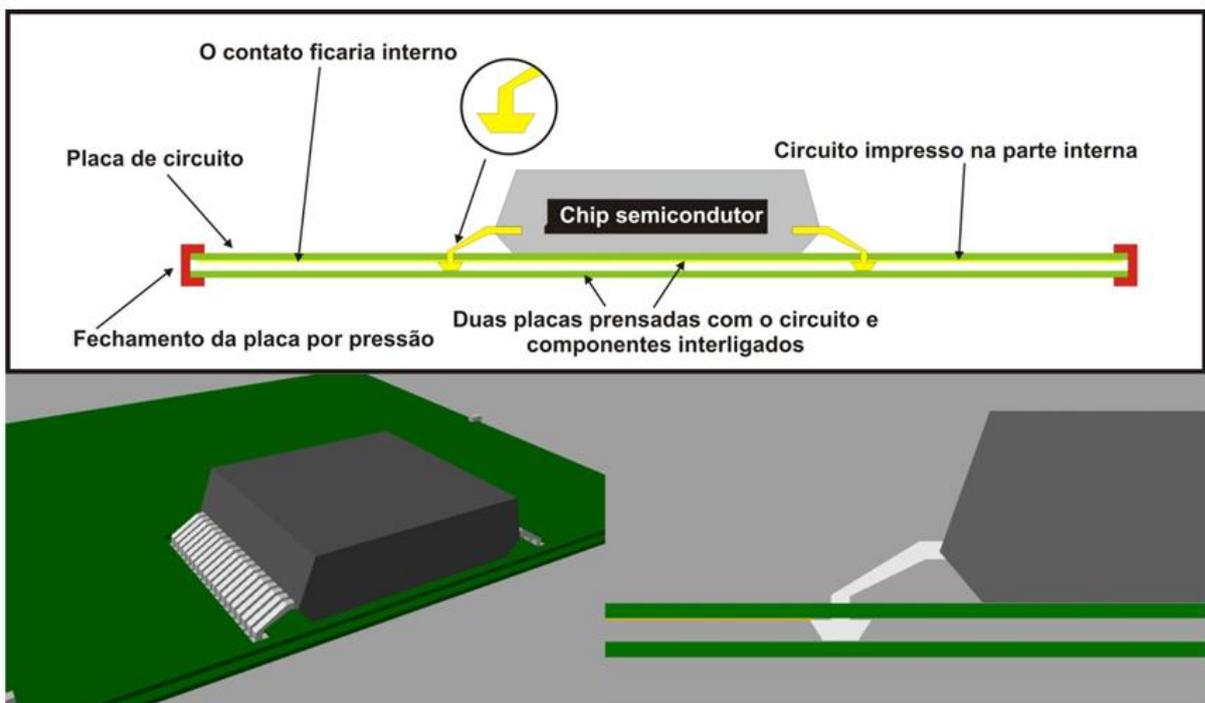
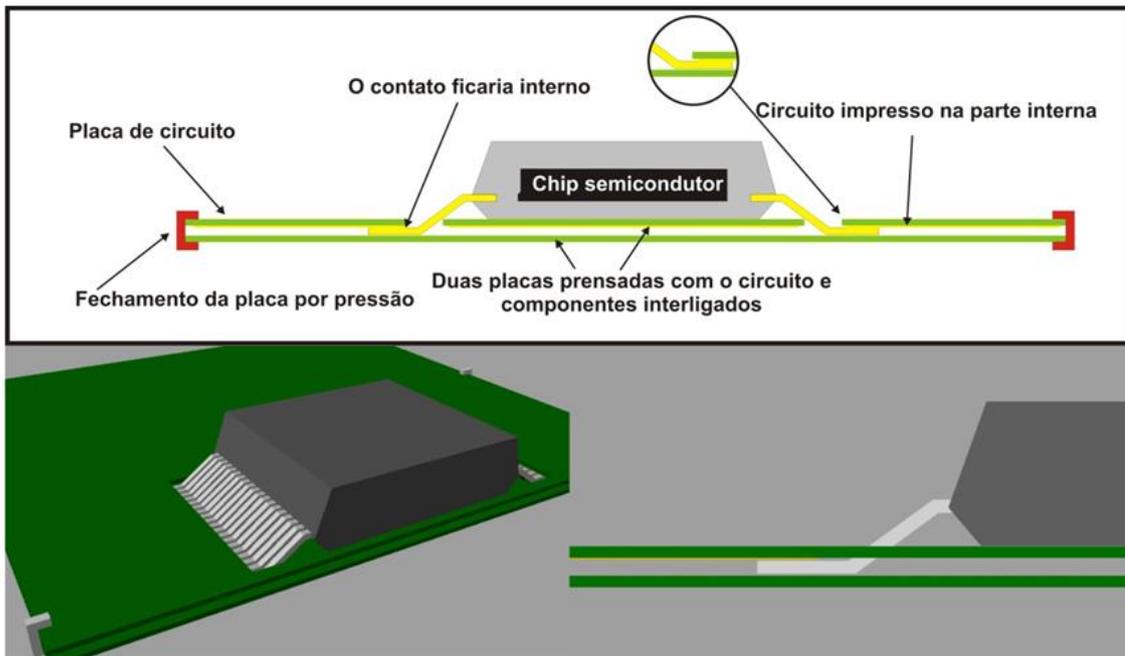
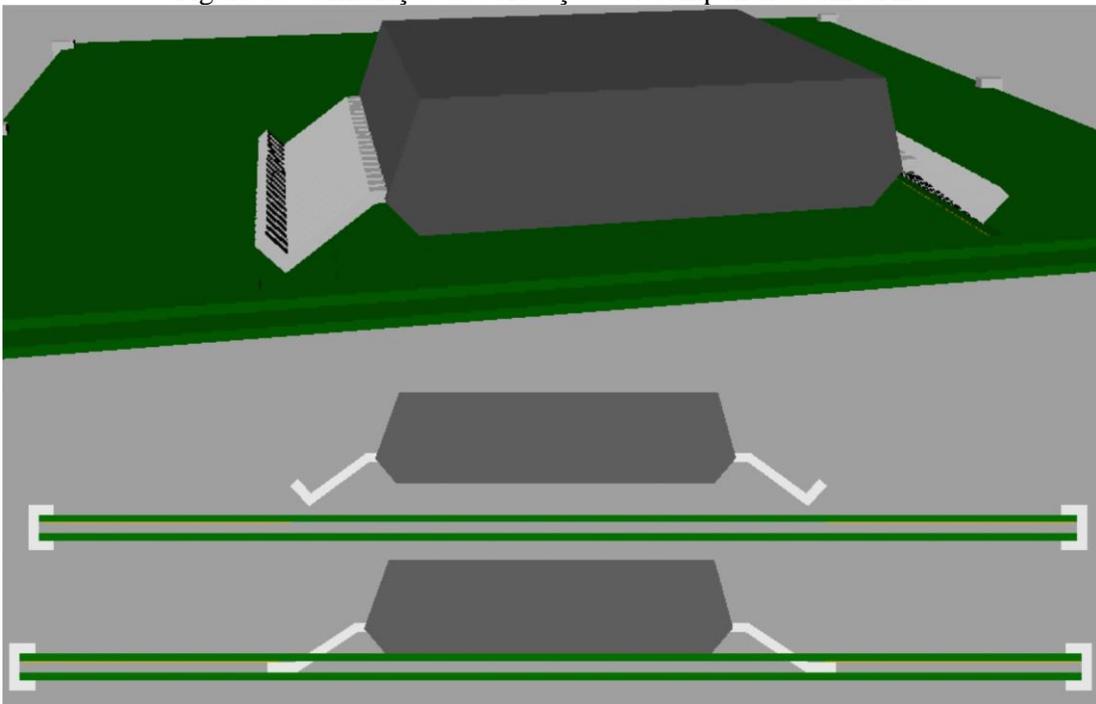


Figura 45 - Conceito de colocação dos componentes com o contato feito internamente.



A partir deste conceito foi gerada uma outra alternativa, projetando a colocação destes componentes. A primeira, figura 46, mostra a colocação dos componentes “Through-hole”, que teriam suas hastes alteradas para facilitar a montagem dos elementos de junção criados para estes dispositivos.

Figura 46 - Simulação da colocação dos componentes em CAD.



Na figura 47 é apresentado o conceito com uma abertura na placa para cada componente, permitindo a colocação destes componentes, principalmente os componentes

“SMD”, que estão colocados na mesma face que o desenho do circuito. E na figura 48 encontram-se resumidamente as propostas realizadas.

Figura 47 - Simulação da colocação dos componentes em CAD.

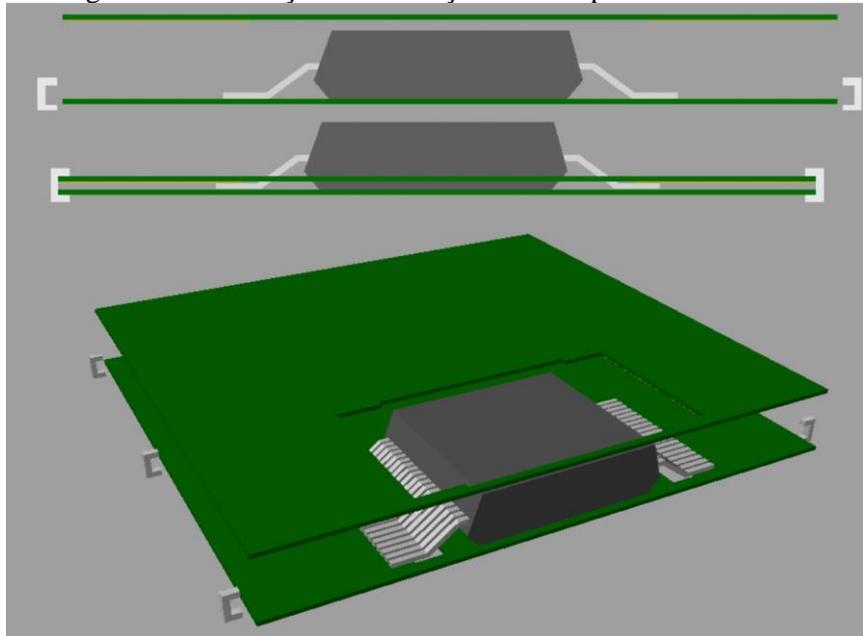
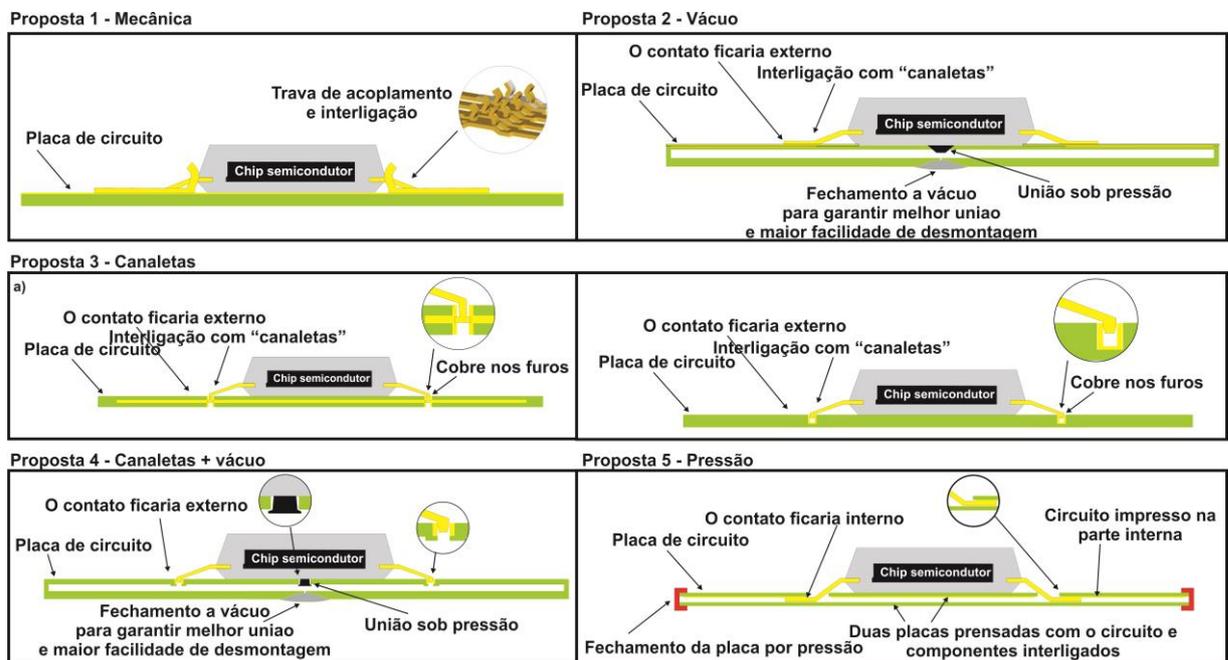


Figura 48 - Propostas realizadas para a fixação dos elementos.



A partir das propostas geradas, resumidas na figura 48, foi possível realizar uma análise verificando as diretrizes do projeto, que são a fixação mecânica, a continuidade do circuito eletrônico, a facilidade da desmontagem e a baixa quantidade de uso de materiais (tabela 13).

Tabela 13 - Análise dos conceitos gerados em relação às diretrizes do projeto.

	Possibilidade de fixação mecânica			Possibilidade de continuidade do circuito eletrônico			Facilidade de montagem/desmontagem			Baixa quantidade de materiais			Total de pontos
Proposta 1	■	■	□	■	■	□	■	□	□	■	□	□	6
Proposta 2	■	□	□	■	□	□	■	■	□	■	■	■	7
Proposta 3	■	■	□	■	■	□	■	■	□	■	■	□	8
Proposta 4	■	■	■	■	■	□	■	□	□	■	■	■	9
Proposta 5	■	■	■	■	■	□	■	■	□	■	■	■	10

A partir da análise chega-se a conclusão conforme os critérios, que a melhor alternativa com melhores características foi a proposta 5, a qual foi selecionada para se prototipar e realizar os testes iniciais. Esta alternativa projetada possui os pré-requisitos pensados como fundamentais para o projeto, utilizando a fixação mecânica como elemento de união e conexão eletrônica sob pressão, utilizando uma quantidade de materiais menor em relação as outras alternativas e a facilidade de montagem e desmontagem em relação às técnicas atuais.

4.3. Considerações parciais

Os resultados obtidos nessa etapa revelaram em relação aos materiais, a complexidade desta composição e a grande diferença entre cada tipo de placa de circuito impresso. Essa etapa evidencia também a importância dos fabricantes terem estes dados quando se pensa em trabalhar na avaliação do ciclo de vida. Em relação aos materiais mostra-se mesmo tendo um peso relativamente pequeno em massa, as ligas metálicas utilizadas nas soldas geralmente têm metais considerados tóxicos e isso pode se tornar um grande problema no volume que se tem dos produtos eletrônicos. Isso implica em relação às questões ambientais, que esta pequena quantidade misturada a um resíduo doméstico de classe menos perigosa acaba por tornando toda a mistura em um resíduo perigoso, mudando a classe e assim seu destino e tipo de transporte, gerando um custo elevado econômico e ambiental.

Já em relação aos elementos de fixação, sendo o principal elemento encontrado nas placas de circuito impresso a solda, evidencia-se que as placas em si possuem um sistema ineficaz de separação para posterior reutilização e/ou reciclagem, pois é um método de união

permanente. Estas análises permitiram entender a complexidade das placas de circuito impresso em relação aos materiais e sistemas de fixação e serviu de subsidio para a geração de ideias em relação a novos métodos de fixação.

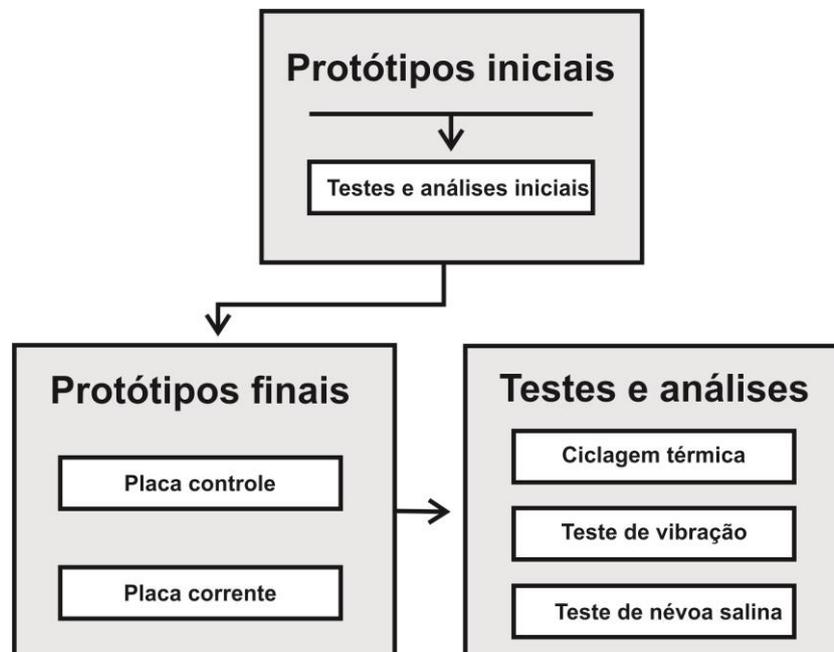
Em relação às propostas de novos meios de fixação, nota-se que há uma grande gama de possibilidades e de estudos que podem ser realizados propondo novos métodos de fixação. Ao mesmo tempo torna-se complexo pela diversidade de PCIs e pelos diferentes níveis de confiabilidade de aplicação destas. Outra questão importante foi de propor uma alternativa que não alterasse os formatos padrões dos componentes eletrônicos. Assim, das propostas iniciais, a proposta que teve uma análise inicial mais positiva em relação a estes aspectos foi o método de fixação sob pressão dos componentes com outra placa, exercendo a fixação e conexão eletrônica necessária. Assim, na próxima etapa do trabalho foram gerados protótipos para teste, conforme está apresentado no capítulo 5.

5 PROPOSTA FINAL: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

5.1. Materiais e métodos

Neste capítulo é apresentada a proposta final, sendo no item 5.1.1 explicada a obtenção dos protótipos iniciais e no item 5.1.2 os testes e análises iniciais, de inspeção visual e de funcionamento. Como consequência destas análises, foram elaborados os protótipos finais apresentados no item 5.1.3. E na última etapa, item 5.1.4., são explicados os testes e análises finais (testes de ciclagem térmica, vibração e de névoa salina) conforme fluxograma apresentado (figura 49).

Figura 49 - Fluxograma do processo de protótipos e análises.



5.1.1. Protótipos iniciais

Foram confeccionadas placas para a realização de testes de viabilidade técnica, analisando-as visualmente e funcionalmente, realizadas na Universidade UPC - *Universitat Politècnica de Catalunya*, no Campus de *Vilanova I La Geltrú*, nos laboratórios da engenharia elétrica. Para isso foi definido um circuito simples para ser aplicado na placa e os componentes para serem fixos, com o objetivo inicial de testar a proposta em relação à resistência elétrica em cada ponto de contato ente os elementos fixos. Este primeiro teste foi realizado como objetivo inicial de ter um parâmetro inicial de projeto. Para a fixação foram

utilizados parafusos pois são elementos de fácil montagem e desmontagem, não utilizando um outro material como elemento de fixação, não ocorrendo a contaminação de material.

Foram utilizados para o protótipo inicial, uma placa fotossensível positiva de duas faces, dimensões 100x160mm, de fibra de vidro com resina epóxi (FR4), sendo resistente ao fogo e isolante, que possuía nas duas faces uma fina película de cobre condutor e de 11 componentes, “Through-hole” e 4 “SMD” para testar as duas tecnologias de fixação mais utilizadas.

Resumidamente o fluxograma do novo processo de confecção da placa está mostrado na figura 50, colocando que o processo inicial é mantido igual ao processo tradicional, onde é realizado um conjunto de procedimentos que resulta em uma placa com tamanho, filetes e furações adequadas à montagem de um circuito eletrônico. Acrescentou-se a colocação de outra placa, componentes de união (parafusos) para pressionar os componentes para fixação e conexão dos elementos e um material para isolamento entre as placas. A confecção de uma placa de circuito impresso envolve uma sequência de procedimentos, realizados a partir do projeto pré-elaborado:

1. Placa de fibra de vidro: FR-4 (ou FR4) é um material compósito constituído por tecido de fibra de vidro com uma resina epóxi ligante que é resistente à chama (*auto-extinção*). Foi adquirida pronta.

2. Transferência do layout e corrosão da placa: O projeto do desenho do circuito onde são fixados os componentes eletrônicos foi simulado em CAD no software Rhinoceros (MCNEEL, 2010), depois realizado no software Altium Designer Summer 09 (ALTIUM, 2013) e após impresso em filme poliéster. Após foi impresso em filmes poliéster a imagem do circuito para depois ser feita a exposição utilizando raio ultravioleta, transferindo o desenho do filme poliéster para a placa. Após é realizada a corrosão, onde é o processo químico que retira da chapa o cobre que não está coberto por tinta. A corrosão é feita normalmente por um preparado químico denominado percloroeto de ferro ou ácido nítrico. Este é um sal com teor ácido que, dissolvido em água, realiza a retirada do cobre das regiões desprotegidas da placa. Nos processos industriais o ácido é colocado sobre a face cobreada da placa. O resultado é a formação de trilhas de cobre que percorrem a placa. As trilhas, chamadas de “filetes”, serão responsáveis pela interligação dos componentes que compõem o circuito. Após a corrosão, a face da placa deve ser “selada” com um produto que evite a oxidação.

3. Furação e rebarbas: Após a selagem, a placa é furada para a colocação dos componentes e também para a fixação.

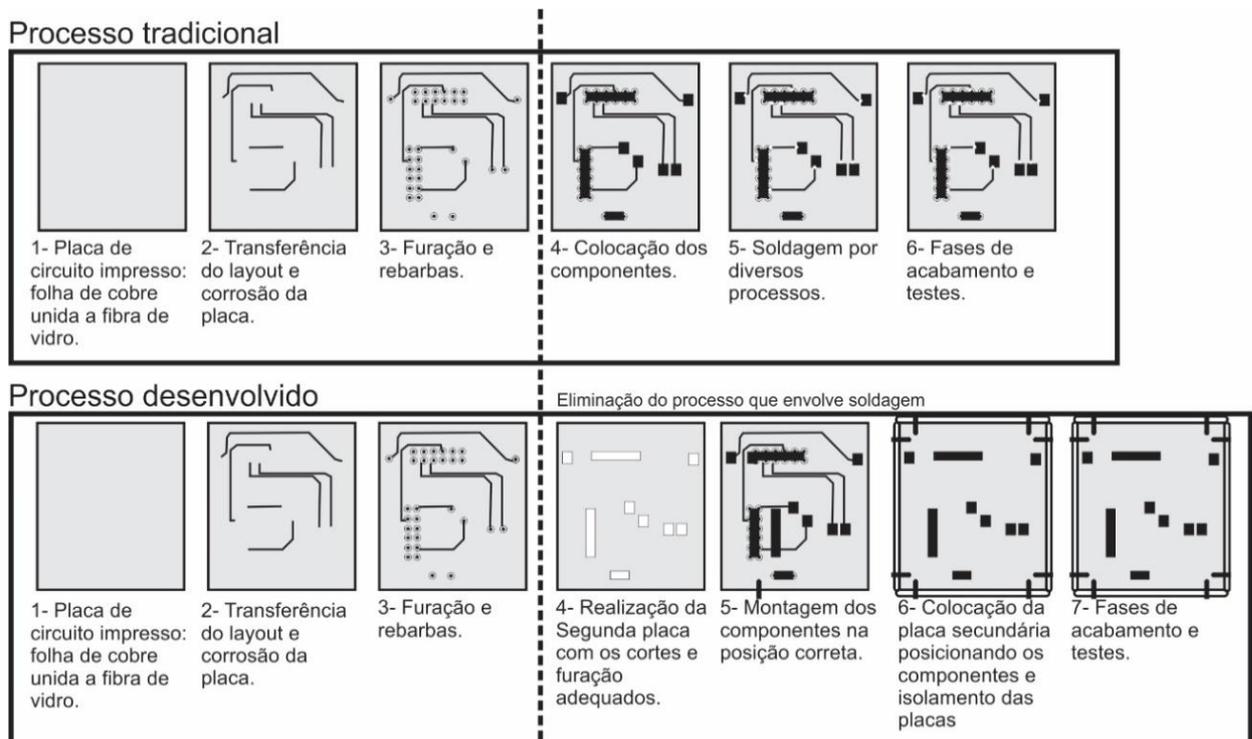
4. Realização da segunda placa: Corte da placa do mesmo tamanho da placa base que irá pressionar os componentes, com a furação adequada. Podem-se utilizar materiais como a placa base, como fibra de vidro, como também placas de polímeros diversos que contenham características adequadas ao projeto e sejam fáceis de fabricação. Estas placas são furadas para posicionamentos dos componentes eletrônicos como também de outros elementos para fixação sobre a placa base, permitindo uma fixação sobre pressão maior.

5. Montagem dos componentes: Tanto os componentes “*PTH-Plated Through Hole*” e “*SMD-surface-mount device*” podem ser fixados. Para os componentes PTH é necessário dobrar as hastes dos componentes colocando estas hastes posicionadas sobre as trilhas de cobre. Já os componentes SMD são colocados na outra face onde se encontram as trilhas colocando-os nas posições corretas.

6. Colocação da placa secundária: Após a colocação dos componentes, foi montada a segunda placa sobre estes e colocados outros elementos para fixar o conjunto. Nesta etapa é realizado o isolamento entre as placas com um material elastômero para evitar a entrada de ar e umidade entre as placas, permitindo uma selagem maior entre as mesmas, evitando a corrosão. Esta etapa de isolamento não foi utilizada para os testes iniciais.

7. Fase de acabamento e testes: Na última etapa realizam-se acabamentos quando necessários e testes comumente utilizados, visuais e funcionais.

Figura 50 - Fluxograma do processo da produção da PCI



O processo proposto foi desenvolvido com base em estudos de uma placa de circuito impresso com diversos materiais presentes, identificando a dificuldade da separação e identificação destes materiais. Foram realizados protótipos com o método tradicional de montagem com a utilização da solda, tanto com a presença de chumbo (Sn-Pb) como a *Lead-Free* (livre de chumbo), e com o método proposto, permitindo comparar a diferença de montagem e desmontagem, o funcionamento das mesmas e realizando testes iniciais visuais e de continuidade do circuito. Para estes primeiros protótipos não foram realizados isolamentos entre as placas com um material elastômero.

A partir destes protótipos, foi projetado um novo desenho de circuito com acionamento de lâmpadas LED, para então testar o funcionamento deste sistema de fixação com maior rapidez. Além da placa proposta, com o objetivo de comparar o sistema de fixação proposto com os sistemas de fixação a partir da solda, foram realizados três protótipos utilizando o mesmo método de produção descrito anteriormente. O primeiro protótipo utilizado como método de união a solda estanho-chumbo (60Sn-40Pb), o segundo a solda *Lead-Free* (99,3Sn-0,7Ag) e no outro o método de união a ser testado. Para facilitar a montagem manual da segunda placa colocada sob pressão, foi utilizada uma placa de acrílico para melhor visualização depois de montada. Isto foi realizado tendo como objetivo comparar os diferentes procedimentos e acabamentos das placas, mostrando a diferença entre elas e realizar os testes visual e funcional. Foi projetado um circuito com componentes tanto SMD como Through-hole para testar ambos os tipos utilizados atualmente. Foram usados: 10 resistências (5 do tipo SMD e 5 through-hole), 10 LEDs through hole, 10 chips (5 do tipo SMD e 5 through-hole) e uma bateria conectada a este sistema para verificar o funcionamento do mesmo.

5.1.2. Testes e análises iniciais

- Inspeção visual

Nesta etapa as placas foram avaliadas visualmente em busca de algum erro de montagem dos componentes, tanto as placas soldadas como também a placa montada sobre pressão onde as hastes dos componentes precisam estar posicionadas de forma precisa.

- Análise de funcionamento

Além de visualmente avaliadas em busca de erros na montagem e confecção do circuito, as placas foram acionadas para testar o funcionamento, ligando-se as lâmpadas LEDs com o uso de uma bateria de 9V.

5.1.3. Protótipos finais

Com os resultados e análises dos protótipos iniciais, foram desenvolvidos os protótipos finais para serem caracterizados e testados. Nesta etapa apresentam-se as placas finais obtidas, sendo de dois tipos. A primeira intitulada “placa Controle” foi utilizada para o controle no teste de ciclagem térmica de todas as outras placas, sendo confeccionado uma. E a outra intitulada de “placa Corrente” que foi a testada com os diferentes métodos de fixação, Sn-Pb, *Lead-Free* e Conceito sob pressão. Após o projeto desenvolvido, as placas finais foram realizadas na empresa Casa do Circuito de Caxias do Sul (<http://www.casadocircuito.com.br/>). Os componentes eletrônicos foram adquiridos em diferentes lojas e a montagem final na empresa Tecnoflex situada em Cachoeirinha (<http://www.tecnoflex-rs.com.br/>).

- Placa controle

Na etapa de obtenção dos protótipos iniciais, uma das questões levantadas foi a necessidade do aumento da intensidade da corrente elétrica da placa Corrente para 1 A para possibilitar uma análise com resultados com maior precisão no teste de ciclagem térmica. Então foi necessário o desenvolvimento da placa Controle para monitorar o funcionamento das mesmas durante o teste de ciclagem térmica, teste de continuidade das placas. Estas foram obtidas de laminado fibra-FR4 com espessura de 1,6mm e solda de Sn-Pb. No quadro 5 apresentam-se os componentes utilizados para confecção desta placa e na figura 51 a placa Controle.

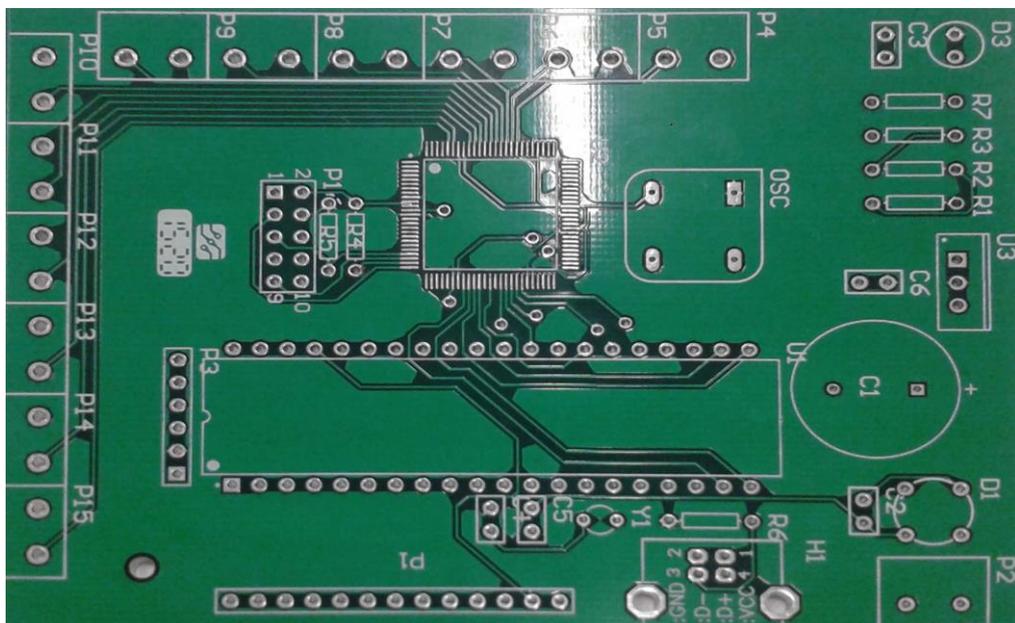
Quadro 5 - Componentes de cada placa Controle.

Componente	Característica	Tipo	Quantidade
Circuito integrado – U1	PIC 18F4550	Through-hole	1
Circuito integrado – U2	Max II EPM240T100C5	SMD	1
Circuito integrado – U3	LM317	Through-hole	1
OSC	OSC 1MHz	Through-hole	1
H1	Conector USB B	Through-hole	1
Resistor – R1	220 Ω 1/4W	Through-hole	1

(conclusão)

Componente	Característica	Tipo	Quantidade
Resistor – R2	330 Ω 1/4W	Through-hole	1
Resistor – R3	33 Ω 1/4W	Through-hole	1
Resistor – R4	1 k Ω 1/4W	Through-hole	1
Resistor – R5	10 k Ω 1/4W	Through-hole	1
Resistor – R6	1,5 K Ω 1/4W	Through-hole	1
Resistor – R7	100 Ω 1/4 W	Through-hole	1
Diodo – D1	Ponte de Diodos W04M	Through-hole	1
Diodo – D3	Led Vermelho 5mm	Through-hole	1
P1	Barra de Pinos Fêmea Simples 13	Through-hole	1
P3	Barra de Pinos Macho Simples 6	Through-hole	1
P2, P4 ao P15	Conector KRE-2	Through-hole	12
P16	Barra de Pinos Macho Dupla 5	Through-hole	1
XTAL	20 MHz	Through-hole	1
Capacitor 1	2200 μ F 50V	Through-hole	1
Capacitor 2	100 nF	Through-hole	1
Capacitor 3 e Capacitor 6	100 pF	Through-hole	2
Capacitor 4 e Capacitor 5	15 pF	Through-hole	2

Figura 51 - Placa Controle confeccionada usada para o monitoramento da ciclagem térmica.



- Placa Corrente

Foram confeccionadas 39 placas corrente ao todo, sendo utilizadas 3 placas de cada tipo de fixação para cada teste. Foi utilizado um laminado de fibra-FR4 com espessura de 1,6 mm e no quadro 6 apresentam-se os componentes. Resumidamente foram obtidos os seguintes protótipos:

- 12 Protótipos placas com a solda Sn-Pb;

- 12 Protótipos placas com a solda *Lead-Free* 98.9-Sn-0.7Cu-0.3Ag-0.1Bi da empresa ALPHA® (an Alent company).
- 15 Protótipos Conceito: Protótipos realizados sob pressão sem solda com isolamento.

Para a obtenção das placas do protótipo Conceito, foram primeiramente confeccionadas placas com recortes para a colocação de componentes do tipo SMD e com os furos para colocação dos parafusos. Após foi utilizado um adesivo “Jet-melt 7089” da empresa 3M para o isolamento e fechamento das duas placas nas laterais. Este é um adesivo tipo “*hotmelt*” (fusão a quente) à base de resinas e borrachas sintéticas e possui os seguintes dados técnicos: Cor: Âmbar; Viscosidade: 4.500 - 5.500 mPas; Ponto de amolecimento: 93 – 103 °C; Peso específico: 0,94 – 0,97 g/cm³; Temperatura de aplicação: 185 - 195 °C e tempo de trabalho: 1 - 15 segundos (3M COMPANY, 2015). Para o teste de névoa salina foram confeccionadas 6 placas com o isolamento de Jet-melt 7089 e mais com silicone para fechamento dos componentes, isolando a entrada da água entre as placas. O silicone tem as seguintes características: Densidade: 0,97 g/mL e Resistência à temperatura, depois de curado: de -50 até +120 °C (UNIFIX, 2015). Para todas as placas corrente foram utilizados os componentes apresentados no quadro 6 e na figura 52.

Quadro 6 - Componentes de cada placa.

Componentes	Característica	Tipo	Quantidade
Resistor – R1	1k-1/4w	Through-hole	2
Resistor – R2	4k7-1/4w	Through-hole	1
Resistor – R3	2k2-1/4w	Through-hole	1
Resistor – R4	4R7-10w	Through-hole	1
Resistor – R5	10R-1/4w	Through-hole	1
Resistor – R6	3R9-10w	Through-hole	1
Capacitor eletrolítico – C1	1µF/16v	Through-hole	1
Capacitor poliéster – C2	1nF/50v	Through-hole	1
Capacitor poliéster – C3	100nF/50v	Through-hole	3
Capacitor eletrolítico – C4	10µF/35v	Through-hole	1
Capacitor poliéster – C5	10µF/16v	Through-hole	1
Transistor NPN – Q1	TIP41	Through-hole	1
Transistor PNP – Q2	TIP42	Through-hole	1
Circuito integrado – U1	LM324	Through-hole	1
Circuito integrado, corrente hall – U2	ACS712-05	SMD	1
Circuito integrado – U3	LM7805	Through-hole	1
Diodo – D1	1N4007	Through-hole	1
Diodo – D2	1n4007	Through-hole	1
J1-J2-J3-J4	Barra de pinos Fêmea	Through-hole	1

Figura 52 - Placas corrente usadas para o teste de ciclagem térmica.

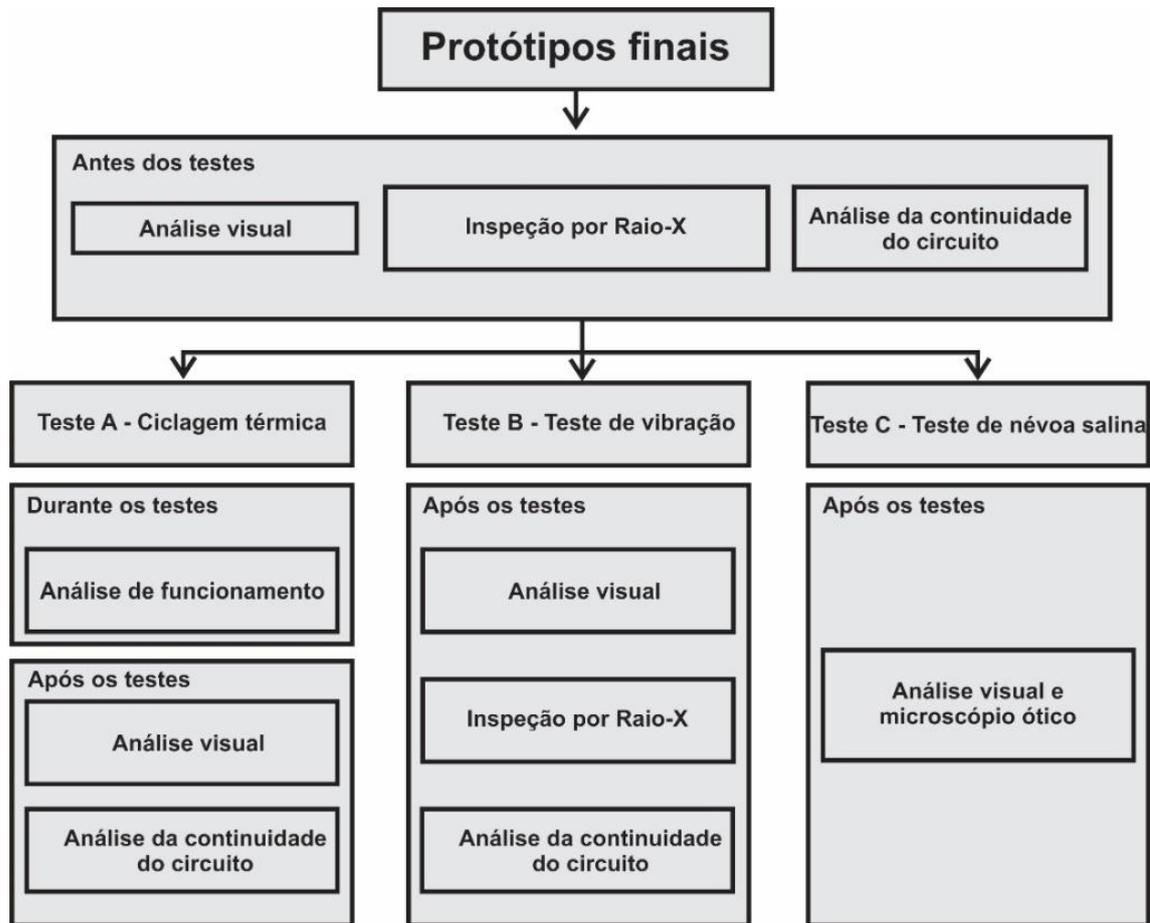


5.1.4. Testes e análises finais

Esta etapa consistiu em realizar os testes para averiguar a confiabilidade dos protótipos desenvolvidos comparando a solda Chumbo-Estanho, *Lead-Free* e a placa Conceito. Os testes finais foram realizados no Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (Itt Fuse) na UNISINOS, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Esse laboratório possui câmeras térmicas e climáticas que têm capacidade de ensaios para aceleração do tempo de vida com o uso de temperaturas elevadas, umidade, choque térmico, vibração e pressão.

Para definição dos processos, foram analisadas as normas da JEDEC – “Joint Electron Devices Engineering Council”, que é o órgão para padronização para a indústria de microeletrônica da EIA - “*Electronic Industries Alliance*”, aliança das Indústrias Eletrônicas dos Estados Unidos e da ASTM - American Society for Testing and Materials e também normas da IPC - Association Connecting Electronics Industries (Associação de Indústrias de Conexão Eletrônicas), que são detalhadas em cada teste. Na figura 53 apresenta-se o fluxograma de testes para as amostras. Antes dos testes são realizadas as análises visuais, inspeção por raios-X e de continuidade do circuito. Após foram realizados 3 testes, de ciclagem térmica, vibração e névoa salina e monitorando em cada análise os parâmetros específicos.

Figura 53 - Fluxograma das etapas de testes que foram realizados.



5.1.4.1. Avaliações realizadas antes dos testes

- Inspeção visual

Esta etapa consiste em analisar os protótipos realizados antes dos testes para verificação correta dos mesmos e permitir uma correta avaliação depois. Foi realizada a inspeção visual procurando identificar e localizar falhas nos contatos realizados e checar visualmente a existência de algum erro de montagem.

- Inspeção por Raios-X

Com esta análise buscou-se checar se há alguma imperfeição na colocação dos componentes ou delaminação de algum ponto da trilha como quaisquer outros erros de produção dos protótipos. Para os protótipos realizados sem solda, placa Conceito, mostrou-se necessário a utilização desta técnica para também analisar o componente SMD montado que

não fica visível na montagem. Este tipo de inspeção se tornou fundamental para validar as montagens antes dos testes e propor melhorias futuras. A análise foi realizada na máquina de Inspeção por Raios-X (figura 54), modelo XTV 160, fabricante Nikon X-Tek, equipamento com energia de até 160keV e resolução de até 0,5 μ m (NIKON METROLOGY, 2015). Capacidade de realizar tomografia computadorizada em amostras de até 50mm de lado. A exposição das amostras foi de: 89kV e 91 μ A.

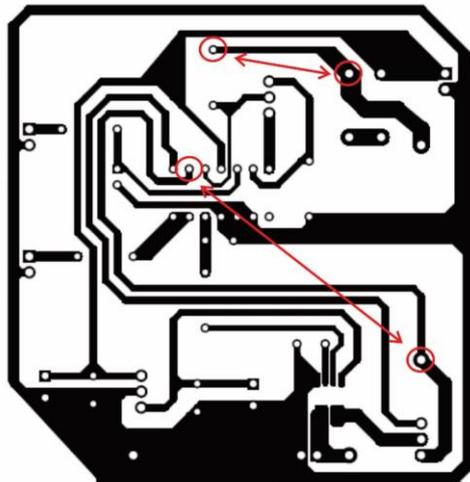
Figura 54 - Equipamento de máquina inspeção por raios-x.



- Análise da continuidade do circuito

Esta análise teve como objetivo checar o funcionamento correto das placas em si, permitindo determinar a integridade de todas as interligações elétricas, verificando a resistência elétrica entre os pontos mostrando a continuidade no circuito, conforme mostra dois exemplos na figura 55. Foram verificados todos os pontos de controle verificando com um multímetro modelo Fluke 179 True RMS Digital Multimeter (FLUKE CORPORATION, 2015) se há continuidade entre as trilhas, o que vai influenciar o funcionamento da placa e assim buscando identificar alguns pontos com falhas ou componentes com defeitos no circuito antes dos testes.

Figura 55 - Esquema mostrando os pontos de controle de continuidade.



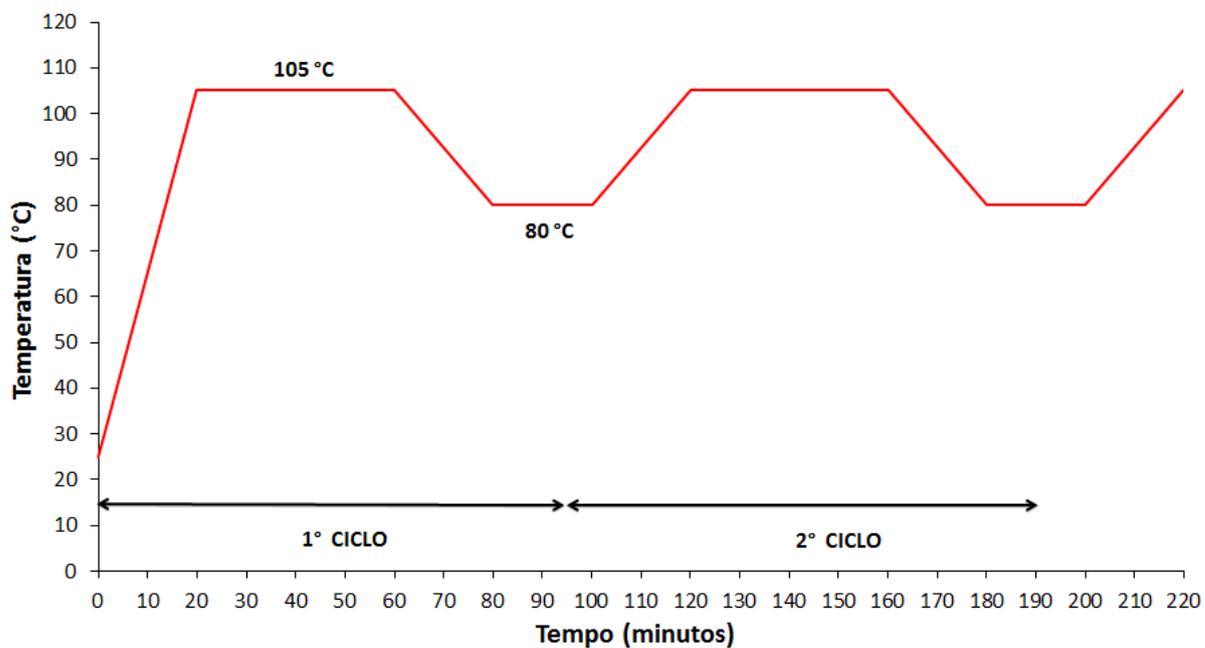
5.1.4.2. Teste de ciclagem térmica

Para este teste foi utilizada a norma IPC-9701A – “*Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments*” (IPC, 2006) e assim foi estabelecido um protocolo de monitoramento das placas, com ciclos de aquecimento e resfriamento. Para este ensaio pensou-se em analisar as placas em uma condição de alta temperatura para a categoria de produto proposto (categoria de confiabilidade produto classe 1), colocando estas em uma condição severa de funcionamento, que segundo Sharon e Tulkoff (2014) a permanência em temperaturas mais elevadas também causa mais danos do que longos períodos de permanência em baixas temperaturas.

As análises foram realizadas em equipamento de câmara climática modelo EQ-TH 392C da empresa ETSP da Coreia do Sul (ETSP, 2015). Neste teste foi possível ligar uma fonte externa de energia durante e assim colocar os protótipos em operação analisando o funcionamento tendo como dados a corrente de cada placa. Foi realizado o teste final de ciclagem térmica durante 100 ciclos com as amostras definitivas. Para este teste foram utilizadas 09 placas Corrente (~10cmx10cm) conectadas a outra placa (Controle) do lado de fora da câmara para monitoramento. Os experimentos foram conduzidos utilizando os parâmetros com a rampa de teste apresentada na figura 56:

1. Temperatura inicial: 80°C
2. Temperatura final: 105°C.
3. Rampa de aquecimento: 80°C até 105°C.
4. Rampa de resfriamento: 105°C até 80°C.
5. Velocidade de aquecimento e resfriamento: até 2°C/min.
6. Ciclo completo: 95 minutos cada ciclo.
7. Duração em ciclos: 100 ciclos (9500 min – 158,3hs).
8. Duração em tempo: 6,59 dias.
10. Avaliação e medição: Medição em tempo real através da placa Controle, salvo a cada 20 minutos, gerando 475 pontos de análise.
11. Massa aproximada da amostra: Placa com solda possui aproximadamente 56g e placa Conceito 94g, pesada na balança digital modelo 9094C/5 da marca Toledo.

Figura 56 - Rampa do teste de ciclagem térmica.



Na figura 57 apresenta-se a câmara de ciclagem térmica em funcionamento com as placas e do lado de fora a fonte da corrente de alimentação e o monitoramento realizado no software.

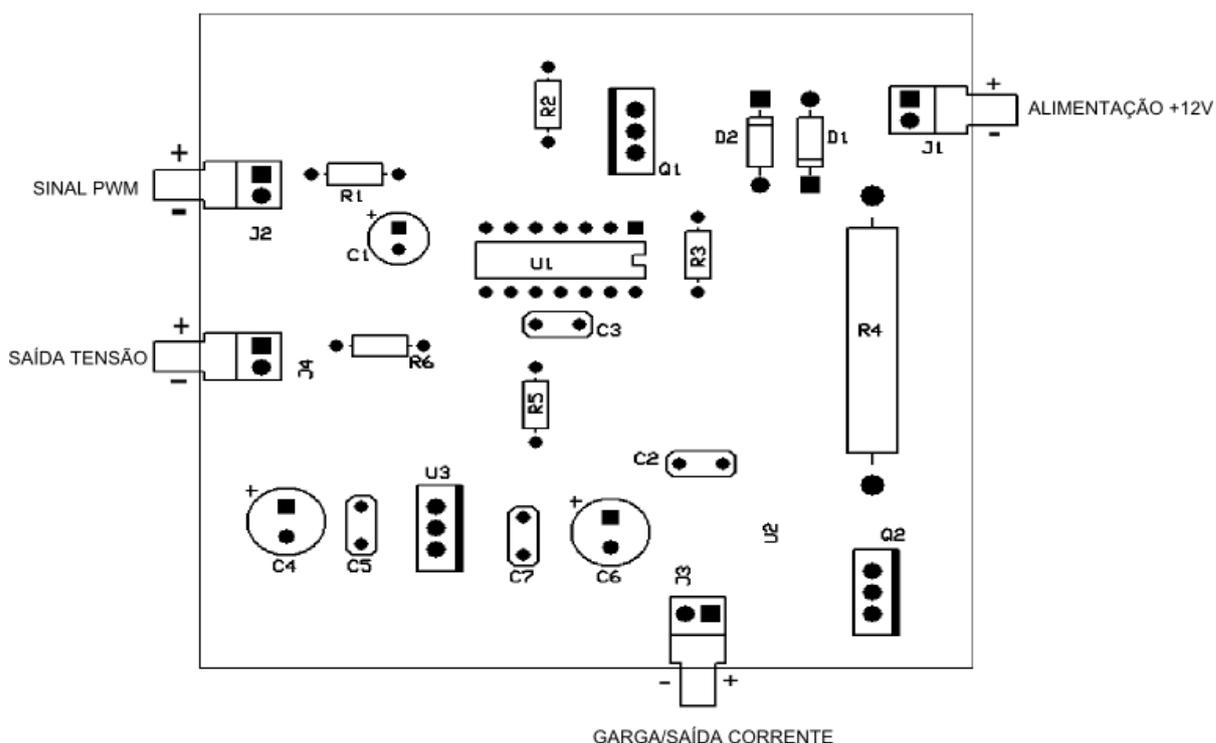
Figura 57 - Equipamento de ciclagem térmica.



Para o monitoramento destas placas durante o teste de ciclagem térmica foram realizados procedimentos, explicados a seguir com seus componentes na figura 58:

1. Conectar todos os cabos em todas as placas corrente na fonte de alimentação e na placa Controle;
2. Conectar a placa Controle no computador;
3. Alimentar a placa com 12VDC;
4. Aplicar um sinal de 0~5VDC na entrada “Sinal PWM”;
5. Na saída “Carga/Saída Corrente”, a placa Controle monitorava o valor da corrente gerada;
6. O conector J4, “Saída Tensão”, fornece o sinal de realimentação, sendo gerado pelo sensor de corrente de efeito Hall ACS715TELC-05B, sendo que o sinal possuía um offset de 2,5V com escala de 185 mV/A.

Figura 58 - Descritivo dos componentes para as placas corrente.



Durante o teste: Análise de funcionamento

Durante os testes de ciclagem térmica foi realizado o acompanhamento do funcionamento das placas através da Placa Controle durante o teste 2. Como resultado das 09 placas testadas em cada teste, 3 de cada tipo (Sn-Pb, *Lead-Free* e Conceito), se teve como resultado a corrente de cada placa em tempo real durante o teste. Este monitoramento foi realizado através de um software desenvolvido através do software *Embarcadero delphi* versão XE8 no laboratório de engenharia elétrica.

Após o teste: Inspeção visual

Após o teste de ciclagem térmica foi realizado uma inspeção visual em busca de algum problema visível constatado durante o teste em todas as 09 placas.

Após o teste: Análise da continuidade do circuito

Como última análise foi feita uma inspeção de cada ponto dos componentes através do multímetro para averiguar em cada placa possíveis problemas de continuidade no circuito e se alguma placa tivesse erro durante o funcionamento buscando saber em qual ponto de controle da placa que ocorreram problemas.

5.1.4.3. Teste de Vibração

Para o teste final de vibração ou também chamado “*shaker*” foi utilizada a norma JEDEC: JESD22-B103B – “Vibration, Variable Frequency” (JEDEC, 2002), condição de número 4, da tabela 7, no referencial teórico no item 2.2.5, técnicas empregadas para caracterização das placas. Os experimentos foram conduzidos no equipamento modelo MPA101-L315M 660 lbf (300 kgf) marca Ets Solutions (ETSSOLUTIONS, 2015), figura 20, utilizando os seguintes parâmetros:

1. Aceleração de pico G (“Peak acceleration”): 1.
2. Curva: Senoidal.
3. Frequência: 5/500 HZ.
4. Deslocamento: 0,5mm
5. Duração em ciclos: 2 horas em cada eixo (longitudinal, transversal e vertical).
6. Duração em tempo: 6 horas total.
7. Massa aproximada da amostra: Placa com solda possui aproximadamente 56g e placa Conceito 94g, pesada na balança digital modelo 9094C/5 da marca Toledo.

Para este teste foi confeccionado conjuntamente com o Itt Fuse Unisinos um suporte personalizado para as placas conforme as dimensões das mesmas no software Solidworks 2014 (figura 5). Este foi confeccionado com chapas de alumínio (5052-F) adquirido na empresa Metalthaga de Novo Hamburgo, RS e usinado no laboratório de CAD\CAE\CAM da engenharia mecânica da UNISINOS, conforme figura 59.

Figura 59 - Montagem do suporte para o teste de vibração no equipamento.



Após o teste: Inspeção visual

Foram realizadas análises das placas em busca de algum ponto com falha de montagem ou em algum componente eletrônico com problema detectado depois da montagem.

Após o teste: Inspeção por Raios-X

A análise de raios-x foi realizada nas placas após o teste de vibração para análise de problemas de montagem dos componentes ocasionados pelo teste de vibração, permitindo ver se haveria algum componente deslocado ou alguma outra imperfeição que possa ocorrer a falha da placa.

Após o teste: Análise da continuidade do circuito

A análise de continuidade do circuito foi realizada após o teste de vibração em todos pontos da trilha entre os componentes eletrônico a fim de averiguar pontos com problema de continuidade.

5.1.4.4. Névoa salina

Para o teste de névoa salina ou também chamado de “Salt spray”, foi utilizada a norma ASTM B117-11: *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus* (ASTM, 2011). O teste foi realizado no modelo Câmara de Corrosão Acelerada Cíclica – G1 marca Equilam (EQUILAM, 2015), mostrado na figura 60. O propósito do ensaio de corrosão acelerada é acelerar em laboratório a degradação associada à corrosão, neste caso placas de circuito impresso com três diferentes métodos de união, Sn-Pb, *Lead-Free* e Conceito

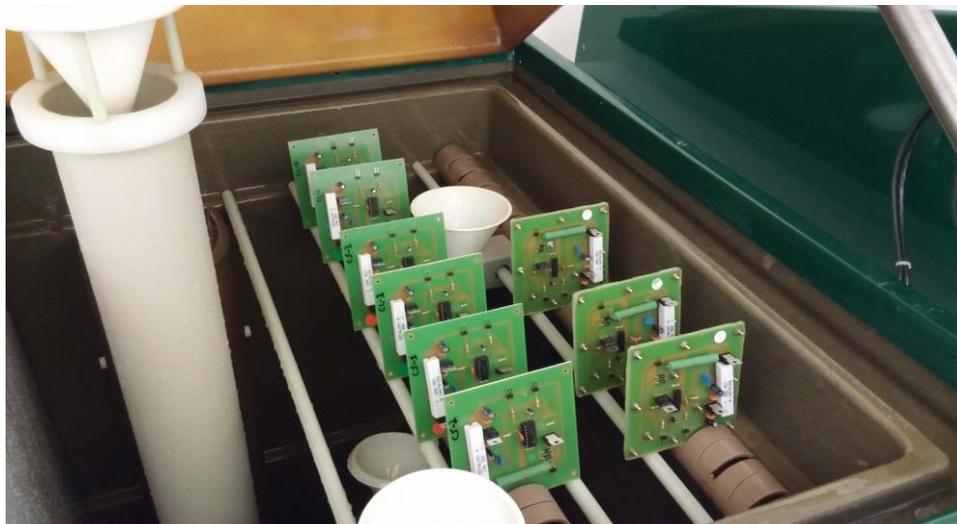
desenvolvida. Este ensaio é importante, pois evidencia o processo corrosivo em curto espaço de tempo, através da exposição do material a uma atmosfera bastante agressiva de cloreto de sódio (NaCl).

A norma dita que os itens a serem expostos em um ambiente úmido, que é composto de 5% de cloreto de sódio - NaCl (sal), por um período de 24 horas. Foi decidido expor a esta condição e depois expor as placas a duas condições mais extremas, de 96 horas e 240 horas e fazer as análises. Para este teste foram utilizados três corpos de prova para as placas Sn-Pb e *Lead-Free* e para a placa Conceito foram utilizados seis corpos de prova. Estas três placas além do isolamento de Jet-melt 7089 possuíam mais um elemento de fechamento, silicone neutro, para fechamento dos componentes, isolando a entrada da água entre as placas.

Após exposição dos materiais à câmara de névoa salina, os corpos de prova foram lavados com água destilada, para remover o excesso de cloreto de sódio remanescente, com posterior secagem. Resumidamente os experimentos foram conduzidos utilizando os seguintes parâmetros:

1. Temperatura do teste: $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
2. pH da solução: Oscila entre 6,5 e 7,2.
3. Umidade relativa: 100%.
4. Condição: Ambiente úmido composto de 5% de cloreto de sódio – NaCl.
5. Duração em tempo: Em 1 dia (24 horas) e em 4 dias (96 horas).
6. Análise: Após 24 horas de teste e após 96 horas com microscopia ótica.
7. Massa aproximada da amostra: Placa com solda possui aproximadamente 56g e placa Conceito 94g, pesada na balança digital modelo 9094C/5 da marca Toledo.

Figura 60 - Câmara de Névoa Salina com os protótipos.



Após o teste: Inspeção visual e microscópio ótico

Para o teste de névoa salina, a análise realizada posterior se resume a uma inspeção visual e microscopia ótica, buscando visualizar pontos de corrosão nas trilhas e nos componentes eletrônicos para verificar os pontos com maiores problemas para serem analisados. Na figura 61 mostra-se o equipamento de microscópio ótico marca Zeiss modelo Axio Scope.A1 Pol HAL 100.

Figura 61 - Equipamento microscópio ótico.



Nas figuras abaixo, 62 e 63, apresentam-se os pontos de análise e contagem para comparação entre os diferentes sistemas de fixação. Nas placas soldadas, ligas Sn-Pb e *Lead-free* foram analisados 63 pontos na parte frontal e 71 pontos na parte posterior totalizando 134 pontos (figura 62). Já nas placas sem solda, placas Conceito, foram analisadas além dos 134 pontos presentes mais 22 pontos das uniões, totalizando 156 pontos de análise (figura 63).

Figura 62 – Pontos avaliados nas placas com solda.

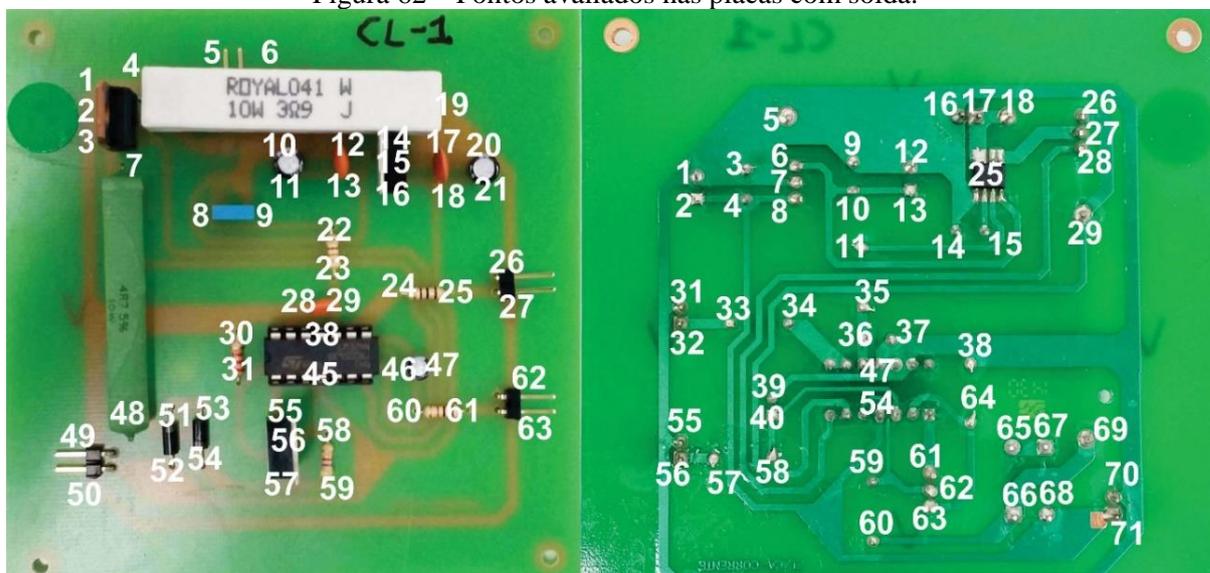
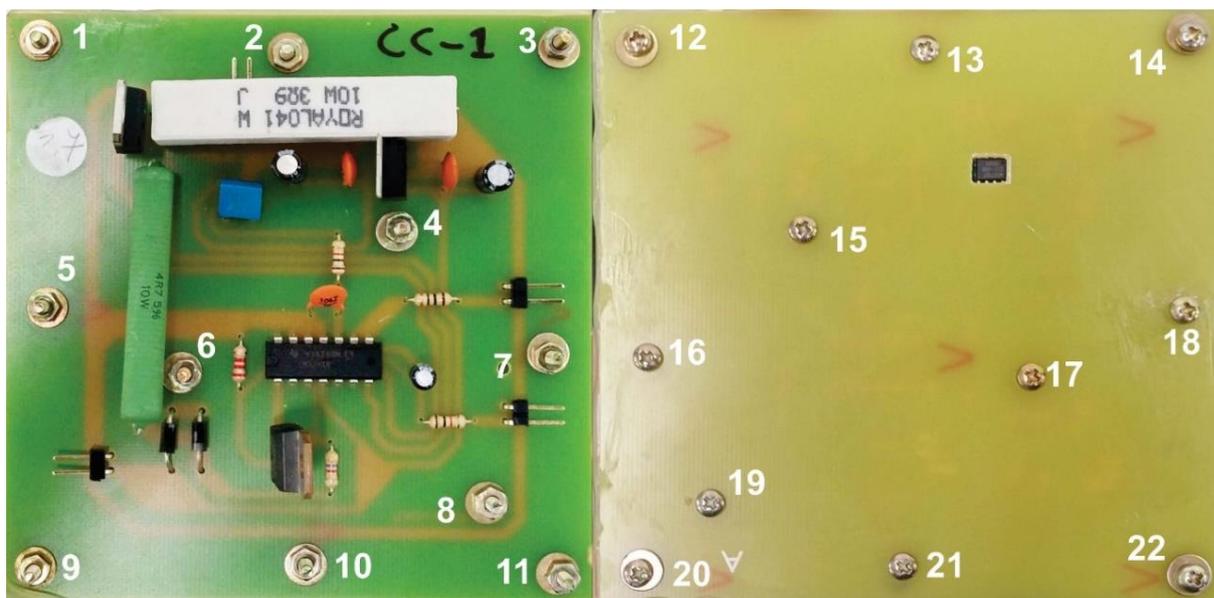


Figura 63 - Pontos que foram avaliados nas placas Conceito.



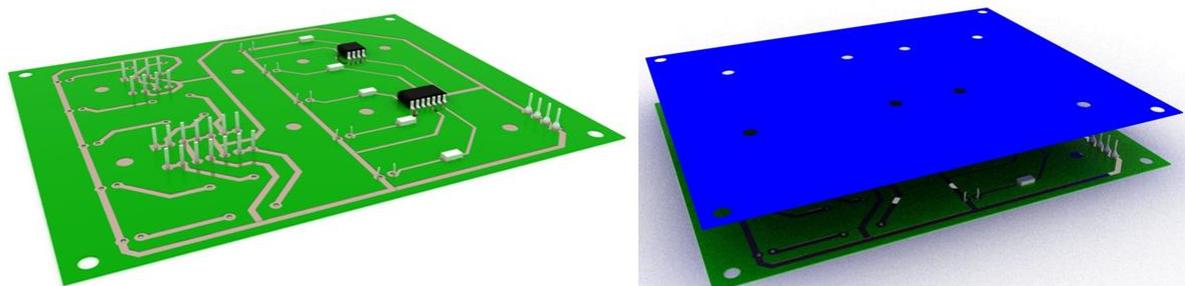
5.2. Resultados e discussões

Nesse item estão apresentados os resultados relacionados com o desempenho dos protótipos iniciais obtidos conforme o item 5.2.1, apresentado o resultado quanto à inspeção visual e ao funcionamento (item 5.2.2). No item, 5.2.3., estão apresentados os protótipos finais confeccionados, explicando os protótipos da placa Controle e da placa Corrente. E na última etapa, item 5.2.4., apresentam-se os testes e análises finais, de ciclagem térmica, vibração e de névoa salina.

5.2.1. Protótipos iniciais

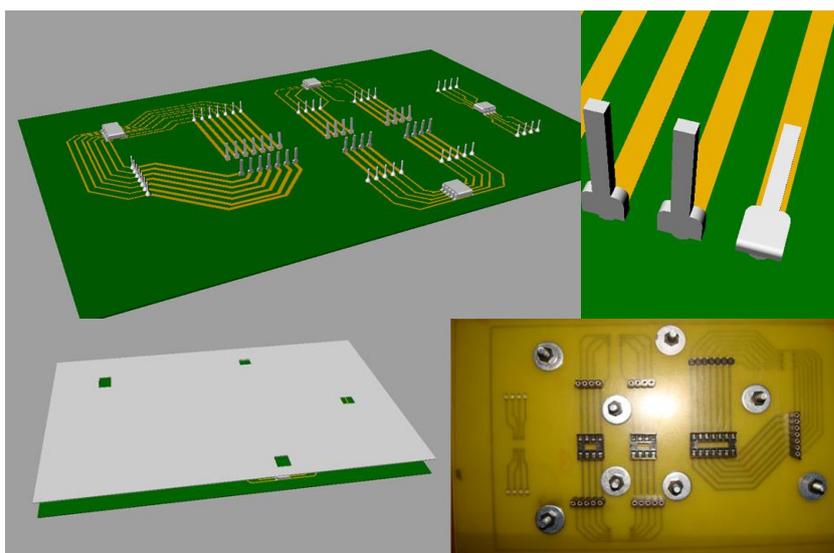
Nesta etapa foram confeccionadas placas para a realização de testes de viabilidade técnica, analisando os parâmetros técnicos definidos anteriormente, que foram a resistência mecânica, a fadiga térmica-mecânica, a corrosão e umidade e a condutividade elétrica. Nas figuras 64 e 65 apresentam-se os 3 protótipos obtidos, o primeiro protótipo utilizando como método de união a solda estanho-chumbo (60Sn-40Pb), o segundo a solda *Lead-free* (99,3Sn-0,7Ag) e no outro o método de união sob pressão sem a utilização da solda, Conceito. Para este último foi escolhido como elemento de fixação entre as placas o parafuso pois se trata de um elemento de fixação simples, tradicional, baixo custo e que tem a fixação necessária para pressionar as placas e mantê-las pressionadas.

Figura 64 - Protótipo da placa com o método de união desenvolvido.



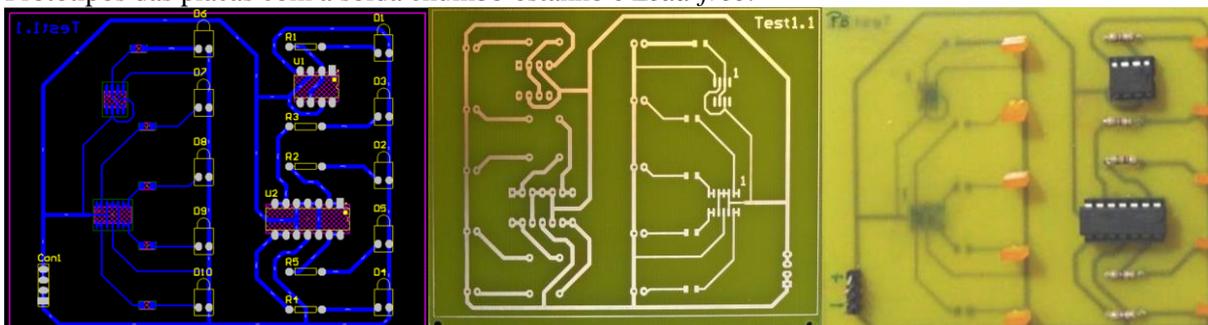
Como resultado os protótipos iniciais foram de dois tipos. Na figura 66 mostra-se primeiro a simulação no software Rhinoceros (MCNEEL, 2010) e montagem manual. Assim pode-se notar a montagem dos dois tipos de componentes, SMD e “Through-hole” onde estes têm as hastes dobradas para as trilhas de cobre.

Figura 65 - Placa em 3D realizada em software Rhinoceros 4.0 o protótipo da placa montada.



Com o objetivo de comparar o sistema de fixação proposto com os sistemas de fixação a partir da solda, foram obtidos os três protótipos utilizando o mesmo método de produção descrito anteriormente. O primeiro protótipo utilizado como método de união a solda estanho-chumbo (60Sn-40Pb), o segundo a solda *Lead-free* (99,3Sn-0,7Ag) e no outro o método de fixação sob pressão (placa Conceito). Em seguida, na figura 66, mostra-se o segundo protótipo obtido, onde foi projetado um novo desenho de circuito com acionamento de lâmpadas LED, testando o funcionamento da montagem instantaneamente, destacando se o sistema de fixação sob pressão estaria funcionando.

Figura 66 - Desenho do circuito e placa com o circuito proposto utilizando SMD e Trugh hole. Protótipos das placas com a solda chumbo-estanho e *Lead-free*.



A utilização da segunda placa por uma chapa de acrílico para facilitar a montagem manual foi acertada, pois facilitou a visualização, tornando-se mais rápida e precisa. Porém esta não tinha propriedades mecânicas adequadas para a fixação tendo problemas de trincas. Nota-se que é possível realizar diferentes simulações com o objetivo de diminuir ou terminar com a utilização da solda como forma de união e conexão eletrônica para as placas de circuito impresso.

5.2.2. Testes e análises iniciais

- Inspeção visual

Neste teste, verificaram-se visualmente as trilhas de cobre e as conexões entre a trilha e os componentes, buscando visualmente detectar possíveis erros. O resultado mostra alguns desalinhamentos entre as hastes e as trilhas de cobres como os únicos defeitos visíveis no sistema, figuras 67 e 68, sendo necessário analisar se estes desalinhamentos impossibilitavam o funcionamento correto.

Figura 67 - Protótipos das placas com a solda chumbo-estanho, *Lead-free* e placa Conceito.

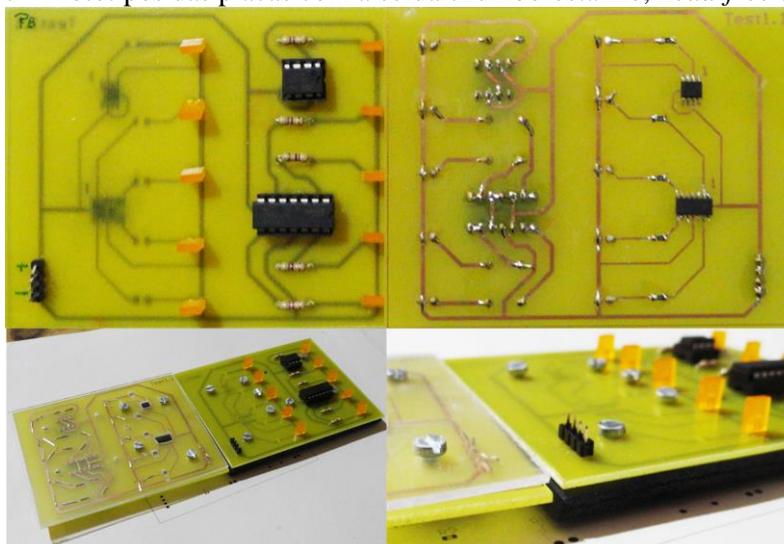
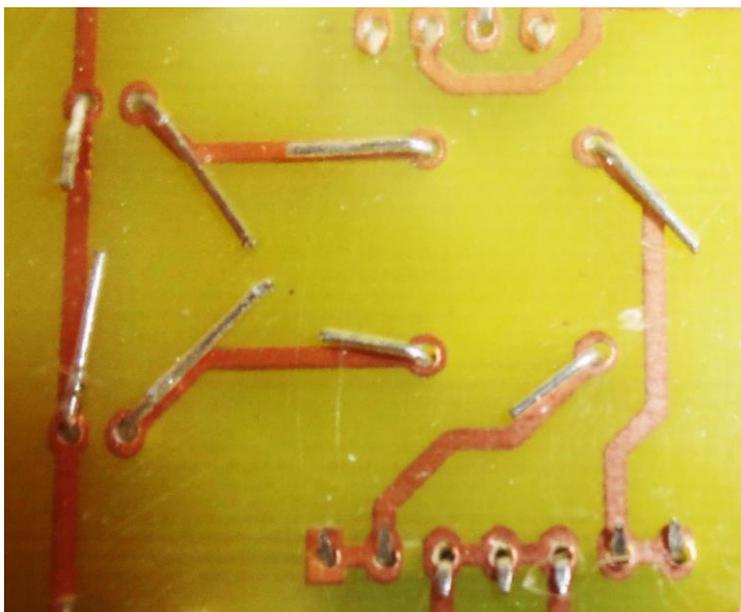


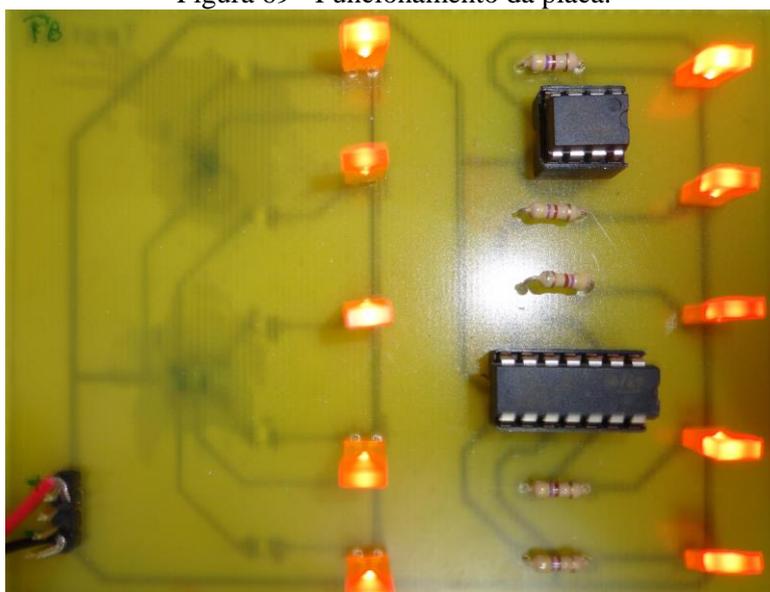
Figura 68 - Imagem das trilhas de cobre e das uniões realizadas com pressão.



- Análise de funcionamento

Neste teste foi averiguado o funcionamento do sistema, verificando este funcionamento em todos os pontos de conexão, com o acendimento dos LED's, figura 69. Notou-se que os LEDs acendiam e desligavam com o tempo, devido então a pressão realizada no sistema, fato que foi melhorado nos outros protótipos.

Figura 69 - Funcionamento da placa.



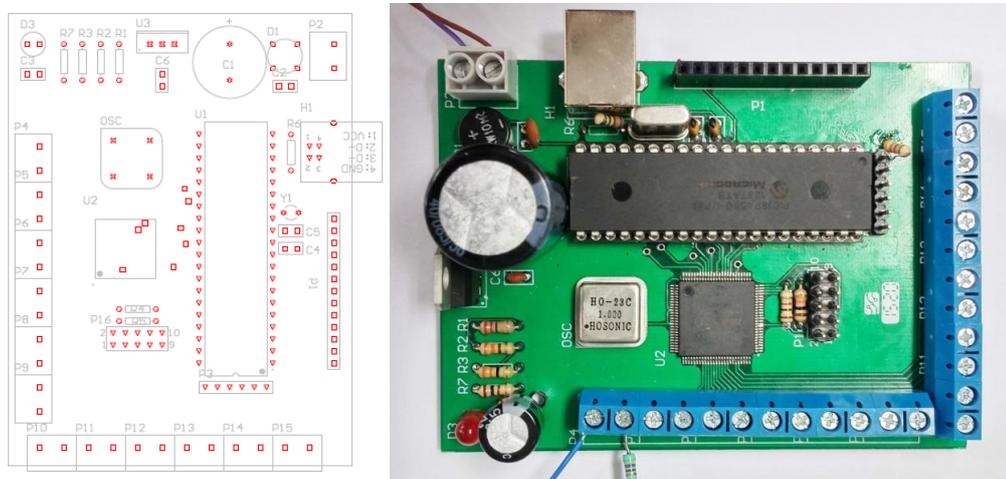
5.2.3. Protótipos finais

Nesta etapa apresentam-se os protótipos finais obtidos, sendo de dois tipos “placa Controle” e “placa Corrente”.

- Placa controle

A placa Controle foi projetada para monitorar o funcionamento das mesmas durante o teste de ciclagem térmica, tendo como medidas a corrente em A (Ampere). O desenho do circuito da placa e a placa se encontram abaixo, figura 70.

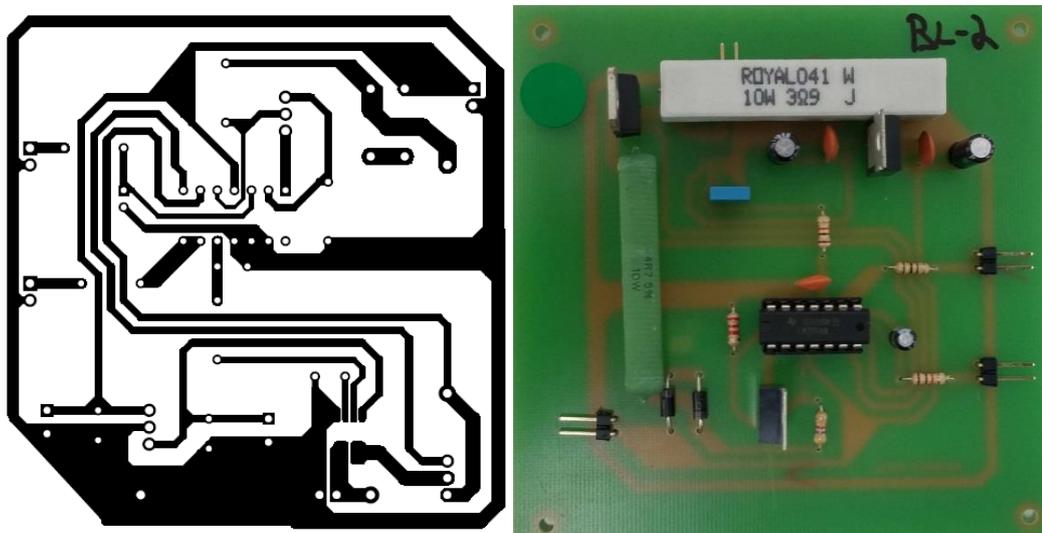
Figura 70 - Desenho do circuito e a placa Controle.



- Placa Corrente

Mostra-se na figura 71, o desenho do circuito da placa e a placa em si.

Figura 71 - Desenho do circuito e a placa Corrente.



5.2.4. Testes e análises finais

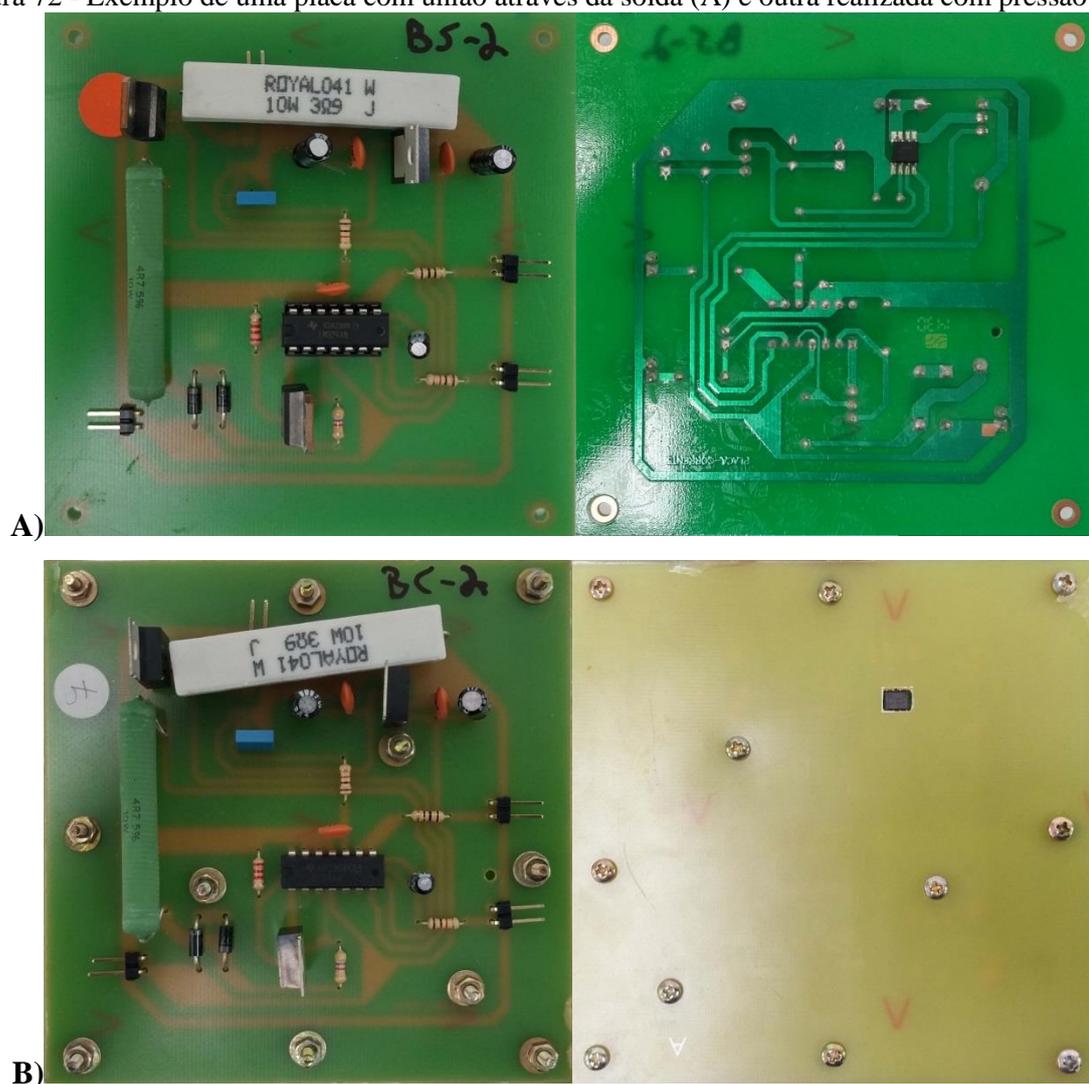
A seguir são apresentados os resultados e as respectivas discussões de cada etapa executada nos testes.

5.2.4.1. Avaliações realizadas antes dos testes

- Inspeção visual

Antes dos testes procurou-se detectar algum erro de montagem, como uma colocação errada dos componentes, uma soldagem defeituosa ou algum outro problema visível que pudesse ser corrigido antes dos testes. Verificaram-se visualmente as trilhas de cobre e as conexões entre a trilha e os componentes. Na figura 72 uma placa Sn-Pb e uma placa Conceito montada.

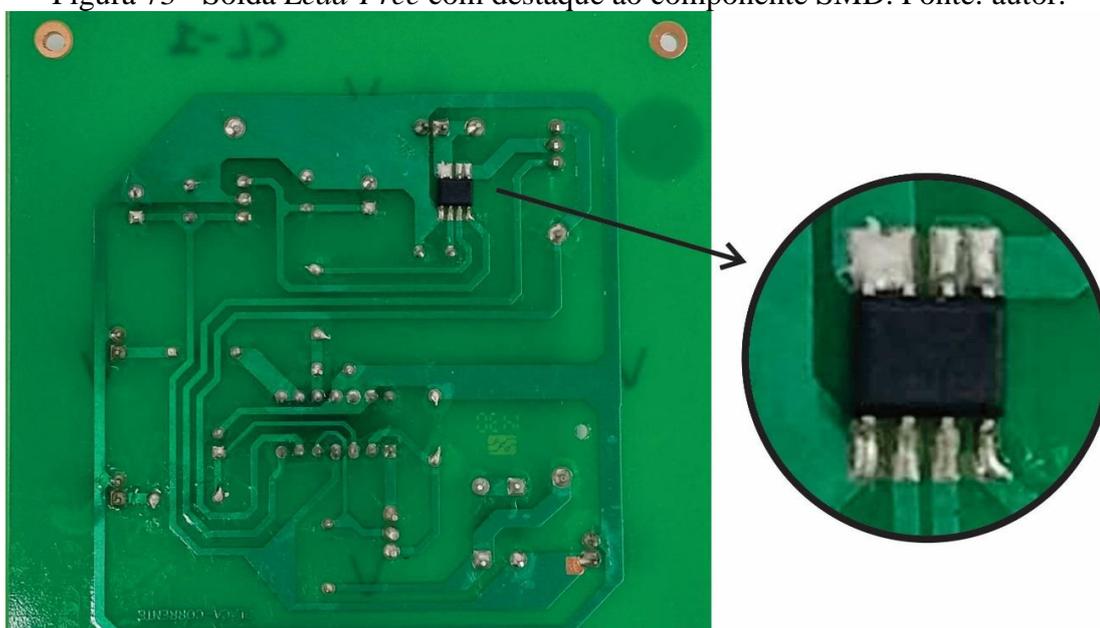
Figura 72 - Exemplo de uma placa com união através da solda (A) e outra realizada com pressão (B).



Como a montagem foi realizada pela empresa e acompanhada “*in loco*” pelo autor, alguns erros de montagem foram corrigidos, pois era um processo novo para a empresa. Os principais pontos de erros de montagem foram que os componentes têm tamanhos diferentes dos especificados no software de projeto, sendo que muitas vezes isso se deve a não achar o componente específico com a mesma padronização que o software especificou na quantidade necessária. Muitos componentes têm hastes de diferentes espessuras e tamanhos, dificultando a dobra da haste, muitas vezes complicando os contatos elétricos. Os principais componentes eram do tipo TIP (TIP 41 e 42).

Na inspeção visual o resultado demonstrou que visualmente não foram detectados defeitos ao sistema nas placas com solda ou sob pressão (placa Conceito) que impossibilitassem o funcionamento, mas alguns pontos chamaram atenção que depois foram averiguados na inspeção por raios-x e de continuidade. A primeira questão diz respeito aos componentes do tipo “TIP” devido a sua montagem ter sido complicada. O segundo sobre as placas com solda do tipo *Lead-Free* que mostraram alguns pontos com visíveis excessos de solda, principalmente nos componentes SMD, figura 73. Estes pontos de excesso de solda detectados podem ser de um processo mal executado pela empresa que montou as placas. Também havia alguns pontos com “respingo” de solda nas placas *Lead-Free* e estas diferenças visuais apresentadas entre as placas *Lead-Free* para as Sn-Pb mostram que o processo com o tipo de solda *Lead-Free* é realmente mais complicado e ainda não totalmente dominado no caso por esta empresa. Assim após a inspeção visual tornou-se necessária uma inspeção por raios-X para melhor visualização de todas as placas.

Figura 73 - Solda *Lead-Free* com destaque ao componente SMD. Fonte: autor.

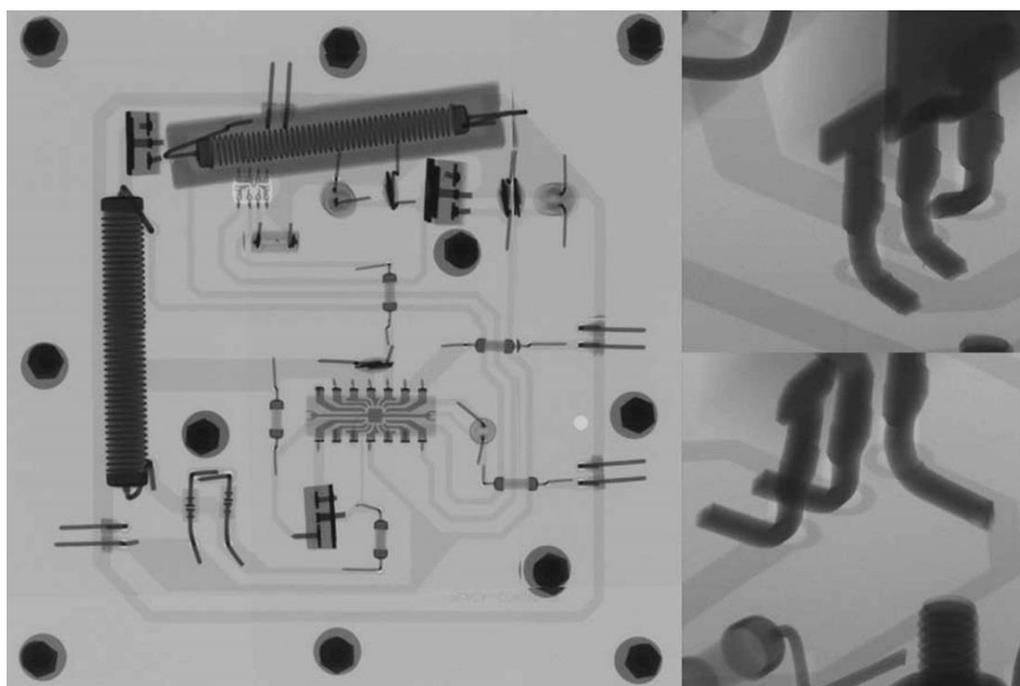


- Inspeção por Raio-X

As análises demonstraram que as placas com solda (Sn-Pb e *Lead-Free*) não apresentaram nenhum problema que pudesse interferir nos outros testes. Já nas placas montadas sob pressão (placa Conceito) os componentes SMD não mostraram nenhum problema. A utilização de componentes SMD se mostrou melhor para este tipo de montagem, porém tem a etapa de usinagem do local a ser posicionado, exigindo maior trabalho na preparação e montagem.

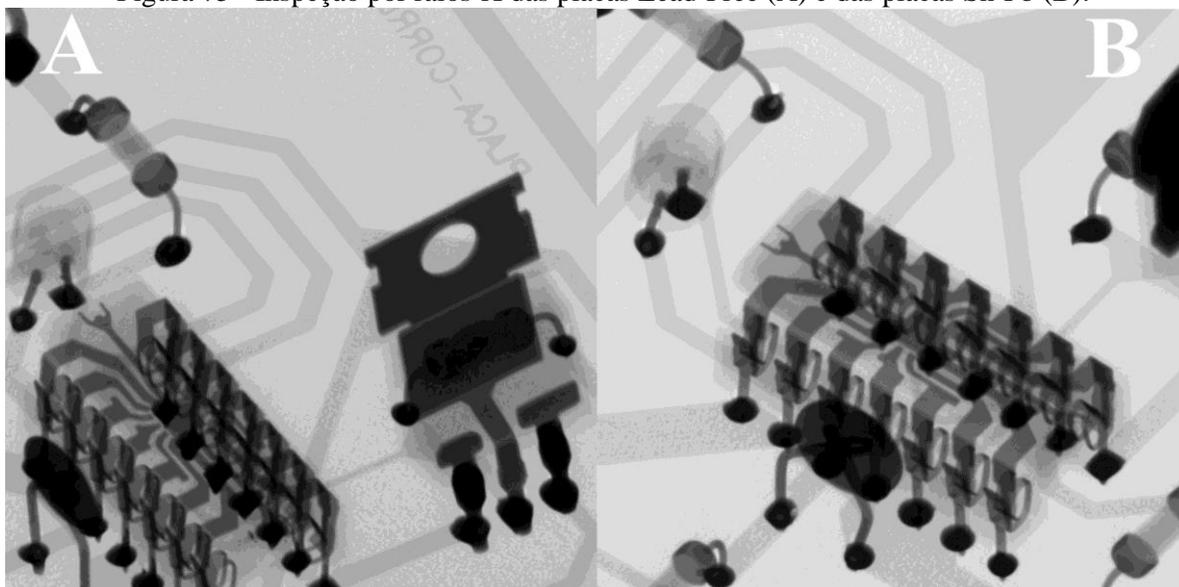
A questão problemática detectada nas placas Conceito demonstrada por este ensaio foram os componentes do tipo “TIP” (TIP 41 e 42) que possuem hastes com diferentes tamanhos e espessuras em relação aos outros componentes (Through-hole). Estes componentes acabam não tendo uma pressão adequada pela espessura das hastes, podendo interferir nos testes. Na figura 74 nota-se na placa Conceito os diferentes tamanhos e espessuras das hastes dos componentes e problemas de montagem. Isso se resolveria aplicando uma pressão naquele ponto maior, por exemplo, colocando outro ponto de fixação perto de cada elemento o que era inviável nesta placa. Outra possibilidade seria realizar o furo menor e metalizado possibilitando a continuidade do circuito sem erro. Na inspeção por raios-x não se teve uma conclusão definitiva e foi necessária a análise de continuidade que logo depois foi feita em cada ponto da trilha de cobre.

Figura 74 – Avaliação por Raios-X dos componentes do tipo “TIP” com hastes sem uma pressão excelente para a placa Conceito. Fonte: Autor.



Já nas placas Lead-Free (figura 75-A) e nas placas Sn-Pb (figura 75-B) a inspeção por raios-X não mostrou problemas na montagem dos componentes, demonstrando que a montagem por parte da empresa foi feita de forma correta.

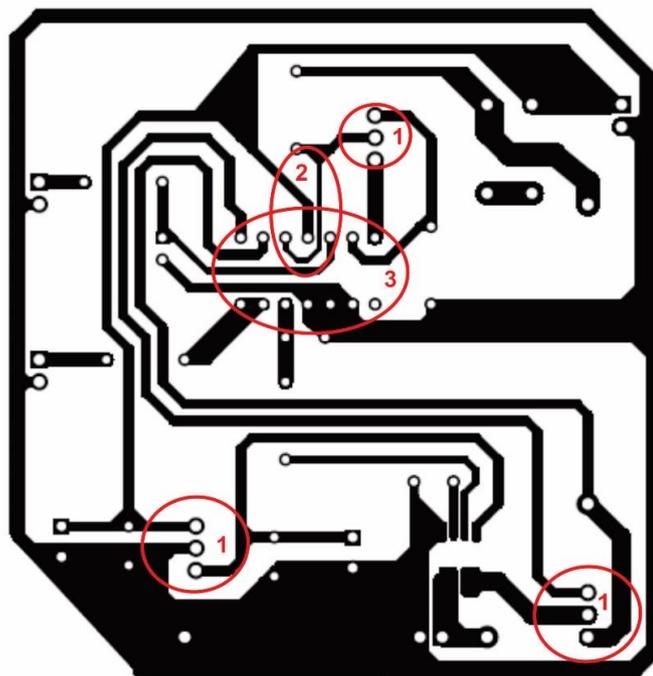
Figura 75 - Inspeção por raios-X das placas Lead-Free (A) e das placas Sn-Pb (B).



- Análise da continuidade do circuito

Realizou-se o teste de continuidade, através do aparelho multímetro, testando cada trilha de contato entre os componentes conforme estipulado. Analisando a continuidade de cada área em relação à continuidade do circuito nas placas com solda, Sn-Pb e *Lead-free*, não houve nenhum problema como já pensado anteriormente. Já nas placas montadas sob pressão (placa Conceito) algumas áreas apresentaram problemas iniciais de contato, problemas estes já detectados durante a montagem que foram corrigidos, ponto de atenção na montagem para evitar erros que possam causar falha no contato elétrico, figura 76.

Figura 76 - Pontos com maiores problemas nas placas montadas sob pressão (Conceito).



Através da análise da continuidade das placas Conceito notou-se um padrão de locais que poderiam ter alguns problemas, onde seriam os pontos críticos da montagem da placa sob pressão, onde na figura 78 mostram-se as principais áreas de atenção e controle. Na área 1 são indicados os pontos onde são fixados os componentes do tipo “TIP”, sendo que esses pontos já foram mencionados na inspeção visual e na inspeção por raios-X como pontos críticos. A área 2 da figura 78 também é uma área crítica pois a trilha tem uma espessura pequena e isso pode ser facilmente retrabalhada em projetos futuros. E por final, também é região crítica a área 3 da figura 78 onde o componente CI (circuito integrado) do tipo LM324 possui hastes de fixação de dimensão pequena. Depois de todas as placas testadas e funcionando corretamente as placas foram identificadas e direcionadas aos testes já determinados anteriormente.

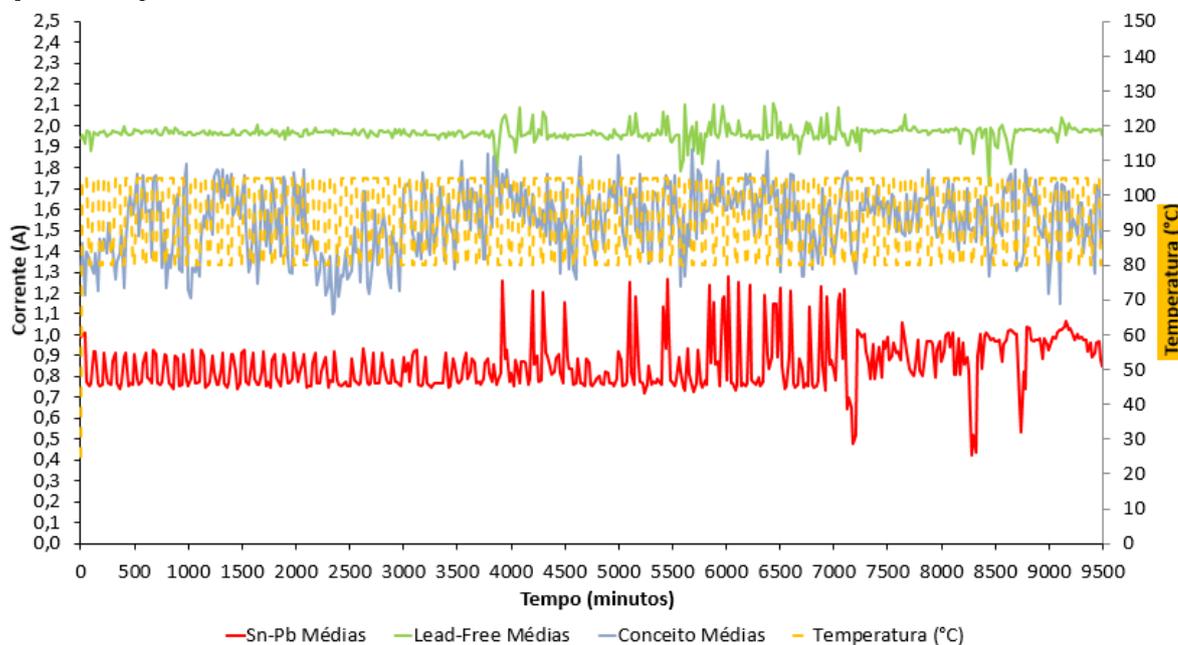
5.2.4.2. Ciclagem térmica

- Durante o teste: Análise de funcionamento

A partir de uma fonte de alimentação com corrente (500mA), houve o monitoramento com o sensor AD PIC PIC 18F4550 de 10 bits para fazer a aquisição dos dados. Estes dados foram convertidos de decimal para binário e de binário para decimal novamente via script utilizando as normas do IEEE 754 (KAHAN, 1997). Mostram-se todos os ciclos de

temperatura na figura 77 e pontos detectados de corrente em Ampere (A) para as médias dos 3 tipos de placas (Sn-Pb, *Lead-Free* e Conceito).

Figura 77 - Resultado da ciclagem térmica em relação a corrente elétrica (A) e temperatura (°C) em relação ao tempo (minutos).



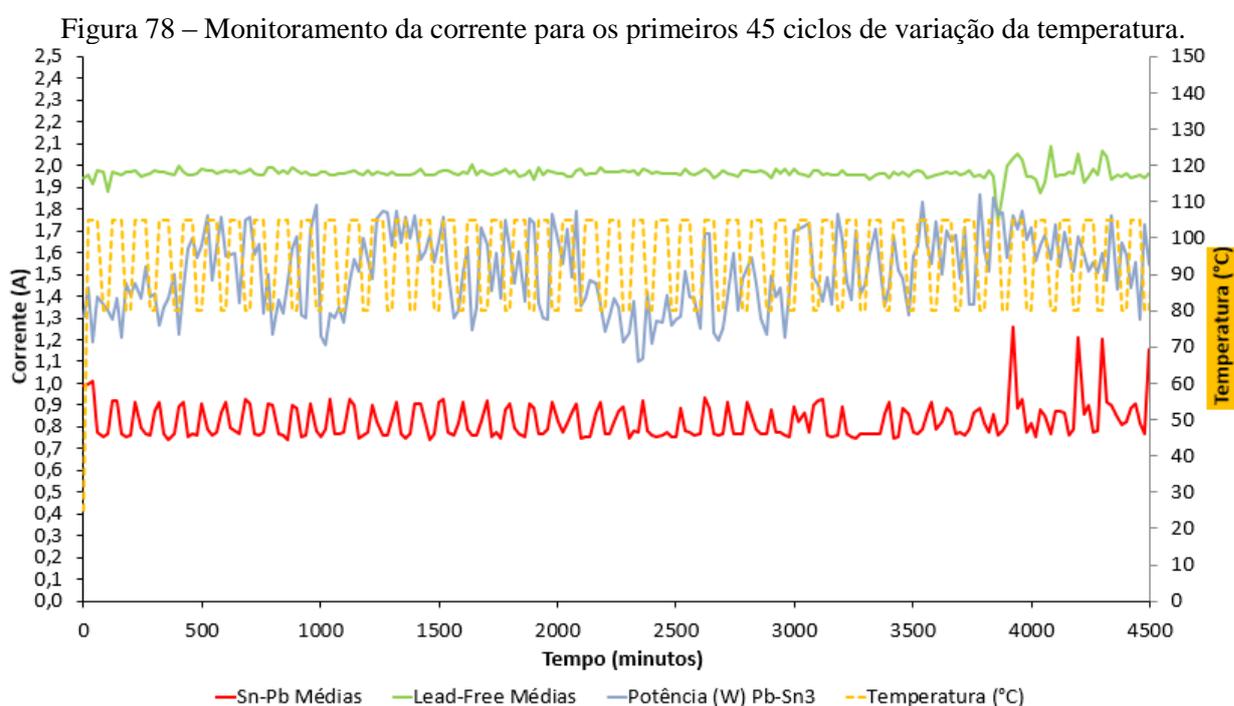
Na figura 77 nota-se a diferença entre valores de corrente para cada tipo de placa, mas não se pode afirmar o porquê, pois não houve a medição das correntes na entrada para calibrar e ter a correta resposta da diferença. Então as análises basearam-se em relação ao padrão da curva, onde as placas *Lead-Free* foram as que mantiveram uma maior estabilidade com uma curva acompanhando um padrão de amplitude até os 40 ciclos iniciais, por volta de 4.000 minutos iniciais. Após isso apresentou uma oscilação maior acompanhada de maior amplitude de corrente na curva.

A curva da placa Sn-Pb também acompanha um padrão até os 40 ciclos iniciais com uma amplitude maior que a *Lead-Free* e após isso não apresenta um padrão, oscilando com uma amplitude maior que no início. Já a placa Conceito oscila mais desde o início do teste com uma amplitude maior. Esta oscilação não se sabe se causaria algum problema de funcionamento específico, mas as placas não pararam de funcionar.

Foi importante analisar graficamente, pois analisando os dados de corrente das placas, não fica claro essa oscilação e amplitude. A placa Sn-Pb inicia com 0,99 A e termina com 0,85 A; a placa *Lead-Free* inicia com 1,94 A e termina com 1,96 A; já a placa Conceito inicia com 1,31 A e termina com 1,44 A. Mostra-se na figura 78 dados adquiridos em relação a corrente (A) nos primeiros 45 ciclos para destacar novamente que a partir dos 40 ciclos as

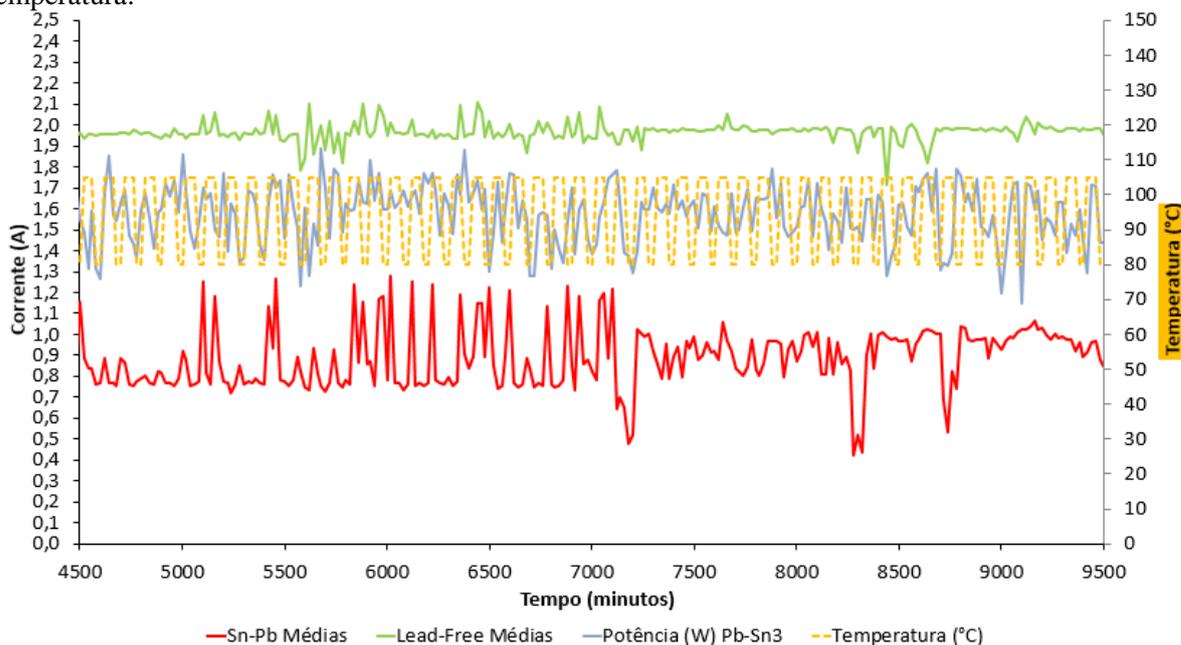
placas Sn-Pb e Lead-Free demonstram uma maior instabilidade oscilando com uma amplitude maior.

Os 45 pontos iniciais de coleta na figura 78 destacam que a curva da placa *Lead-Free* apresenta um padrão mais linear, já a placa *Conceito* apresenta oscilação da corrente, com os ciclos de forma aleatória em relação à temperatura. Já a placa Sn-Pb apresenta oscilação da corrente com maior semelhança na curva da temperatura, o que pode demonstrar maior influência da temperatura sobre esse tipo de placa, assim foi necessário realizar um gráfico de correlação entre corrente e temperatura mostrado nas figuras 80 e 81.



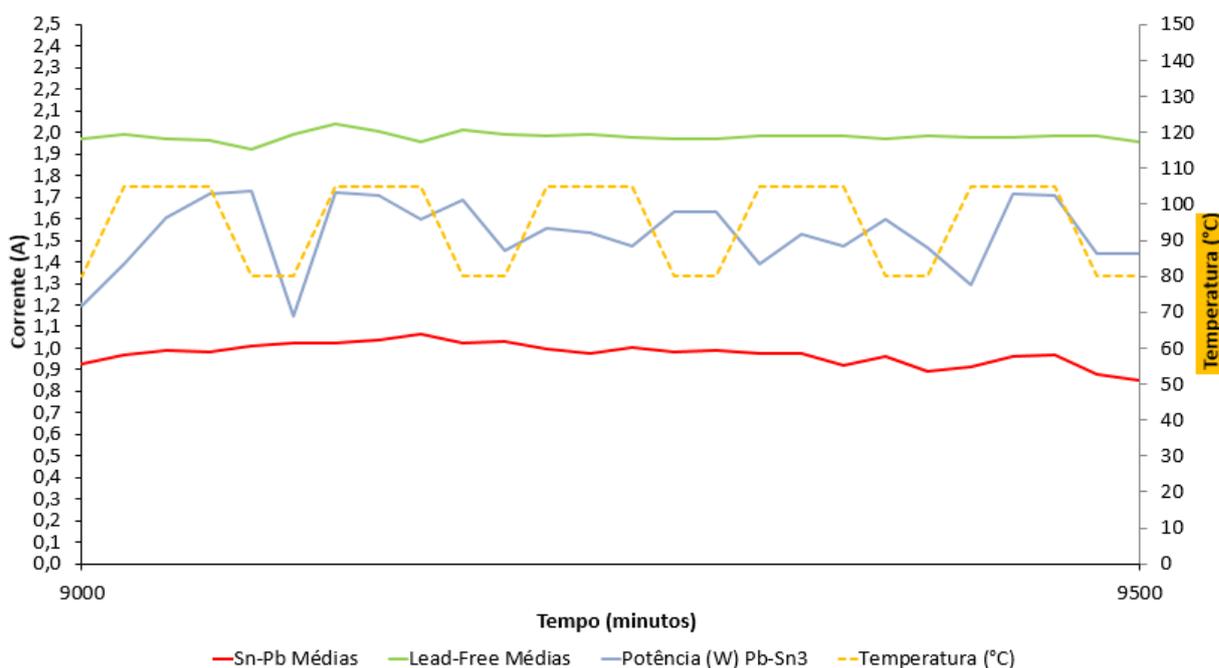
Os 45 pontos intermediários apresentados na figura 79 mostram a placa Sn-Pb oscilar com uma amplitude maior mostrando não ter uma curva mais parecida com a curva da temperatura, tendo alguns pontos da curva semelhante à placa *Conceito*. A placa *Lead-Free* começa a ter mais oscilação em alguns pontos e depois apresenta certa regularidade, voltando a ter uma oscilação perto dos 8.500 minutos. Já a placa *Conceito* mantém ainda uma curva aleatória, mostrando não ter interferência da temperatura, com uma oscilação e amplitude alta.

Figura 79 – Monitoramento da corrente para os 45 ciclos intermediários do teste de variação da temperatura.



Mostra-se na figura 80 um exemplo dos dados adquiridos em relação a corrente (A) das placas *Lead-Free* e os ciclos de temperatura nos últimos 5 ciclos, ou seja, as placas no final dos 100 ciclos continuavam em funcionamento. Analisando estes ciclos finais nota-se que a curva da placa *Lead-Free* voltou a apresentar um padrão mais linear, enquanto a placa Conceito continua apresentando um comportamento aleatório, não seguindo o ciclo de temperatura. E a placa Sn-Pb no final destes ciclos mudou de um comportamento mais dependente da temperatura em alguns pontos e com alguns pontos com maior oscilação e amplitude para um padrão mais linear, diminuindo esta dependência.

Figura 80 – Monitoramento da corrente para os últimos 5 ciclos de variação da temperatura.

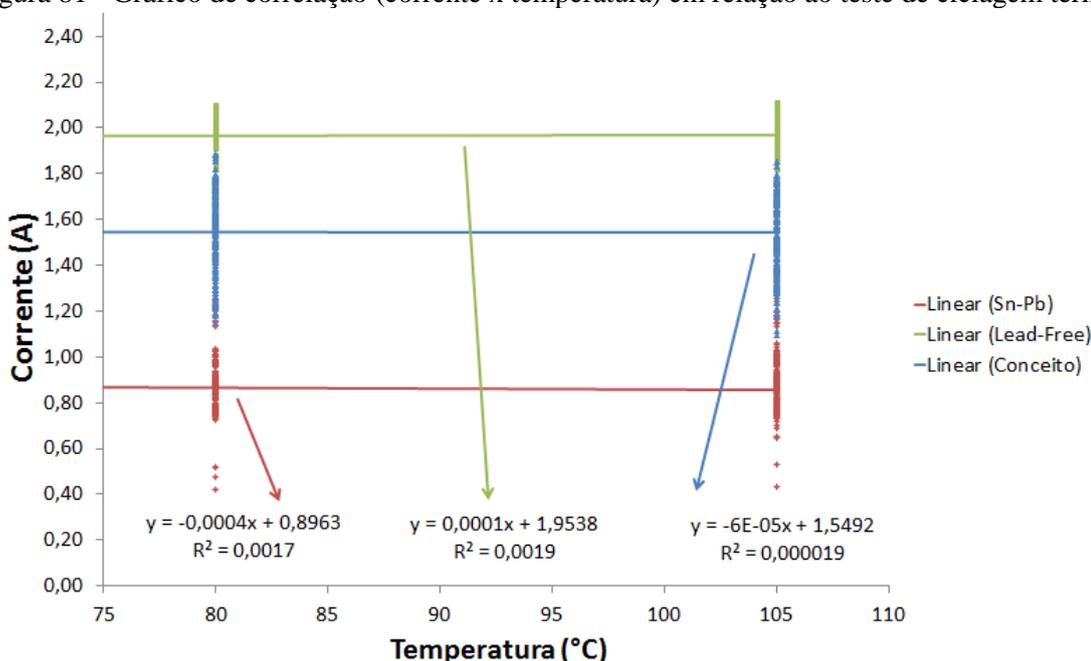


Para mostrar a dependência entre as curvas corrente das placas e a curva dos ciclos de temperatura, apresenta-se na figura 81 um gráfico de dispersão para mostrar a correlação entre temperatura e corrente para as placas. Um gráfico de dispersão é o método gráfico feito sobre dois eixos, 'x' e 'y', que representa a correlação entre as variáveis (VIALI, 2014). Para suplementar o gráfico deve-se, então, utilizar uma medida numérica, o coeficiente de Correlação Linear (r). O "R" mede o grau de relacionamento linear entre valores emparelhados x e y em uma amostra, ou seja, mede a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas. "R" assume valores entre 0 e 1, que quanto mais próximo de 1 (positivo ou negativo), mais próximos os pontos estão da reta, mais forte a relação. Realizando a correlação entre corrente e temperatura (temperatura/corrente), encontrou-se: Sn-Pb: 0,0414; Lead-Free: 0,0440; Conceito: 0,0044.

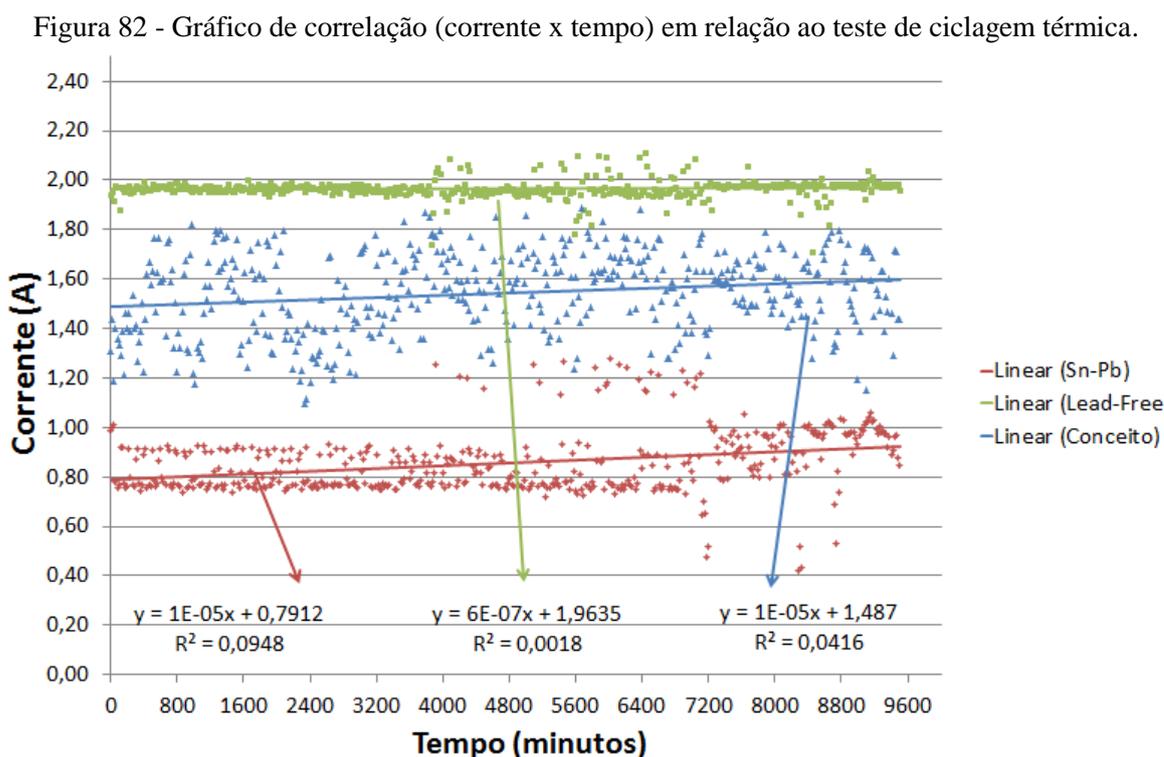
Se um diagrama de dispersão sugere uma relação linear, é de interesse representar este padrão através de uma reta. Dada uma coleção de dados amostrais emparelhados, a seguinte equação de regressão descreve a relação entre as duas variáveis: $y = a + bx$, onde a: ponto onde a reta intercepta eixo y e b: coeficiente angular. O gráfico da equação é chamado de reta de regressão, mostrado na figura 83. "R²" coeficiente de determinação significa dizer que a variável corrente é representada em 0,0017% pela variação da temperatura para a placa Sn-Pb, 0,0019% para a placa Lead-Free e 0,000019% para a placa Conceito.

O gráfico apresenta um padrão de dispersão vertical e sabendo que menor de 0,3 é fraca esta dependência, as variáveis não são correlacionadas, ou seja, a temperatura não está influenciando as correntes detectadas para as placas. Significa que não há relação linear entre as duas variáveis, não há correlação entre a corrente em A e a temperatura em °C.

Figura 81 - Gráfico de correlação (corrente x temperatura) em relação ao teste de ciclagem térmica.



Após foi realizado um gráfico de correlação entre a corrente (A) e tempo (minutos), comparando se há uma relação maior com a corrente entre o tempo do que em relação à temperatura. Mostra-se na figura 82 o gráfico relacionando corrente através do tempo, apresentando um padrão de dispersão horizontal. Realizando a correlação entre corrente e tempo, encontrou-se: Sn-Pb: 0,3079; Lead-Free: 0,0422; Conceito: 0,2041, mostrando um aumento da correlação.

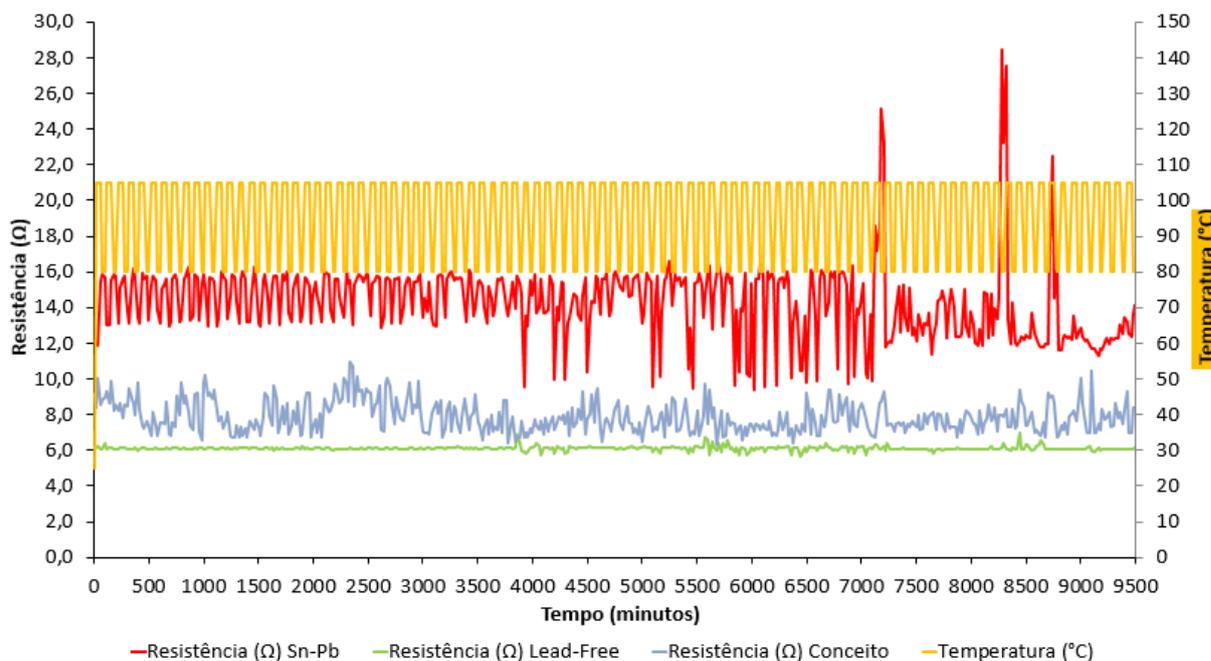


O gráfico da equação é chamado de reta de regressão, mostrado na figura 84. Coeficiente de determinação “R2” significa dizer que a variável corrente é representada em 0,0948% pela variação da temperatura para a placa Sn-Pb, 0,0018% para a placa Lead-Free e 0,0416% para a placa Conceito. A placa Sn-Pb mostra ter uma correlação mais forte e a placa Lead-Free a mais fraca, sendo muito semelhante da correlação da corrente com a temperatura. Analisando os dois gráficos (81 e 82) mostra-se que a correlação entre corrente (A) com a temperatura (°C) e com o tempo (minutos) é muito fraca, tendo uma correlação mais forte com o tempo do que com a temperatura.

Para calcular a variação da resistência ao longo do teste, foi realizado o cálculo $R = V/I$, assumindo um valor fixo para a tensão (12V) e tendo as variações da corrente para cada tipo de placa. A figura 83 apresenta a resistência em relação ao tempo para ter um panorama sobre a resistência das placas. Mostra-se que a placa Sn-Pb tem uma oscilação muito representativa, tendo alguns pontos com grande oscilação com grande amplitude por volta do

80° ciclo. A placa Conceito também apresentou uma oscilação já nos ciclos iniciais com menor amplitude e placa Lead-Free demonstrou ter menor oscilação com pouca amplitude, sendo a com melhor desempenho nesta questão.

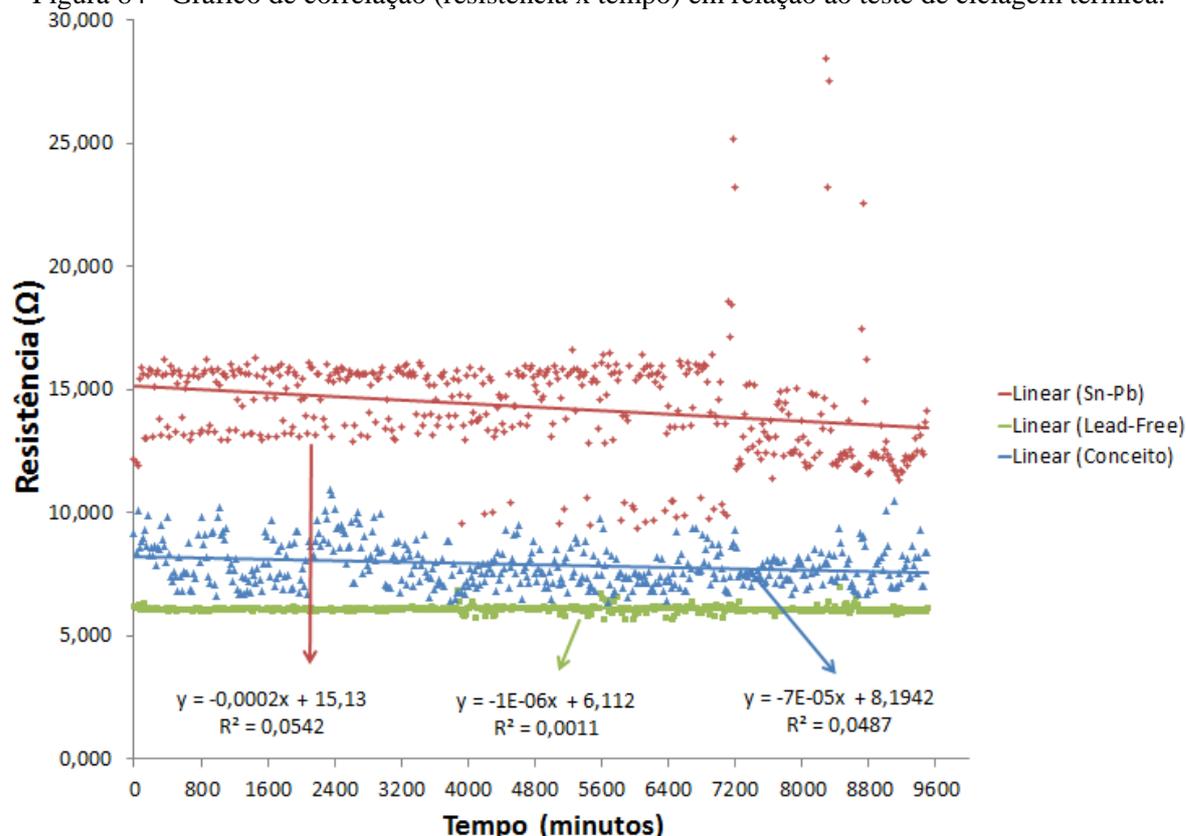
Figura 83 – Resultado da resistência (Ω) em relação ao tempo (minutos).



Estas oscilações mostradas nos gráficos (figuras 78 e 83) não se pode afirmar que os componentes em um tempo maior não seriam afetados ocasionando a perda de funcionamento. Quanto ao aumento da resistência nas placas, alguns autores (ARAI, MATSUO e TAKADA, 2008; e KINYANJUI, 2008) argumentam que se pode dizer que a falha é definida quando há cinco vezes consecutivas resistências acima de 20% do valor nominal da mesma, ponto importante para detectar falhas em soldas. Analisando as curvas houve a oscilação da resistência em alguns pontos acima de 20% do valor inicial nas placas Sn-Pb, mas sem as cinco vezes consecutivas para ter a falha decretada.

Realizou-se após um gráfico de correlação da resistência com o tempo, figura 84, para avaliação das placas com a correlação maior. Nota-se que novamente as placas Sn-Pb são a com maior correlação entre resistência e tempo, tendo o pior desempenho sendo afetadas com o tempo, mostrando que alguns estudos apresentados tiveram o mesmo desempenho.

Figura 84 - Gráfico de correlação (resistência x tempo) em relação ao teste de ciclagem térmica.



Em testes de ciclagem térmica realizados com 1400 ciclos pelos autores Vasudevan et al. (2007), com tempo de permanência de 4 horas, a solda Lead-Free (SAC, Sn-4.0Ag-0,5Cu) tem desempenho melhor do que a solda Sn-Pb. No estudo os autores confirmam através das análises das falhas que a Lead-Free tem muito menos taxa de propagação de trincas por fadiga do que Sn-Pb. Em outro estudo de Sharon e Tulkoff (2015), a solda Lead-Free tem desempenho melhor do que a solda Sn-Pb para alguns tipos de componentes (PBGA e fleXBGA). Já para Sharon e Tulkoff (2015) em testes de ciclagem com pequenas mudanças de temperatura entre as soldas Sn-Pb e Lead-Free, as que falharam primeiro foram a Sn-Pb, mas estas apresentaram melhor desempenho em mudanças de temperatura mais elevadas.

Sharon e Tulkoff (2015) comentam que cada segmento industrial tem característica de vida útil e condições de uso e para os produtos de consumo (classe 1) a taxa aceitável de falha é de 1% e o tempo de serviço é de 1 ano. A maioria das falhas em produtos eletrônicos é causada por cargas termo-mecânica e fadiga da solda é o principal mecanismo de falha.

- Após o teste: Inspeção visual

A inspeção visual mostrou diferenças visíveis entre os 3 tipos de placas. Na figura 85 apresenta-se um exemplo da placa Sn-Pb, onde nota-se a presença de pontos com alguns sinais ou manchas de fluxo, diferente da placa *Lead-Free*, figura 86, que apresentou muitas manchas de algum tipo de fluxo para facilitar a soldagem que se decompôs com a alta temperatura.

Figura 85 - Placa Sn-Pb com sinais de fluxo.

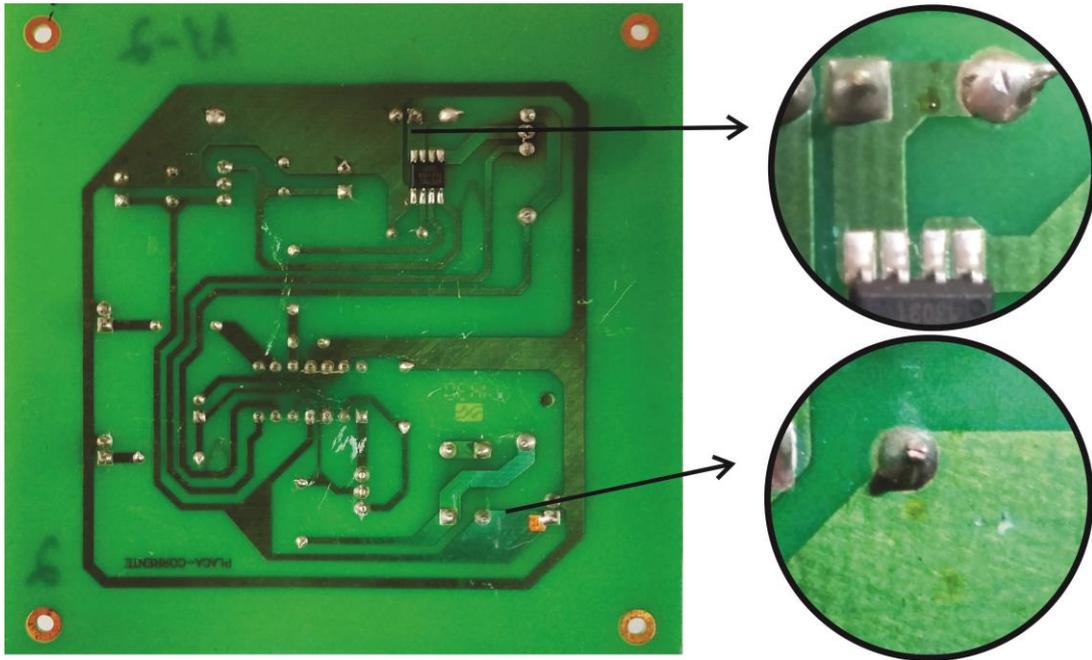
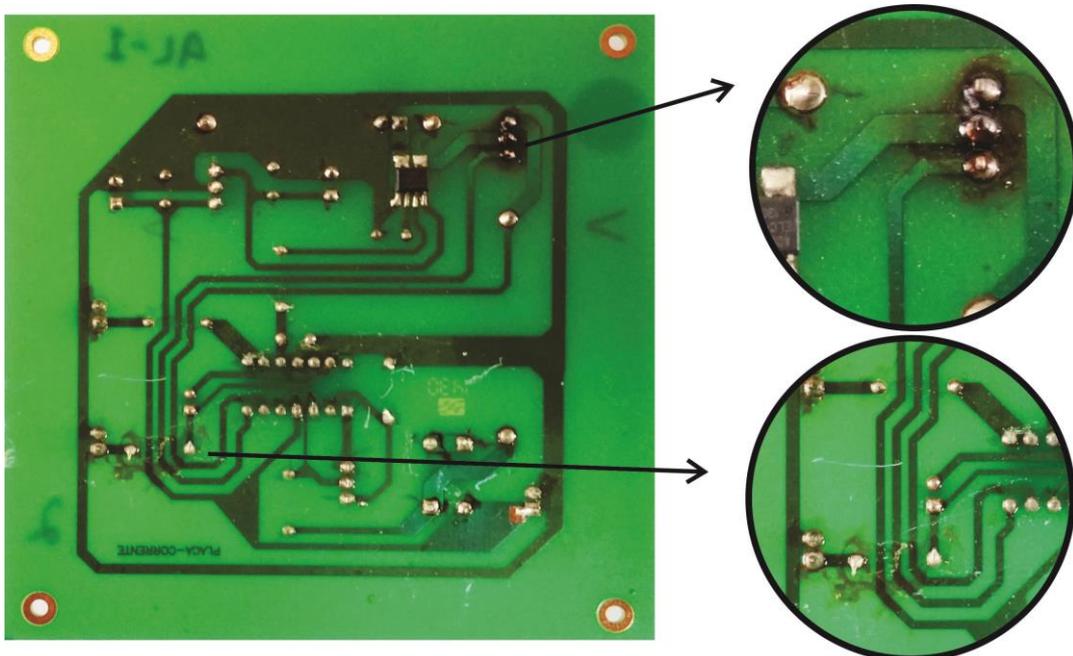
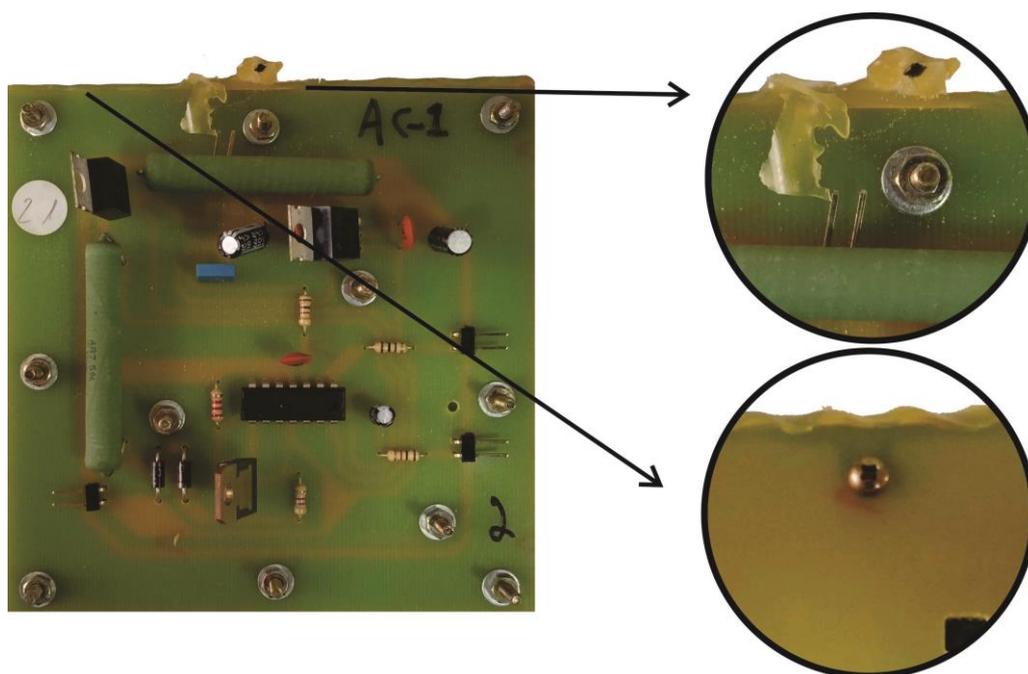


Figura 86 - Placa *Lead-Free* com muita presença de fluxo utilizado no processo.



Nas placas Conceito, na figura 87 mostra-se claramente que o tipo de *hotmelt* utilizado para “selar” as placas poderia ser de outro tipo que tivesse uma resistência a temperatura maior, pois esta utilizada tinha um ponto de amolecimento de 93 - 103°C (3M COMPANY, 2015). Importante frisar que estes todos defeitos visuais não alteraram o funcionamento das placas nestes ciclos de funcionamento.

Figura 87 - Placa Conceito com destaque no adesivo hotmelt.



- Após o teste: Análise da continuidade do circuito

No teste inicial houve a realização da ciclagem térmica com 200 ciclos sem monitoramento e como resultado obteve-se que as placas funcionavam, tendo continuidade no circuito eletrônico ocorrendo a medição através do multímetro modelo Fluke 179 True RMS Digital Multimeter (FLUKE CORPORATION, 2015). A análise posterior do teste final com 100 ciclos monitorados demonstrou que nenhuma das placas teve problema de continuidade, demonstrando que o teste foi desligado após os 100 ciclos com elas em funcionamento. Mesmo assim, as placas foram retiradas da câmara de ciclagem térmica após o ensaio e analisados os pontos com o mesmo multímetro já relatado, onde todos os pontos tinham continuidade.

5.2.4.3. Vibração

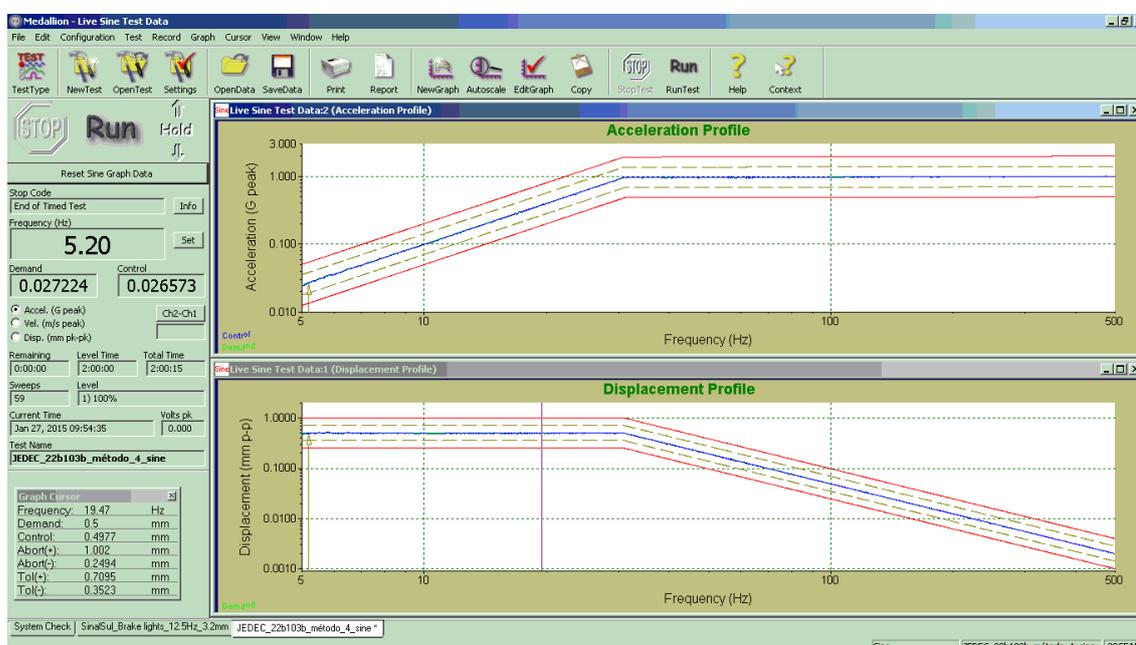
Na figura 88, apresentam-se as placas sendo testadas no equipamento de vibração nos 3 sentidos que foram realizadas, longitudinal, transversal e vertical.

Figura 88 - Teste de vibração em operação nos sentidos longitudinal, transversal e vertical.



Na figura abaixo, 89, mostra-se a tela do software de configuração e monitoramento do teste de vibração, mostrando nos gráficos os perfis de aceleração e deslocamento em execução.

Figura 89 - Tela de configuração e monitoramento do teste de vibração.



- Após o teste: Inspeção visual

Após os testes de vibração nos 3 sentidos (longitudinal, transversal e vertical), foram realizadas análises visuais buscando problemas visíveis nas placas. Nas placas Conceito, os

componentes de fixação que foram utilizados neste estudo (parafusos, porcas e arruelas) não tiveram nenhuma movimentação ou alteração na sua fixação, mostrando ser eficaz para o teste e condição pré-determinada.

Na placa BC-2 (placa Conceito de número 2) foi visualizado um problema no componente do tipo “TIP”, que este estava deslocado, muito provavelmente devido a um sentido de fixação diferente da montagem inicial, figura 90. Este foi o único defeito visível e já se esperava pelas análises realizadas inicialmente e na própria fase de montagem. Isso apontou para a importância das inspeções por raios-X e análise de continuidade para averiguar se havia algum problema funcional.

Figura 90 - Problema visível no componente do tipo “TIP”.

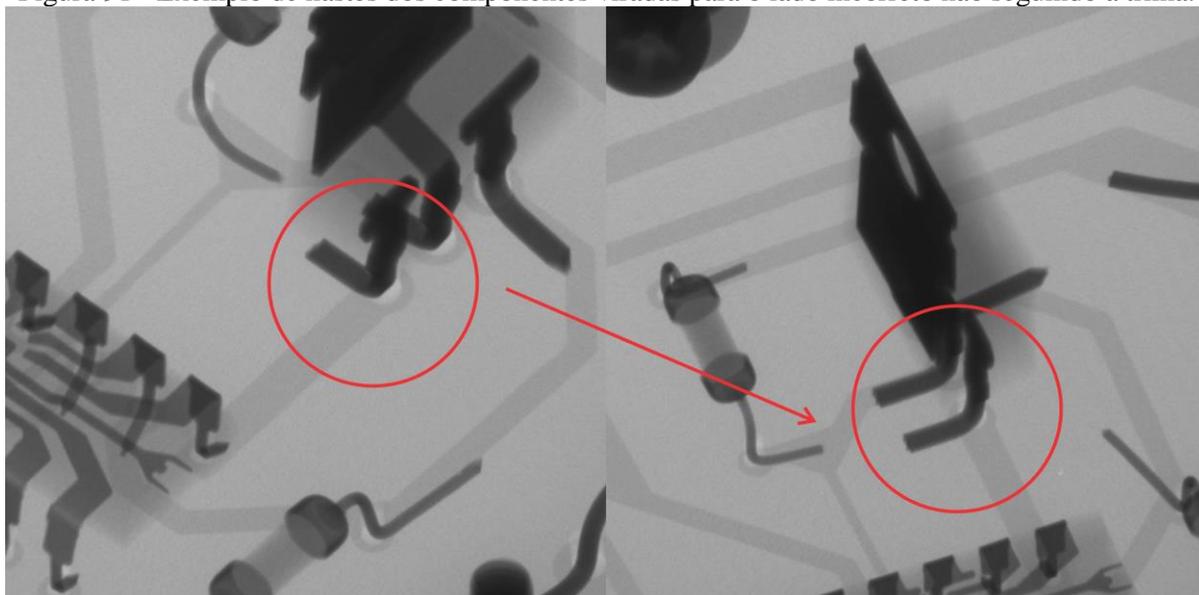


- Após o teste: Inspeção por Raios-X

A partir da inspeção visual inicial foi realizada a inspeção por raios-X em todas as placas para averiguar se os componentes estavam apresentando algum deslocamento após o teste de vibração. Nas placas soldadas não se encontraram problemas e na placa Conceito teve atenção no componente do tipo “TIP” que mostrou um problema na placa BC-2 já na inspeção visual.

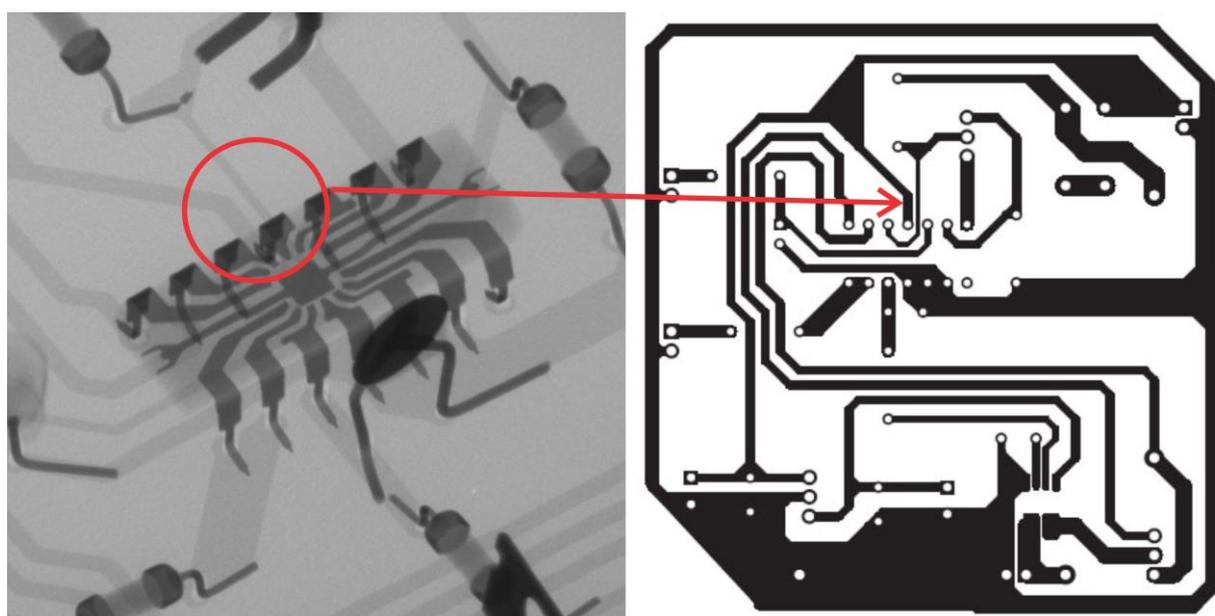
Nas placas Conceito apareceram nas imagens problemas na montagem, algumas hastes estavam viradas para o lado incorreto, tendo um contato não otimizado na trilha, figura 91, onde há um problema da dobra das hastes que ocorreu já na fase de montagem. Também na figura mostra-se o problema de projeto com a trilha não projetada para seguir a orientação correta da haste do componente eletrônico. Estes pontos devem ser melhorados e foi salientada a importância do teste de continuidade que foi realizado depois.

Figura 91 - Exemplo de hastes dos componentes viradas para o lado incorreto não seguindo a trilha.



Outro ponto visto que pode ser melhorado no projeto, que já foi salientado anteriormente, é mudar o projeto das trilhas para que estas sigam o sentido das hastes dos componentes e que tenham maior espessura. A espessura das trilhas deve ser melhorada para otimizar o contato, visto que em algumas áreas as trilhas tiveram uma espessura pequena. Mostra-se na figura 92 o problema da trilha não seguir a orientação para dobra das hastes na fase de montagem e o problema de espessura da linha.

Figura 92 - Problemas de projeto com a trilha sendo muito fina.



- Após o teste: Análise da continuidade do circuito

Como análise final após os testes, foi realizado o teste de continuidade elétrica através do aparelho multímetro da marca modelo Fluke 179 em todos os pontos das placas, tendo uma atenção maior nos pontos sinalizados na placa na inspeção visual e na inspeção por raios-X nos componentes do tipo “TIP”. Todos os pontos de todas as placas foram analisados não tendo problemas de continuidade.

5.2.4.4. Névoa salina

Na figura 93, apresentam-se as placas sendo testadas no equipamento de névoa salina.

Figura 93 - Equipamento de névoa salina.



- Após o teste: Inspeção visual e microscópio ótico

Após o teste de névoa salina foram realizadas as análises visuais e com microscópio ótico em busca de comparar as diferentes placas com os diferentes elementos de união, solda Sn-Pb, *Lead-Free* e placa Conceito em relação à quantidade de locais de corrosão presentes. As análises realizadas foram após 24 horas e 96 horas verificando cada componente eletrônico na parte frontal e cada ponto de solda na parte traseira para as placas soldadas e as hastes dos componentes pressionados nas placas Conceito e seus elementos de fixação (parafusos).

Nas placas soldadas são 63 locais nas hastes dos componentes na parte frontal mais 71 locais das soldas na parte traseira, totalizando 134 para serem analisados. Já na placa Conceito são 63 locais nas hastes dos componentes na parte frontal mais 71 nas hastes na parte traseira

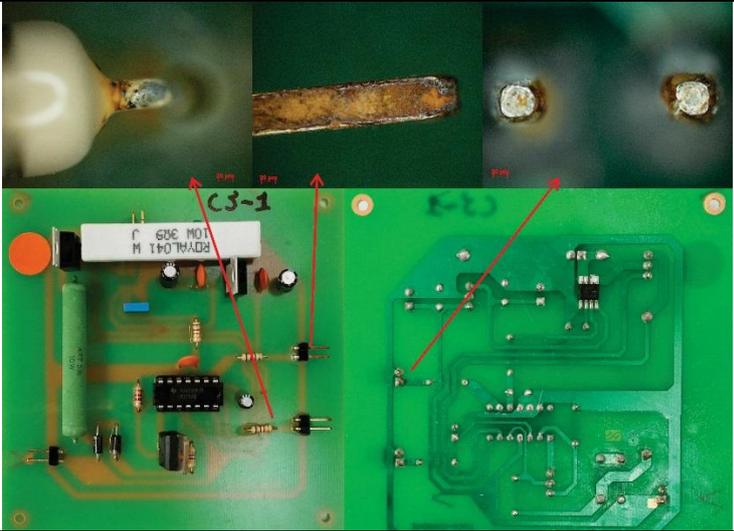
e mais 22 locais nos elementos de fixação na parte dianteira e traseira, totalizando 156 para serem analisados. Não foi realizado o teste de continuidade pelo motivo dos resultados não serem conclusivos pela contaminação de NaCl (sal) nos componentes.

- Teste névoa salina (24 horas)

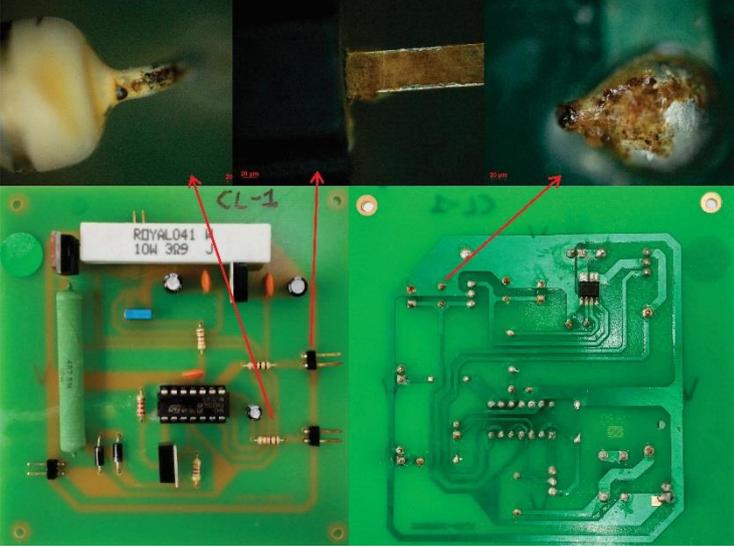
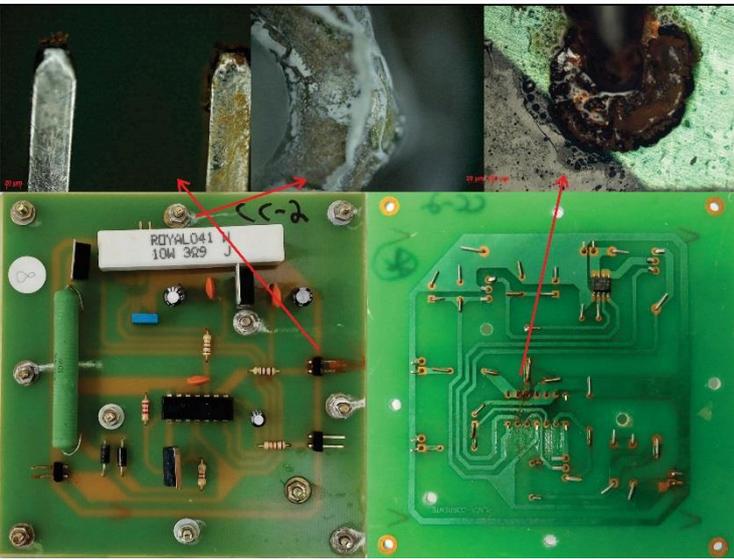
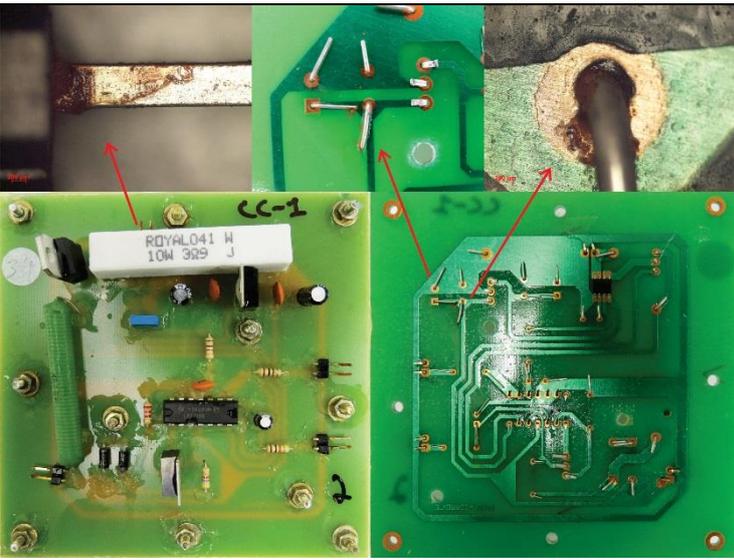
Mostra-se no quadro 7 as análises em relação após as 24 horas iniciais com pontos em destaque feitos no microscópio ótico, buscando comparar o efeito nas placas soldadas em comparação às placas conceito com elementos fixados sob pressão. As imagens mostram que vários pontos de corrosão estão visíveis, mas não são tão representativos nas 24 horas iniciais em quantidade, porém possivelmente todas as placas teriam problemas funcionais mesmo com poucos locais com corrosão.

Nas imagens fica claro que nas placas soldadas com 24 horas já aparecem sinais de corrosão nos componentes e nas trilhas. Em geral em maior quantidade nos componentes que nas trilhas de cobre e pontos de solda.

Quadro 7 - Imagens das placas com os pontos de corrosão depois de 24 horas.

		Névoa Salina	
Cód.	Amostras	Tempo 24 horas	
CS	Sn-PB		

(conclusão)

CL	<i>Lead-free</i>	
CC	Conceito	
CC	Conceito + silicone	

Em relação às quantidades de locais de corrosão, as imagens mostram que as placas Sn-Pb e *Lead-free* apresentam pontos de corrosão principalmente nos componentes eletrônicos, em maior quantidade nos conectores, barras de pino, capacitores e transistores, não mostrando diferença representativa entre os tipos de solda. As imagens mostram que a placa *Lead-Free* sofreu um ataque maior, apresentando mais pontos de corrosão, média de 26, do que nas placas com solda Sn-Pb com a média de 16, sendo que a grande diferença foi nos pontos de solda. Assim, mostra-se que esta liga *Lead-Free* usada na montagem (98.9Sn-0.7Cu-0.3Ag-0.1Bi) apresentou uma resistência à corrosão no ambiente salino mais fraco, sofrendo mais locais de corrosão.

E em relação às placas conceito, o que se imaginava de ter menos locais de corrosão nas placas com silicone como proteção se viu na prática, em média 22, contra a média de 39 locais nas placas conceito sem proteção, tendo a maior presença de locais de oxidação nos elementos de fixação (parafusos, porcas e arruelas) e hastes dobradas. E essa maior corrosão nestes pontos de fixação foi a diferença de quantidade de locais de corrosão para as placas com solda, pois são ligas metálicas ferrosas sem uma grande proteção como outros componentes (PTH e SMD).

O grande problema apresentado nas placas Conceito fixadas sob pressão sem a proteção foi que tendo este espaço entre as placas a água penetrou pelos elementos de fixação e pelos componentes, principalmente o SMD, que na placa Conceito não foi isolado. Assim a água permaneceu “parada” no local por mais tempo atacando mais fortemente as hastes dos componentes eletrônicos. Com a proteção a água teve maior dificuldade de penetrar neste espaço, apresentando uma menor quantidade de água no espaço entre as placas.

Uma questão importante é que as hastes conectoras dos componentes são produzidas em cobre recobertas com uma fina película de estanho para proteção contra a oxidação e para melhor conexão elétrica com o estanho das soldas utilizadas atualmente. A camada de estanho impede o contato do cobre com o meio que pode gerar a corrosão do mesmo. Assim, estas “patas” sem a solda como forma de união, estariam agora em contato direto com o cobre e devido a um diferente potencial de redução sofreriam uma corrosão galvânica.

Em percentuais mostra-se na tabela 15 e na figura 94, sendo o tipo de placa Conceito sem proteção com uma presença maior de locais com corrosão com ~25% dos locais apresentando oxidação, comparando com a placa com proteção com ~14% dos locais, muito semelhante às placas SN-Pb com ~12% e por final as ligas *Lead-Free* apresentando ~19% dos locais.

Em resumo, nestas primeiras 24 horas poucos locais de corrosão foram destacados, com uma diferença representativa principalmente entre as placas Sn-Pb tradicionais com a placa Conceito sem proteção. Mesmo assim considera-se que todas as placas já apresentariam problemas funcionais. E o que mais chamou a atenção foi de ter mais locais de corrosão nas placas *Lead-free* do que nas Sn-Pb. As placas Conceito montadas sob pressão destacam-se os pontos de corrosão nos elementos de fixação, algo que já se esperava, pois são elementos (parafusos, porcas e arruelas) sem recobrimento adequado, sendo os primeiros a serem atacados no ensaio.

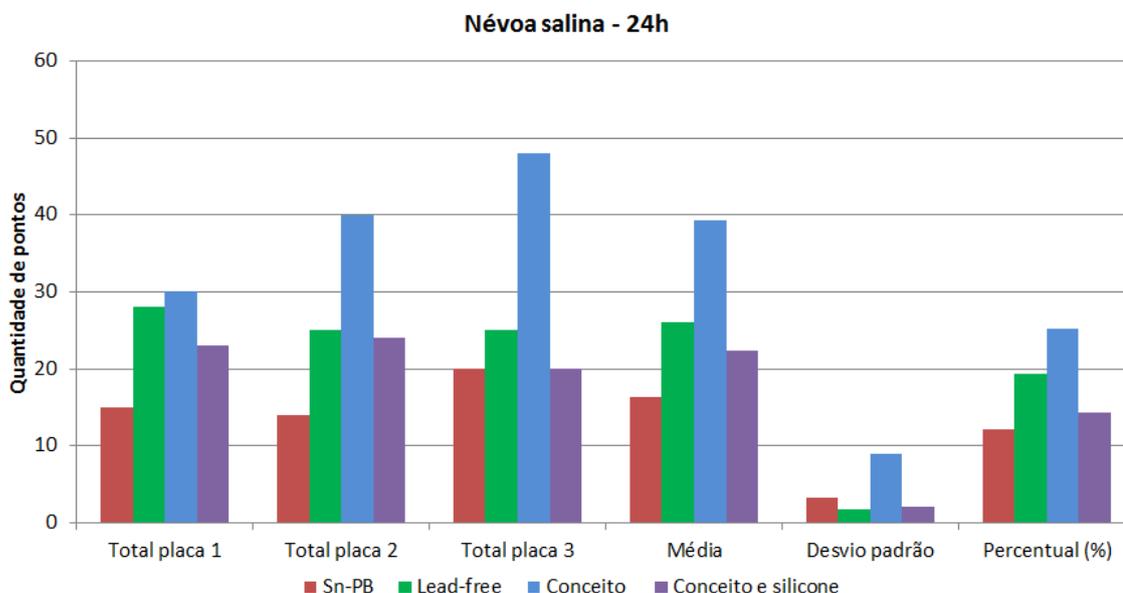
Na tabela 15, mostra-se também o desvio padrão é uma medida de dispersão dos valores de uma distribuição normal em relação à sua média. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média e já um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores. Assim aparece que as placas *Lead-Free* apresentam um desvio padrão menor, mais perto da média.

Tabela 14 - Quantidade de pontos de corrosão depois de 24 horas de teste.

Cód.	Amostras	Pontos de corrosão					Total de pontos analisados	Percentual (%)
		Pontos*			Média	Desvio padrão		
		C	S	T				
24 horas								
CS-1	Sn-PB	9	6	15	16,33	3,21	134	12,19
CS-2	Sn-PB	10	4	14				
CS-3	Sn-PB	10	10	20				
CL-1	<i>Lead-free</i>	8	20	28	26	1,73	134	19,26
CL-2	<i>Lead-free</i>	10	15	25				
CL-3	<i>Lead-free</i>	9	16	25				
CC-1	Conceito	08	22	30	39,33	9,02	156	25,21
CC-2	Conceito	09	31	40				
CC-3	Conceito	09	39	48				
CC-1	Conceito + silicone	09	14	23	22,33	2,08	156	14,32
CC-2	Conceito + silicone	09	15	24				
CC-2	Conceito + silicone	08	12	20				

* Pontos: C – Componentes; S – Solda ou no caso da placa Conceito elementos de fixação e hastes dobradas; T – Total.

Figura 94 - Quantidade de pontos no teste de névoa salina – 24h.



- Teste névoa salina (96 horas)

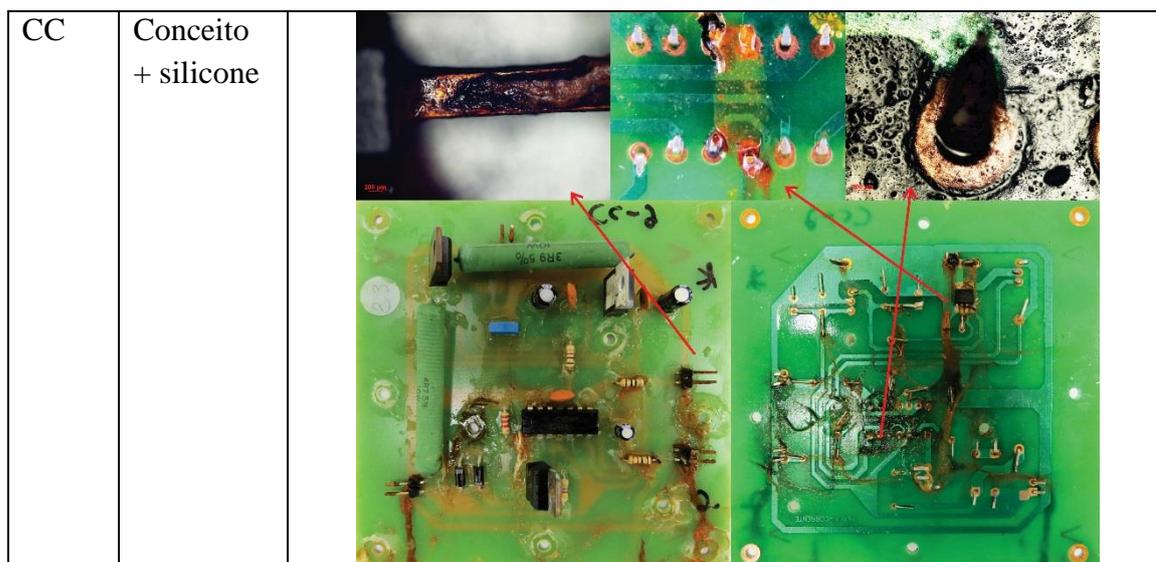
Depois das 96 horas as placas foram atacadas fortemente, mostrando que não teriam uma adequada exposição a este tempo, quadro 8. Os resultados mostram um padrão apresentado nas 24 horas iniciais e nas 96 horas. Após 96 horas evidencia-se uma grande presença de corrosão nos componentes eletrônicos, mostrando ser de um material metálico (liga ferrosa) sem proteção adequada, já analisado nas 24 horas iniciais. E nos pontos de solda ou dos elementos de fixação houve um aumento representativo também principalmente para a placa Conceito sem proteção.

No quadro 8 mostram-se os resultados da névoa salina em relação aos componentes eletrônicos montados. Fica claro que todos os elementos metálicos, componentes eletrônicos na parte frontal e suas hastes na parte traseira sofrem a corrosão. O agente agressivo neste ensaio é o íon cloreto (Cl⁻) que provoca intensa corrosão. Outro fato que colabora para a névoa salina ser corrosiva é que a água salgada condensada é um eletrólito forte.

Quadro 8 - Imagens das placas com os pontos de corrosão depois de 96 horas.

		Névoa Salina	
Cód.	Amostras	Tempo 96 horas	
CS	Sn-PB	<p>The CS-1 sample shows significant corrosion. The top row contains three images: a close-up of a heavily corroded metal strip, a circular hole in a metal plate, and a rectangular metal component with a large, dark, irregular corrosion product. The bottom row shows two views of a green PCB with various electronic components. Red arrows point from the corrosion products in the top row to specific points on the PCB, indicating the location of corrosion. The PCB components include a large white capacitor labeled 'ROYAL041 M 10M 309 J', a black integrated circuit, and several resistors and capacitors.</p>	
CL	Lead-free	<p>The CL-2 sample shows corrosion. The top row contains three images: a close-up of a metal strip with corrosion, a circular hole in a metal plate, and a rectangular metal component with corrosion. The bottom row shows two views of a green PCB with various electronic components. Red arrows point from the corrosion products in the top row to specific points on the PCB. The PCB components include a large white capacitor labeled 'ROYAL041 M 10M 309 J', a black integrated circuit, and several resistors and capacitors.</p>	
CC	Conceito	<p>The CC-3 sample shows corrosion. The top row contains three images: a close-up of a metal strip with corrosion, a circular hole in a metal plate, and a rectangular metal component with corrosion. The bottom row shows two views of a green PCB with various electronic components. Red arrows point from the corrosion products in the top row to specific points on the PCB. The PCB components include a large white capacitor labeled 'ROYAL041 M 10M 309 J', a black integrated circuit, and several resistors and capacitors.</p>	

(conclusão)



Comparando as placas soldadas Sn-Pb e *Lead-Free*, as placas *Lead-Free* visivelmente possuem mais pontos de corrosão nos pontos de solda, já visto no teste de 24 horas de exposição. Já em relação aos componentes há uma pequena diferença, não representativa, entre os dois tipos de solda. No total a média de locais de corrosão foram de 47 (~35,56%) para a liga Sn-Pb e de 63 (~47,26%) para a liga *Lead-Free*, mostrando mais uma vez que a liga utilizada *Lead-Free* apresentou problemas maiores de resistência ao ambiente salino, tabela 16 e figura 95.

Já nas placas Conceito sem proteção (silicone) todas as hastes dos componentes na parte traseira apresentaram pontos de corrosão, pelo motivo da água ficar acumulada entre as bases. E também há pontos de corrosão em todos os elementos de fixação que foram utilizados (parafusos, porcas e arruelas), apresentando na totalidade de ~98% dos elementos apresentando corrosão.

Para avaliar as placas sem este acúmulo de água entre elas, foi importante ter testado as placas conceito nos mesmos parâmetros de teste com um elemento de proteção, silicone neutro, nos componentes para restritamente analisar esta diferença de pontos de corrosão. A água estava entre as placas, provavelmente por algum ponto com má colocação de silicone ou pela permeabilidade do silicone em relação à água. Na inspeção visual se notou que esta água deve ter entrado entre as placas com mais dificuldade estando ali pouco tempo, pois eram presentes poucos pontos de corrosão comparando com o mesmo tipo de placa com o mesmo tempo de exposição, apresentando ~31,83% de elementos com corrosão, abaixo de todas as

outras placas. Isso devido às placas conceito com proteção do silicone terem tido uma diminuição dos pontos de corrosão nos componentes eletrônicos.

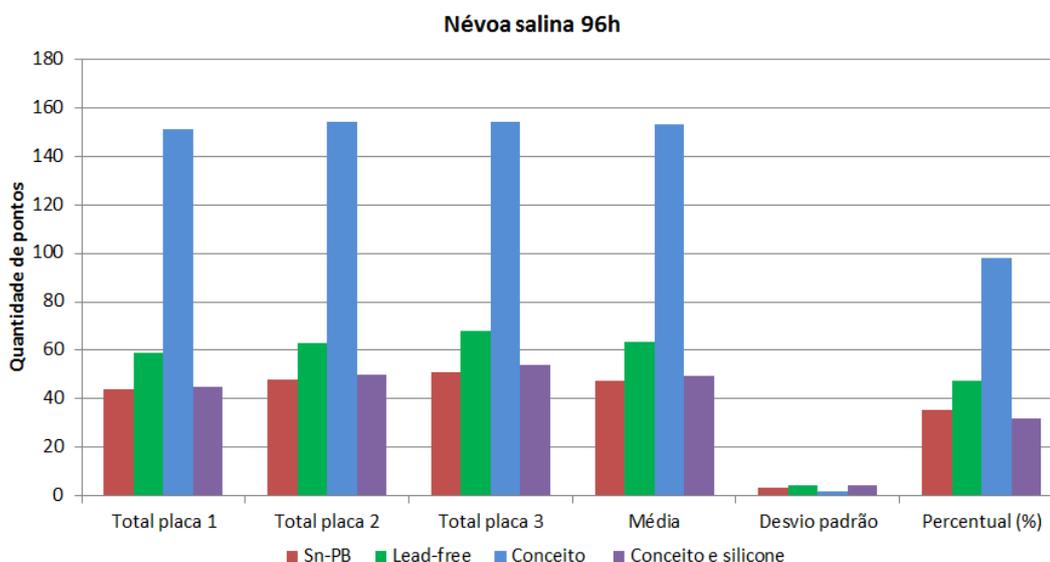
Comparando com as placas Conceito sem proteção, as que possuíam o silicone tinham uma menor quantidade de pontos de corrosão nas hastes dobradas mesmo com a água acumulada presente nas placas com proteção. E isso também foi verificado nos componentes de fixação (parafusos, porcas e arruelas), pois foram protegidos em parte pelo silicone. Este tipo de corrosão nos elementos de fixação apresenta a corrosão galvânica, destacando-se no quadro 8 “flocos” de zinco oriundos da migração deste elemento (migração de metais). Também na tabela 16, mostra-se o desvio padrão, as placas Conceito sem proteção apresentam menor desvio padrão e as placas Sn-Pb também, ou seja, mais perto da média.

Tabela 15 - Quantidade de pontos de corrosão depois de 96 horas de teste.

Cód.	Amostras	Pontos de corrosão					Total de pontos analisados	Percentual (%)
		Pontos*			Média	Desvio padrão		
		C	S	T				
96 horas								
CS-1	Sn-PB	23	21	44	47,67	3,51	134	35,57
CS-2	Sn-PB	22	26	48				
CS-3	Sn-PB	21	30	51				
CL-1	<i>Lead-free</i>	22	37	59	63,33	4,51	134	47,26
CL-2	<i>Lead-free</i>	23	40	63				
CL-3	<i>Lead-free</i>	28	40	68				
CC-1	Conceito	63	88	151	153	1,73	156	98,08
CC-2	Conceito	63	91	154				
CC-3	Conceito	63	91	154				
CCS-1	Conceito + silicone	16	29	45	49,67	4,51	156	31,84
CCS-2	Conceito + silicone	14	36	50				
CCS-2	Conceito + silicone	20	34	54				

* Pontos: C – Componentes; S – Solda ou no caso da placa Conceito elementos de fixação e hastes dobradas; T – Total.

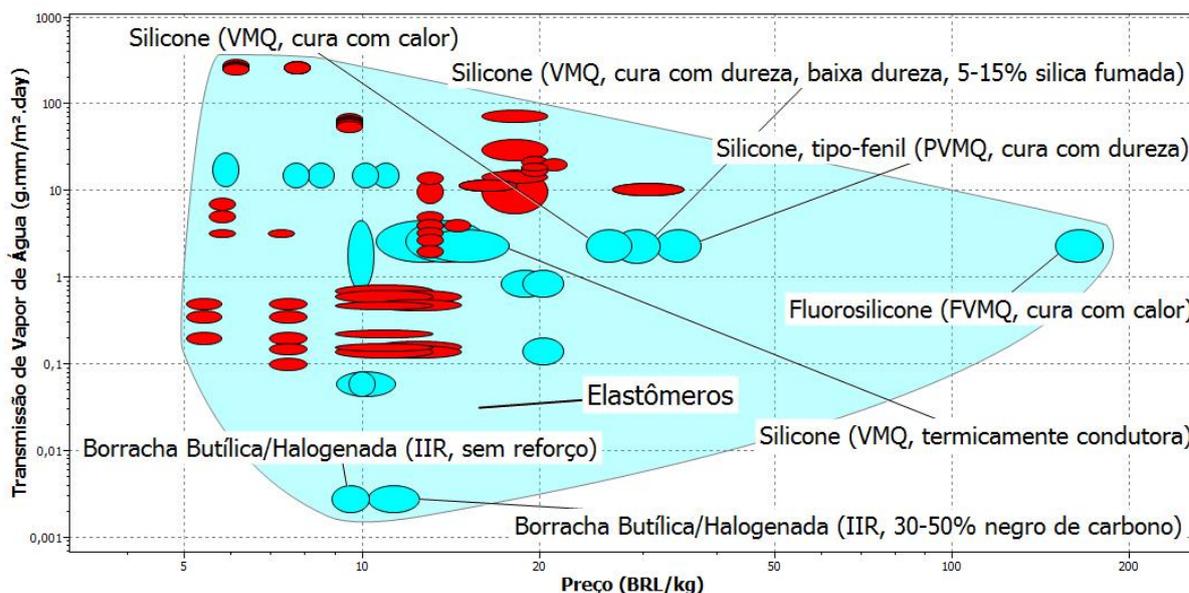
Figura 95 - Quantidade de pontos no teste de névoa salina – 24h.



Analisando este tipo de fixação sob pressão destaca-se o que foi já sinalizado antes do teste com a inspeção visual e na inspeção por raios-x. Os componentes eletrônicos do tipo Through-hole possuem hastes com diferentes tamanhos e espessuras. Analisando deste ponto fica claro que os componentes SMD teriam uma vantagem nesta questão, pois não tem a etapa de “dobra” das hastes dos componentes, mas teriam etapas de usinagem no processo para montagem dos componentes. Com certeza este processo necessitaria de melhorias e sendo automatizado poderia evitar problemas de montagem, estes que muitas vezes a solda resolve mesmo em processos de montagem manual. Uma possibilidade também de melhoria na placa Conceito para diminuir a corrosão dos elementos de fixação seria de utilizar os elementos de fixação poliméricos, evitando assim grande parte dos problemas para os elementos de fixação.

Outra possibilidade seria utilizar um material elastômero com uma permeabilidade menor em relação à água. Um dos testes possíveis que são realizados que podem ajudar na correta seleção de materiais para este fim, é Transmissão de Vapor de Água (WVTR), que é o volume de vapor de água que vai passar através de uma unidade de espessura de material por unidade de superfície por unidade de tempo por unidade de pressão barométrica ($\text{g.mm}/(\text{m}^2.\text{dia})$). Um gráfico gerado no software CES Edupack 2014 (CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR, 2014) mostra os elastômeros em relação a esta condição, figura 96.

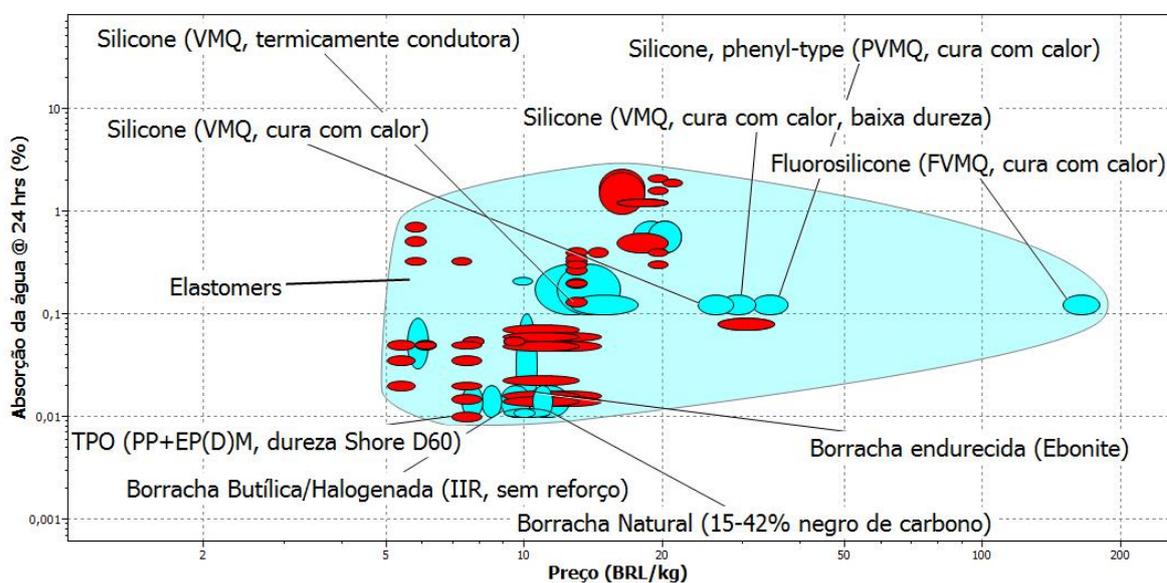
Figura 96 - Transmissão de Vapor de Água (g.mm/m².day) vs. Preço (BRL/kg).



Fonte: Adaptada de Cambridge Engineering Selector (2014).

Absorção da água é o ganho de peso (%) depois de uma amostra de material de teste é imerso em água destilada à temperatura ambiente durante um período de tempo especificado. O conteúdo de água em um material pode influenciar tanto as suas propriedades mecânicas e eléctricas. Por exemplo, poliamidas/nylons são frágeis quando o primeiro moldado (seco), mas torna-se difícil como eles absorvem a umidade e equalizar as condições do ambiente. Em todos os casos, o nível de absorção de água não depende apenas das propriedades do material a granel (bulk-abundantemente), mas também em: a presença de materiais de enchimento/aditivos, a temperatura, e a duração da exposição. Na figura 97, mostra-se a absorção da água versus o preço.

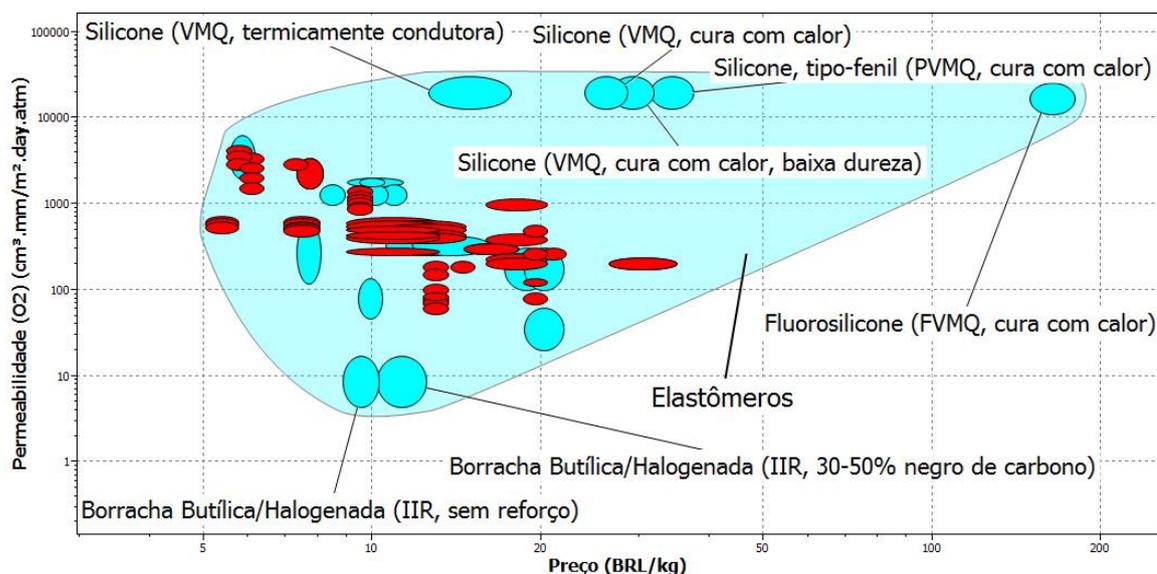
Figura 97 - Absorção da água @ 24 hrs (%) vs. Preço (BRL/kg).



Fonte: Adaptada de Cambridge Engineering Selector (2014).

A permeabilidade ao oxigênio é o volume de oxigênio que passe através de uma unidade de espessura de material por unidade de superfície por unidade de tempo por unidade de pressão barométrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm})$). Na figura 98, mostra-se a permeabilidade do O_2 versus o preço.

Figura 98 - Permeabilidade (O_2) ($\text{cm}^3 \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$) vs. Preço (BRL/kg).



Fonte: Adaptada de Cambridge Engineering Selector (2014).

Nos gráficos das figuras 96, 97 e 98 mostram-se os tipos de silicones comparando com algumas borrachas butílicas mostrando que estas possuem um melhor desempenho. Uma das possibilidades seria então substituir por borrachas IIR, “*Butyl/Halobutyl*” com reforço e sem reforço. Atualmente é utilizado em câmaras de ar de pneus pneumáticos, vácuo e aplicações de alta pressão, selos, cintos, apoios anti-vibração, isolamento elétrica, tubulação, tubos de revestimento de borracha e bombas, fechos farmacêuticos. Comparando então os dados de absorção e permeabilidade, tabela 17, nota-se a grande diferença de um tipo de silicone com a borracha IIR, evidenciando que esta última poderia ser uma melhor escolha.

Tabela 16 - Absorção e permeabilidade do silicone e borracha IIR.

Absorção e permeabilidade		
	Silicone	Borracha IIR
Transmissão de Vapor de Água	1,53 - 3,51 g.mm/m ² .day	0,002 - 0,004 g.mm/m ² .day
Absorção da água	0,1 - 0,15 %	0,01 - 0,02 %
Permeabilidade (O₂)	1,29e4 - 3,01e4 cm ³ .mm/m ² .day.atm	4,38 - 16,6 cm ³ .mm/m ² .day.atm

Fonte: Adaptada de Cambridge Engineering Selector (2014).

5.3. Considerações parciais

Em relação ao teste de ciclagem térmica, as placas fixadas com *Lead-Free* obtiveram os melhores resultados, com correntes maiores sendo coletadas, com uma oscilação menor que as outras. As placas Sn-Pb com os menores resultados e as placas Conceito tiveram resultados intermediários, ambas com oscilação e amplitude representativa, mesmo assim continuaram em funcionamento.

Outro fator que deve ser considerado é o material da base da placa, que conforme Qi et al. (2005) as propriedades termomecânicas, tais como o módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica dos materiais da base da placa de variam consideravelmente e essas propriedades têm um impacto direto sobre a durabilidade da união de solda.

Nos protótipos para os componentes do tipo *through hole* os furos não foram metalizados, devido ao estudo de alguns autores (TANAKA, SHIGEHARU e YAMAMOTO, 1997; PEIRAVI, 2009) que argumentam que a degradação das placas durante a ciclagem térmica ocorre mais rapidamente em placas com furos metalizados. À medida que o teste progride, as tensões sobre as interconexões causam rápido desgaste nas camadas de metal e nos furos banhados, levando à deterioração em resultado da qual a resistência do circuito aumentaria. Os autores argumentam (1997) que os coeficientes de expansão térmica para os diferentes materiais provocam estresse em resposta aos ciclos de temperatura e que quanto maior for a diferença de temperatura, mais rápido o progresso da degradação.

Com relação ao teste de vibração, não houve problemas nas análises após o teste, mostrando as placas (Sn-Pb, *Lead-Free* e Conceito) com funcionalidade antes e depois do teste. A única consideração é sobre a montagem já detectada antes do teste em certos componentes que ficam com algum ponto de fixação fraco, mas que não houve problema no funcionamento.

Já o teste de névoa salina apontou as placas Sn-Pb com melhores resultados na inspeção visual, com menos locais com corrosão e as placas Conceito com isolamento com resultados semelhantes. E as placas *Lead-Free* com muitos pontos de corrosão, tenho um resultado geral ruim neste teste.

Nota-se que para cada tipo de teste há um tipo de fixação com melhores resultados e isso demonstra a complexidade em concluir qual seria o melhor elemento de fixação, pois se alternam as placas com melhores resultados. Assim deve-se, para cada tipo de uso das placas, ter uma definição clara do objetivo do teste conforme o contexto de uso do produto.

6 CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados, nas análises e nos resultados obtidos chegam-se as seguintes considerações:

- Há um crescimento na pesquisa de novas tecnologias de reciclagem de placas de circuito impresso, porém nota-se que não há muitos estudos em relação ao desenvolvimento de novas alternativas de fixação. Duas empresas foram citadas no trabalho que desenvolveram sistemas com diferentes propósitos e com resultados iniciais satisfatórios, porém ambas usam processos e outros materiais que dificultam a reciclagem dos mesmos depois da utilização.

- Muitos estudos em relação à avaliação do ciclo de vida mostram que a mudança da solda Sn-Pb por alguma liga *Lead-Free* é uma questão complexa com resultados que geram questionamentos sobre as ligas metálicas com menor impacto ambiental e mais pesquisa é necessária.

- Em relação ao teste de ciclagem térmica que permitiu verificar os efeitos na câmara climática em faixas de temperaturas altas para o tipo de produto de classe 1 (produtos eletrônicos em geral, incluindo produtos de consumo, sendo o principal requisito a placa de circuito impresso em funcionamento), os resultados demonstraram que as placas funcionavam após o teste de 100 ciclos com monitoramento.

- Ainda sobre o teste de ciclagem térmica, as placas *Lead-Free* foram as que mantiveram uma maior estabilidade e as placas Sn-Pb e Conceito oscilando mais, com uma amplitude maior em relação à Corrente e Resistência. Já nos gráficos de correlação mostrou-se que a temperatura e o tempo não estão influenciando a corrente e a resistência de modo significativo.

- Quanto ao teste de vibração os resultados foram satisfatórios, não ocorrendo problemas de funcionamento das placas depois do teste na condição pré-estabelecida para a condição de serviço número 4 para produtos eletrônicos. Uma questão importante do processo de montagem, já detectado antes do teste, é a de certos componentes que ficam com algum ponto de fixação fraco, mas que não houve problema de funcionamento.

- Analisando o tipo de fixação sob pressão, salienta-se o que foi sinalizado no teste de inspeção visual e inspeção por raios-x que: os componentes eletrônicos do tipo *Through-hole* possuem hastes com diferentes tamanhos e espessuras, o que dificulta a montagem. Assim nesta questão os componentes SMD teriam uma vantagem, pois não tem a etapa de “dobra” das hastes, porém teriam etapas de usinagem no processo para montagem dos componentes.

- Em relação ao teste de névoa salina os resultados demonstraram que a liga metálica utilizada *Lead-Free* (99,3Sn-0,7Ag) teve um desempenho abaixo do esperado apresentando uma quantidade maior de locais com corrosão comparando com as placas Sn-Pb e Conceito. Mostrou-se importante no teste de névoa salina testar as placas Conceito com e sem proteção para mostrar a diferença.

- Muitas melhorias no sistema de fixação foram pensadas e ainda devem ser desenvolvidas, necessitando melhores projetos e definições, tais como os furos para colocação dos componentes PTHs que poderiam ser menores e metalizados permitindo uma melhor conexão.

- Sobre os materiais das hastes dos componentes, geralmente de ligas ferrosas sem proteção, nota-se a importância de pensar alguns materiais em melhores condições de proteção para a corrosão e correto funcionamento. Outra questão importante sobre os componentes é a diferença de tamanho e espessura das hastes para o mesmo tipo de componente, sem uma padronização mais exigente. Isso mostrou ser mais um fator de dificuldade para a montagem e desmontagem.

- Comparando os sistemas de fixação aponta-se que o novo sistema utilizado apresenta uma quantidade menor de materiais tóxicos e possibilita uma separação com uma quantidade menor de processos, não necessitando processos que envolvam muita energia como a separação mecânica (trituração) e a metalúrgica (pirometalurgia), facilitando assim a desmontagem e reciclagem.

- Os protótipos mostraram ser possível a montagem tanto de componentes grandes como pequenos e de ser possível com a desmontagem realizar uma reciclagem localizada, de alguns componentes defeituosos e assim estender a vida útil da placa.

- A mudança nos últimos anos em busca de uma liga metálica substitutiva da tradicional Sn-Pb por alguma *Lead-Free* mostra-se ainda um percurso com muitas dúvidas na confiabilidade e na “real” escolha da liga metálica com menor impacto ambiental.

- Analisando os resultados obtidos com a placa Conceito, pode-se concluir que os resultados alcançados motivam a continuação de estudos para o desenvolvimento de novos sistemas de fixação e também para a utilização de outros materiais com baixo impacto ambiental e que tenham uma reciclagem facilitada.

- A proposta final de fixação sob pressão teve o pedido de patente com número do registro BR10201300551, data de depósito 07/03/2013 (MARQUES e MALFATTI, 2013).

7 CONCLUSION

Based on the prototypes, tests, analyses and results, these are some of the concluding points:

- There is an increase in research on new PCB recycling technologies. However, there are not many studies on the development of new fixing alternatives. Two companies that are cited in the present work have developed systems with different purposes and initial satisfactory results but both still use processes and materials that make recycling difficult.

- Many studies assessing the issue of product lifespan have shown that the substitution of the Sn-Pb solder for a Lead-free one is a complex topic with results that raise questions about low environmental impact metal alloys. Thus, more research is still necessary.

- Regarding the thermal cycling test that allowed for checking effects in the climate chamber at high temperatures for the class 1 product type (electronic products in general, including consumer products, as long as they fulfil the requirement of a functioning PCB), results showed that the boards were still working after a 100-cycle test with monitoring.

- Still in regards to the thermal cycling test, the Lead-Free boards were the ones that kept most stability, whereas the Sn-Pb and the Concept boards showed a fluctuation with greater amplitude in relation to current and resistance. In the correlation graphs, it was possible to see that temperature and time did not influence Current and Resistance significantly.

- As for the vibration test, the results were satisfactory. No functioning problems were identified after the service condition number 4 electronic products reliability test. An important issue in the assembling process, which had already been detected before the test, is that certain components presented a hard-to-fix point. However, there were no problems regarding functioning.

- Taking into consideration the pressure fixing type, it is important to highlight again what was observed in the visual analysis test and in the x-ray inspection test: Through-hole electronic components have pins with different sizes and diameters or thickness, which makes assembling difficult. Therefore, in this context, SMD components would have an advantage since they do not require the “pin-folding” stage. Nevertheless, SMD components do require manufacturing stages in the components assembling process.

- In relation to the salt-spray test, results showed that the Lead-Free metal alloy (99,3Sn-0,7Ag) employed underperformed, displaying a greater number of corrosion spots when compared to the Sn-Pb and the Concept boards. Thus, in this type of test, it was

important to try out the Concept boards with and without protection in order to check for differences.

- Many ways of improving the fixing system were contemplated and they can still be developed. However, better projects and definitions are necessary in this case as, for instance, the holes for receiving the PTHs components that could be smaller and metalized, allowing for a better connexion.

- On the material used in the component pins, usually made of iron alloys without any sort of protection, it is important to look for alternative materials that would be more resistant to corrosion and also that would work properly. Another important point regarding the components is the lack of a more rigorous standard pin size and diameter, which made assembling and disassembling quite difficult.

- Comparing the fixing systems, the new system presents a smaller quantity of toxic materials and makes a few-stage separation process possible. It also eliminates the need for processes that demand too much energy, for instance, mechanical separation (milling) and metallurgy (pyrometallurgy), making assembling and disassembling easier.

- When working with the prototypes, it was possible to observe that the assembling of both big and small components is viable. Also, in disassembling, it was possible to identify potential for the recycling of specific parts, replacing faulty components in order to extend the lifespan of the board.

- The recent substitution of traditional Sn-Pb for Lead-Free alloys still seems to remain a controversial issue, especially in regards to questions of reliability and environmental impact. The best choice is not clear.

- Looking at the results obtained with the Concept board, it is fair to conclude that they are quite encouraging. More studies on the development of new fixing systems and alternative materials that cause low environmental impact and are easily recycled should continue to be pursued.

- A patent application for the final proposal of a pressure fixing system was required. Register number: BR10201300551. Deposit date: 7th March, 2013 (MARQUES & MALFATTI, 2013).

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de métodos alternativos de fixação para componentes de circuitos impressos ainda exige muitos estudos a serem realizados. Como sugestões para trabalhos futuros podem ser destacadas os seguintes:

- Aperfeiçoar o sistema de fixação proposto, melhorando o projeto das placas em relação a espessura das trilhas, como também a metalização dos furos permitindo um contato maior entre as hastes metálicas e as trilhas;
- Prototipar outras placas Conceito com elementos de fixação, utilizando parafusos de materiais poliméricos para testar a durabilidade no teste de névoa salina;
- Estudar novas placas Conceito com placas que pressionam o circuito com diferentes materiais, desde polímeros transparentes e polímeros elastoméricos que permitiriam uma conformação dos componentes SMD;
- Realizar novos protótipos comparando com a solda Sn-Pb, com outras ligas *Lead-Free* e novos conceitos de placa Conceito com placas base com materiais alternativos e novas técnicas de processos, como processos de impressão 3D.
- Utilizar novos materiais e processos para comparação, entre eles a selagem da placa com o processo chamado de *conformal coating* e a utilização de Polímeros Condutores Eletrônicos (Pce) nas trilhas para testes;
- Realizar novos testes das placas com outras condições de ciclagem térmica e choque térmico;
- Estudar normas e realizar testes de queda (*drop test*) e também realizar simulações em softwares específicos para este objetivo;
- Realizar a análise de impacto ambiental (Avaliação do ciclo de vida) de diferentes placas em softwares específicos, tais como Eco-indicator 99 e CES Edupack, dentre outros possíveis;
- Estudar e desenvolver a placa Conceito em projetos mais complexos, como por exemplo, placas com diversidade de camadas;
- Analisar os protótipos das placas quanto à questão da desmontabilidade da placa desenvolvida, avaliando o tempo necessário para desmontar esta placa comparando com a placa Sn-Pb e a *Lead-free*, apontando vantagens e desvantagens, computando o tempo e as diferentes ferramentas necessárias para o desmonte eficaz das mesmas.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 3M COMPANY. **Adesivo Jet-melt 7089**: Dados técnicos. Campinas, [2015?]. Disponível em: <<http://multimedia.3m.com/mws/media/1006900/3m-adesivo-jet-melt-7089.pdf?fn=7089.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2015.
2. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**: 2013. São Paulo: Abrelpe, 2013. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm>. Acesso em: 25 jan. 2014.
3. AEA TECHNOLOGY. **WEEE & Hazardous Waste**: A report produced for DEFRA, 2004.
4. ALMEIDA, C. et al. Emery as a tool for Ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. **Journal of Cleaner Production**. 18: 32–43, 2010.
5. ALMEIDA, C. et al. Assessing the replacement of lead in solders: effects on resource use and human health. **Journal of Cleaner Production**. 47: 457-464, 2013.
6. ALTIUM. **Altium Designer Summer 09**. La Jolla, USA: Altium, 2013. 1 CD-ROM.
7. ALVARENGA, A. **Avaliação experimental dos efeitos da fadiga térmica nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável austenítico**. Tese de doutorado em Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. UFMG. Belo Horizonte, 2006.
8. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI)/ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-2222** - Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards. Northbrook, Illinois, 1998.
9. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E1823-96**: Standard terminology relating to fatigue and fracture testing. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996.
10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM B117-11**: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
11. ANDERSEN, WALNUM e ANDRAE. **Life Cycle Assessment of Electronics**: Ugelstad-particles Ball Grid Array and Chip Scale Packaging. Vestlandsforsking-rapport nr. 6, 2010.
12. ANDRAE, A. **Global Life Cycle Impact Assessments of Material Shifts**: The example of a Lead-free Electronics Industry. London: Springer, 2010. 183 p.

13. ANDRAE, A.; ITSUBO, N.; INABA, A. **Global environmental impact assessment of the Pb-free Shift**. Soldering & Surface Mount Technology. 19: 18-28. 2007.
14. ANTREKOWITSCH, H. et al. Metallurgical recycling of electronic scrap. In: **Proceedings of the EPD Congress 2006**, 12–16 March 2006, San Antonio, Texas, pp. 899–908. 2006.
15. ARAI, T.; MATSUO, T.; TAKADA, T. **IT3 Thermal Cycling Test Report: Solder type: Sn63 Pb37**. Hirose Electric Co., Ltd., 2008. (Technical report).
16. ARAÚJO, M. et al., 2012. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. **Waste Management**. 32: 335–342, 2012.
17. ASHBY, M. **Materials Selection and Process in Mechanical Design**. Oxford: Butterworth Heinemann, 1999.
18. ASHBY, M.; JONES, D. **Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design: v. 1**. Oxford: Butterworth-Heinemann. Third Edition. 448 p. 2005
19. ASHBY, M. **Materials and Environment: Eco-informed Material Choice**. Butterworth-Heinemann, 2 edition, 2012. 628 p.
20. ASKELAND, D. **Ciencia e Ingeniería de los Materiales**. Madrid: Thomson Learning. 805 pp., 2001.
21. ASSAY, T.; LAMBERT, M. The empirical case for the common factors in therapy: Quantitative findings. In: B. L. Duncan, M. A. Hubble, & S. D. Miller (Eds.). **The heart and soul of change**. Washington, D.C.: American Psychological Association. 1999, p. 23-55.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS (ABETRE). **Classificação de Resíduos Sólidos: Norma ABNT NBR 10.004:2004**. São Paulo, 2006.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
24. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-9252: Guidelines and Requirements for Electrical Testing of Unpopulated Printed Boards**. Northbrook, Illinois, 2001.
25. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-2221A – Generic standard on printed board design**. Northbrook, Illinois, 2003.
26. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-A-600G – Acceptability of Printed Board**. Northbrook, Illinois, 2004.

27. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-9701:** Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments. Northbrook, Illinois, 2002.
28. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-9701A:** Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments. Northbrook, Illinois, 2006.
29. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-9252A:** Requirements for Electrical Testing of Unpopulated Printed Boards. Northbrook, Illinois, 2008.
30. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES (IPC). **IPC-TM-650** - Test Methods Manual. Northbrook, Illinois, 2009.
31. AYOB, M., KENDAL, G. A triple objective function with a chebychev dynamic pick-and-place point specification approach to optimise the surface mount placement machine. **European Journal of Operational Research**. 164: 609–62, 2005.
32. AYOB, M., KENDALL, G. A survey of surface mount device placement machine optimisation, machine classification. **European Journal of Operational Research**. 186: 893–914, 2008.
33. BARNES, J. **Bibliography for Designing Lead-Free, RoHS-Compliant, and WEEE-Compliant Electronics**. Disponível em: <<http://www.dbicorporation.com/rohsbib.htm>>. Acesso em: 06 de out. 2010.
34. BASDERE, B.; SELIGER, G. Disassembly factories for electrical and electronic products to recover resources in product and material cycles. **Environmental Science and Technology**. 37: 5354–5362, 2003.
35. BAXTER, M. **Projeto de Produto: Guia Prático Para o Design de Novos Produtos**. São Paulo: Blucher, 2011.
36. BAYER MATERIALSCIENCE. **Snap-fit Joints for Plastics: a Design Guide**. Pittsburgh, PA. 2013.
37. BARDAL, E. **Corrosion and Protection**. London: Springer, 2004.
38. BEALL, G. **By Design: Part design 109 - Textured finishes**. IMM Magazine Article Archive, 2000. Disponível em <http://www.plasticstoday.com/articles/design-part-design-109-textured-finishes>. Acesso em: 10 nov. 2012.
39. BEER et al. **Estática e mecânica dos materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

40. BENDAOUDL, TILMATINEL, A. MEDLES, K. Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications. In: **IAS Annu. Meet.** (IEEE Ind. Appl. Soc.) 3: 1552–1558, 2004.
41. BERNARDES, A. et al. **Recycling of printed circuit boards by melting with oxidising/reducing top blowing process**, in: B. Mishra (Ed.), Proceedings of Sessions and Symposia Sponsored by the Extraction and Processing Division, **TMS Annual Meeting**, Orlando, FL, 1997, pp. 363–375.
42. BEVILACQUA, M.; GIACCHETTA, G; CIARAPICA, F. Development of a sustainable product lifecycle in manufacturing firms: a case study. **International Journal of Production Research.** 45: 4073–4098. 2007.
43. BHASKAR, T. et al. Pyrolysis studies of PP/PE/PS/PVC/HIPS-Br plastics mixed with PET and dehalogenation (Br, Cl) of the liquid products. **J. Anal. Appl. Pyrolysis.** 72: 27–33, 2004.
44. BIGUM, M.; BROGAARD, T.; CHRISTENSEN, H. Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. **Journal of Hazardous Materials.** 207–208: 8–14, 2012.
45. BOENI, H.; SILVA, U.; OTT, D. E-waste recycling in Latin America: overview, challenges and potential. In: **Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology.** Cancun, Mexico, October 12–15, 2008.
46. BOKS, C. The soft side of eco-design. **Journal of Cleaner Production.** 14: 1346–1356, 2006.
47. BONENBERGER, P. **The first snap-fit handbook: creating and managing attachments for plastic parts.** Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2ed. 2005.
48. BONNEMA, M. **Sustainable Product Design: Just the Facts.** Haworth, Inc. 2006.
49. BOOTHROYD, G; ALTING, L. Design for Assembly and Disassembly. *Annals of the CIRP.* 41: 625-636, 1992.
50. BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly.** 3ed. 2010.
51. BOVEA, M.; WANG, B. Identifying environmental improvement options by combining life cycle assessment and fuzzy set theory. **International Journal of Production Research.** 41: 593–609. 2003.
52. BOVEA, M.; PÉREZ-BELIS, V. A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. **Journal of Cleaner Production.** 20: 61-71, 2012.

53. BRASIL. **Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 10 nov. 2012.
54. BREBU, M. et al. Removal of nitrogen, bromine, and chlorine from PP/PE/PS/PVC/ABS-Br pyrolysis liquid products using Fe- and Ca-based catalysts. **Polym. Degrad. Stab.** 87: 225–230, 2005.
55. BRENNAN, L.; GUPTA, S.; TALEB, K. Operations Planning Issues in an Assembly/Disassembly Environment. **International Journal of Operations & Production Management.** 14 (9), 57-67, 1994.
56. BRIGDEN K. et al. **Recycling of electronic wastes in China and India:** workplace and environmental contamination. Exeter: Greenpeace International, 2005.
57. BRODERSEN, K. et al. Scrap of electronics: hazardous waste or raw material resources. **Proceedings Intl. Conference on Recycling of Metals.** The European Council of ASM Intl., Dusseldorf, Germany, pp. 45–51. 1992.
58. BOULAAJAJ, A; CABRERA, J.; PRADO, J. Effect of initial microstructure, frequency and temperature on the low cycle fatigue behaviour of the soldering alloys 96.5Sn–3.5Ag and 63Sn–37Pb. **Engineering Failure Analysis.** 15: 220–228, 2008.
59. CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais:** Uma Introdução. 5ed. CIDADE: LTC, 2007.
60. CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR. **CES EduPack 2014.** Cambridge: Granta Design, 2014. 1 CD-ROM.
61. CARRELL, J. et al. Shape memory polymer snap-fits for active disassembly. **Journal of Cleaner Production.** 19: 2066-2074, 2011.
62. CERDAN, C. et al. Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case study. **Journal of Cleaner Production.** 17: 1638–1643, 2009.
63. CHANCEREL, P. et al. Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. **Journal of Industrial Ecology.** 13: 791-810, 2009.
64. CHIODO, J. **Design for Disassembly Guidelines.** Active Disassembly Research, January 2005. Disponível em: <<http://www.activedisassembly.com/strategy/design-for-disassembly/>>. 2005.
65. CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica.** Fluência. 2015. Disponível em: <<http://grupo.cimm.com.br/>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

66. COBBING, M. **Toxic tech: not in our backyard**, uncovering the hidden flows of e-waste. Amsterdam: Greenpeace International, 2008.
67. COOMBS, C. (Org.). **Printed Circuits Handbook**. 6ª Edição, Nova York: McGraw-Hill Handbooks, 2008.
68. CUI, J. e FORSSBERG, E. **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review**. Journal of Hazardous Materials. 99: 243–263. 2003.
69. CUI, J. e ZHANG, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review**. Journal of Hazardous Materials. 158: 228-256, 2008.
70. CUNLIFFE, A.; JONES, N.; WILLIAMS, P. Recycling of fibre-reinforced polymeric waste by pyrolysis: thermo-gravimetric and bench-scale investigations. **J. Anal. Appl. Pyrolysis**. 70: 315-338, 2003.
71. DEFENSE LOGISTICS AGENCY. MIL-P-55110: Performance Specification, Printed Wiring Board, Rigid, General Specification for. Columbus, OH, 2014.
72. DESCALESCU, L. et al. **Multiple-needle corona electrodes for electrostatic processes application**. IEEE Transactions on Industry applications. 35: 543–548, 1999.
73. DEUBZER, O. **Explorative study into the sustainable use and substitution of soldering metals in electronics**. PhD thesis, Delf University, Delft, the Netherlands. 2007.
74. DEUTSCHE UMWELTHILFE. **Hamburg – gate to the world for illegal waste exports? Part 1**. How Hanseatic City of Hamburg tries to get rid of its liability. Berlin, 2007.
75. DIETER, G. ASM Handbook Volume 20: Materials Selection and Design. [S.I.]: ASM International. 958 p. 1997.
76. DIMITRAKAKIS, E. et al. **Small WEEE: determining recyclables and hazardous substances in plastics**. Journal of Hazardous Materials. 161: 913–919, 2009.
77. DING, X. et al. Delamination failure in plastic IC packages disassembled from scrapped printed circuit boards engineering. In: **The proceedings of the global conference on sustainable product development and life cycle sustainability and remanufacturing**. Pusan, Korea. 2008.
78. DORO, M. **Sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso**. 2004. 149p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

79. DUAN, H. et al. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns. **Journal of Environmental Management**. 92: 392-399, 2011.
80. DUFLOU, J. et al. Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. 57: 583–600, 2008.
81. EBERT, J.; BAHADIR, M. Formation of PBDD/F from flame-retarded plastic materials under thermal stress. **Environment International**. 29: 711 – 716, 2003.
82. EKVALL, T; ANDRAE, A. Attributional and consequential environmental assessment of the shift to lead-free solders. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 11: 344-353, 2006.
83. EMERY, A.; WILLIAMS, K.; GRIFFITHS, A. A review of the UK metals recycling industry. **Waste Management & Research**. 20: 457-467, 2002.
84. EPA - US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solders in electronics: a life cycle assessment summary**. EPA, Cincinnati, OH. 2005.
85. EPS CANADA (Electronics Product Stewardship Canada). **Environmentally Sound Recycling of Electronics: Guidance document**. 2006.
86. **EQUILAM**. Disponível em: <<http://www.equilam.com.br>>. Acesso em: 2015.
87. ERNST, T.; POPP, R.; ELDIK, R. Quantification of heavy metals for the recycling of waste plastics from electrotechnical applications. **Talanta**. 53: 347–357, 2000.
88. ESWARAIHAH, C. et al. Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier. **Chemical Engineering and Processing**. 47: 565–576, 2008.
89. **ETSP** – Environmental Total Solution Provider. Disponível em: www.etsp.co.kr. Acesso em: 13 jan. 2015.
90. **ETSSOLUTIONS**. Disponível em: <<http://www.etsolution.com>>. Acesso em: 05 jan. 2015.
91. EUROPEAN COMMISSION. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. **Official Journal of the European Union**. 37: 19-23, 2003a.
92. EUROPEAN COMMISSION. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment. **Official Journal of the European Union**. 37: 24-38, 2003b.

93. FARGNOLI, M.; MINICIS, M.; TRONCI, M. Design Management for Sustainability: An integrated approach for the development of sustainable products. **Journal of Engineering and Technology Management**. 34: 29–45, 2014.
94. FAUVE-BURESI, H. WEEE/RoHS: a challenge for industry. In: **Proceedings of 5th international electronics recycling congress**. Hamburg, 2006.
95. FEHR, M.; CASTRO, M.; CALÇADO, M. Condominium waste management by private initiative: a report of a 10-year project in Brazil. **Waste Management & Research**. 28: 309–314, 2010.
96. FENNER, M. **Soldering**: Is the automotive assembler really different to anyone else?. Indium Corporation Europe. Disponível em: <www.Onboard-Technology.com> 2008. Acesso em: 10 nov. 2013.
97. FJELSTAD, J. The Occam process: a new paradigm of promise for printed circuit manufacturing. **CircuiTree**. 20:52–54, 2007.
98. FJELSTAD, J. Environmentally friendly assembly of robust electronics without solder. **Circuit World**. 34: 27–33, 2008.
99. FLANDINET, L. et al. Metals recovering from waste printed circuit boards (WPCBs) using molten salts. **Journal of Hazardous Materials**. 213– 214: 485– 490, 2012.
100. FOGARASI, S. et al. The environmental assessment of two new copper recovery processes from Waste Printed Circuit Boards. **Journal of Cleaner Production**. 54: 264–269, 2013.
101. FREEDMAN, G. Press-fit interconnection. In: COOMBS, Clyde F (Org.). **Printed Circuits Handbook**. 6^a Edição, Nova York: McGraw-Hill Handbooks, 2008a. Cap. 4, p. 115-128.
102. FREEDMAN, G. Soldering materials and metallurgy. In: COOMBS, Clyde F (Org.). **Printed Circuits Handbook**. 6^a Edição, Nova York: McGraw-Hill Handbooks, 2008b. Cap. 4, p. 115-128.
103. **FLUKE CORPORATION**. Disponível em: <<http://en-us.fluke.com/products/digital-multimeters/fluke-179-digital-multimeter.html>>. Acesso em: 05 jan. 2015.
104. GAO, Z.; LI, J.; ZHANG, H. Printed circuit board recycling: a state-of art survey. **Proceedings IEEE International Symposium on Electronics and the Environment**. 2002, p. 234–241.
105. GARETTI, M.; ROSA, P.; TERZI, S. Life Cycle Simulation for the design of Product–Service Systems. **Computers in Industry**. 63: 361–369, 2012.

106. GE MEASUREMENT & CONTROL. **Tecnologia de raio X de alta resolução**. Disponível em: <<http://www.ge-mcs.com/pt/phoenix-xray/applications/pcbas.html>>. Acesso em: 05 jan. 2015.
107. GEMELLI, E. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
108. GENC, S.; W., MESSLER, R.; GABRIELE, G. Methodology for Locking Feature Selection in Integral Snap-Fit Assembly. **Research in Engineering Design**. 10:84-93, 1998.
109. GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
110. GOOSEY, M. e KELLNER, R. **A Scoping Study: End-of-Life Printed Circuit Boards**. Department of Trade and Investment and Shipley Europe Limited, Tech. Rep., 2002. Disponível em: <http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf>. Acesso em: 15 Mar 2012.
111. GOOSEY, M.; KELLNER, R. Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (PCBs). **Circuit World**. 29: 33–37, 2003.
112. GRIESE, H. et al. Environmental assessment of lead free interconnection systems. In: **Proceedings of the Symposium on Lead Free Interconnect Technology, SMTA**. 13–14 June, Boston, USA, 2000.
113. GRIGOLETTO, E.; FERREIRA, I. SMT: materiais, processos de fabricação e resistência à fadiga de soldas. In: **XV Cobem – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**. Águas de Lindóia, 1999.
114. GRIGOLETTO, E. et al. Lead-Containing Wastes Disposal from Electronics Industries in Brazil. **Ingeniería Y Gestion Ambiental**. 1:19-27, 2003.
115. GRIGOLETTO, E. et al. Produtos Eletrônicos e a Poluição Ambiental. **Revista Ciência e Tecnologia**. 9, 2006.
116. GRIPPI, S. **Lixo, reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.
117. GROTE, C. et al. An approach to the EuP Directive and the application of the economic eco-design for complex products. **International Journal of Production Research**. 45 : 4099–4117. 2007.
118. GRUSD, A. Lead-free Solders in Electronics. **Proceedings of Surface Mount International Conference**, San Jose, p. 648-661. 1998.
119. GUNGOR, A.; GUPTA, S.M. Disassembly sequence planning for products with defective parts in product recovery. **Comput. Ind. Eng.** 35: 161–164. 1998.

120. GUO, F. Composite lead-free electronic solders. **J Mater Sci: Mater Electron**. 18:129–145, 2007.
121. GUO, J.; GUO, J.; XU, Z. Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. **Journal of Hazardous Materials**. 168: 567-590, 2009.
122. HAGELÜKEN, C. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling – a holistic approach for interface optimisation between preprocessing and integrated metals smelting and refining. In: **Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and the Environment**, San Francisco, USA, p. 218–223, 2006.
123. HALL, W. e WILLIAMS, P. Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards. **Resources, Conservation and Recycling**. 51: 691-709, 2007.
124. HALLIDAY, D.; RESNICK, Robert; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012
125. HARRIS, P.; WHITMORE M. Alternative Solders for Electronics Assemblies. **Circuit World**. 19: 25 – 27, 1993.
126. HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTING, L. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. 54: 1–21, 2005.
127. HE W. et al. WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. **Journal of Hazardous Materials**. B136: 502–512, 2006.
128. HE, J. et al. Recovery of valuable metal concentrate from waste printed circuit boards by a physical beneficiation technology. **Int. J. Environ. Sci. Technol**. 12:2603–2612, 2015.
129. HENSTOCK, M. **Design for Recyclability**. London: Maney Pub, 1988.
130. HIBBELER, R. **Resistência dos Materiais**. 7º Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
131. HICKS, C.; DIETMAR, R.; EUGSTER, M. The recycling and disposal of electrical and electronic waste in China—legislative and market responses. **Environmental Impact Assessment Review**. 25: 459– 471, 2005.
132. HILTY L.; SOM, C; KÖHLER, A. Assessing the human, social and environmental risks of pervasive computing. **Human and Ecological Risk Assessment**. 10: 853–74, 2004.
133. HILTY, M. Electronic waste – an emerging risk? **Environmental Impact Assessment Review**. 25: 431 – 435, 2005.

134. HISCHIER, R.; WÄGER, P.; GAUGLHOFER, J. Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Environmental Impact Assessment Review**. 25: 525– 539, 2005.
135. HOFFMANN, J. Recovering precious metals from electronic scrap. **Jom-J. Miner. Met. Mater. Soc.** 44: 43–48, 1992.
136. HONEYWELL INTERNATIONAL. **Honeywell Plastics: Snap-Fit Design Manual**. U.S.A. 2002.
137. HUANG, Y. et al. Partial removal of PCDD/Fs, coplanar PCBs, and PCBs from municipal solid waste incineration fly ash by a column flotation process. **Environ. Sci. Technol.** 41: 257–262, 2007.
138. HUANG, K.; GUO, J.; XU, Z. Recycling of waste printed circuit boards: a review of current technologies and treatment status in China. **Journal of Hazardous Materials**. 164: 399–408, 2009.
139. HUISMAN, J. et al. **2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)** (Final Report). United Nations University e AEA Technology, Bonn, Germany e Didcot, UK, 2007.
140. HUNG-LUNG, C. et al. Pyrolysis characteristics of integrated circuit boards at various particle sizes and temperatures. **Journal of Hazardous Materials**. 149: 151-159, 2007.
141. HWANG, J. S. **Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing**. New York: McGraw-Hill Professional, 1996.
142. ILGIN, M.; GUPTA, S. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. **Journal of Environmental Management**. 91: 563–591, 2010.
143. ITT FUSE UNISINOS. **Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional**. Disponível em: <<http://www.unisinos.br/itt/ittfuse/>>. Acesso em: 03jan. 2015.
144. JAARSMA, Frank. **Desing in Plastics: part 5, Plastics Assembly Methods**. Ticona Corporation, Summit, NJ. 2001.
145. JANG, Y. e TOWNSEND, T. Leaching of Lead from computer printed wire boards and cathode ray tubes by municipal solid waste landfill leachate. **Environmental Science and Technology**. 37: 4718–4784. 2003.
146. JANZ, A.; ROTTER, V.; BILITEWSKI, B. Transfer of heavy metals released by WEEE and batteries into the high caloric fraction during MBT-processes. In: **Proceedings**

- of First International Conference on Hazardous Waste Management**, Chania, Greece, 2008.
147. JAWITZ, M. **Printed Circuit Board Materials Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1997.
 148. JIE, G.; YING-SHUN, L.; MAI-XI, L. Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 83: 185-189, 2008.
 149. JOHANSSON, J.; BJRKLUND, A. Reducing Life Cycle Environmental Impacts of Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling. **Journal of Industrial Ecology**. 14: 258-269, 2010.
 150. JOINT ELECTRON DEVICES ENGINEERING COUNCIL (JEDEC). **JESD22-B103B: Vibration, Variable Frequency**. Arlington, 2002.
 151. JOINT ELECTRON DEVICES ENGINEERING COUNCIL (JEDEC). **JESD22-A100C: Cycled Temperature-Humidity-Bias Life Test**. Arlington, 2007.
 152. JURAN, J.M. **Quality Control Handbook**. McGraw-Hill Book Company, 1988.
 153. KAHAN, W. Lecture Notes on the Status of IEEE Standard 754 for Binary Floating-Point Arithmetic. **Lecture Notes on the Status of IEEE 754**. 1997.
 154. KAMINSKY, W. Chemical recycling of mixed plastics of pyrolysis. **Advances in Polymer Technology**. 14: 337–344, 1995.
 155. KANG, H.; SCHOENUNG, J. Electronic waste recycling: a review of U.S. infrastructure and technology options. **Resources, Conservation and Recycling**. 45: 368–400, 2005.
 156. KANG, H.; SCHOENUNG, J. Economic analysis of electronic waste recycling: modeling the cost and revenue of a materials recovery facility in California, **Environ. Sci. Technol.** 40: 1672–1680, 2006.
 157. KASPER, A. et al. Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. **Waste Management**. 31: 2536–2545, 2011.
 158. KEEPING, S. Lasers Lead the Way for Microvias. **Electronic Production**. 29: 51, 2000.
 159. KERS, J. et al. Recycling of electronic wastes by disintegrator mills and study of the separation technique of different materials. 14: 297-300, **Materials Science (MEDŽIAGOTYRA)**. 2008.
 160. KHANDPUR, R. (Org.) **Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, and Assembly**. Nova York: McGraw-Hill Electronic Engineering, 2005. 704 p.

161. KIEWIET, C. et al. Electrostatic separation of fine particle in vibrate fluidized beds. **IEEE Transactions on Industry applications**. 6: 526–530, 1978.
162. KINDLEIN, W. et al. Estudo da Melhoria da Sustentabilidade de Projeto de Novos Produtos Baseados na Biônica. In: **I Encontro da ANPPAS – Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade**. Campinas, SP. 2002.
163. KINDLEIN, W.; PLATCHECK, E.; CÂNDIDO, L. Analogia entre as metodologias de desenvolvimento de produtos atuais incluindo a proposta de uma metodologia com ênfase no ecodesign. In: **II Congresso Internacional de Pesquisa em Design**. Rio de Janeiro, 2003.
164. KINDLEIN, W. et al. Development of junction elements from study of Bionics. **Journal of Bionic Engineering**. 4: 41-46, 2007.
165. KINYANJUI, R. et al. Solder Joint Reliability of Pb-free SnAgCu Ball Grid Array (BGA) Components in SnPb Assembly Process. **Proceedings of APEX 2008**, S15-02, Las Vegas, NV, 2008.
166. KINOSHITA, T. et al. Metal recovery from non-mounted printed wiring boards via hydrometallurgical processing. **Hydrometallurgy**. 69: 73–79, 2003.
167. KOYANAKA, S. et al. Particle shape of copper milled by swing–hammer-type mill. **Powder Technology**. 90: 135–140, 1997.
168. KUO, T. The construction of a collaborative-design platform to support waste electrical and electronic equipment recycling. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. 26: 100–108, 2010.
169. LACOURSIERE, C. **Electronic waste recovery business (E-128)**. Norwalk, CT, USA: Business Communication Company Inc. (BCC); 2005.
170. LADOU, J. Printed circuit board industry. **Int. J. Hyg. Environ. – Health**. 209: 211–219, 2006.
171. LASSEN, C.; LOKKE, S. **Brominated Flame Retardants: Substance Flow Analysis and Assessment of Alternatives**. Environmental Project Nr. 494 1999. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark, 1999.
172. LEE, C. et al. Management of scrap computer recycling in Taiwan. **Journal of Hazardous Materials**. A73: 209–220, 2000.
173. LEE, C. et al. An overview of recycling and treatment of scrap computers. **Journal of Hazardous Materials**. B114: 93–100, 2004.

174. LEE, J.; SONG, H.; YOO, J. Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea: a review. **Resources, Conservation and Recycling**. 50: 380-397, 2007.
175. LEE, J. et al. Thermal properties and phase stability of Zn–Sn and Zn–In alloys as high temperature lead-free solder. **Materials Transactions**. 48:584–593, 2007.
176. LEE, J.; KIM, Y.; LEE, J. Disassembly and physical separation of electric/electronic components layered in printed circuit boards (PCB). **Journal of Hazardous Materials**. 241–242: 387–394, 2012.
177. LEUNG, A. et al. **Heavy metals concentrations of surface dust from waste recycling and its human health implications in southeast China**. *Environ. Sci. Technol.* 42: 2674–2680, 2008.
178. LI Y.; WONG, C. Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: materials, processing, reliability and applications. **Materials Science and Engineering**. 51:1–35, 2006.
179. LI, J. et al. Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. **Environ. Sci. Technol.** 41: 1995–2000, 2007.
180. LI, J.; XU, Z.; ZHOU, Y. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards. **Journal of Electrostatics**. 65: 233-238, 2007.
181. LI, J. et al. Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field. **Journal of Hazardous Materials**. 153: 269–275, 2008.
182. LI, Y.; GUAN, J. Life cycle assessment of recycling copper process from copper slag. In: **ICEET '09 Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology**. 16 e 18 Oct., vol. 1, 198-201, 2009.
183. LJUNGBERG, L. Materials selection and design for structural polymers. **Materials and Design**. 24: 383–390, 2003.
184. LJUNGBERG, L. Materials selection and design for development of sustainable products. **Materials and Design**. 28: 466–479, 2007.
185. LONG, L. et al. Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards. **Journal of Hazardous Materials**. 177: 626–632, 2010.
186. LU, M. et al. The study of recovering waste printed circuit board by mechanical method. **Techniques and Equipment for Environmental pollution Control**. 10: 30–35, 2000.

187. LUDA, M. Recycling of Printed Circuit Boards. In: KUMAR, S (Ed). **Integrated Waste Management**. Vol. II, 2011.
188. MAESTRELLI, L. e GRIGOLETTO, E. Lead Free Implementation - A Case Study Correlating the Thermal Profile and Laboratory Analysis. In: **IPC Printed Circuits Expo, APEX and the Designers Summit**. Proceedings of APEX Technical Conference, Anaheim, CA. 2006.
189. MANZINI, E. **A matéria da invenção**. Centro Português de Design, Lisboa, 1993.
190. MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
191. MARQUES, A.; GUANABARA, A.; KINDLEIN, W. Teaching of Ecodesign in course of Design: a Brazilian experience. In: **I International Symposium on Sustainable Design**. Curitiba, 2007.
192. MARQUES, A. **Análise de Similares**: Contribuição ao desenvolvimento de uma metodologia de seleção de materiais e ecodesign. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
193. MARQUES, A.; MARRERO, J.; MALFATTI, C. Teaching materials focusing on sustainability: a Brazilian experience in a design course. In: **3rd International Materials Education Symposium**. Cambridge, 2011.
194. MARQUES, A.; MALFATTI, C. **Processo de produção de placas de circuito impresso e produto obtido**. 2013, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201300551, data de depósito: 07/03/2013. Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.
195. MARQUES, A.; CABRERA, J.; MALFATTI, C. A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards. **SpringerPlus**. 2:521, 2013a.
196. MARQUES, A.; CABRERA, J.; MALFATTI, C. Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability. **Journal of Environmental Management**. 131:298-306, 2013b.
197. MARQUES, A. et al. Alternative methods to attach components in printed circuit boards to improve their recyclability. **Dyna**. 81: 146-152, 2014.
198. MCNEEL. **Rhinoceros 4.0**. Seattle, USA: McNeel, 2010. 1 CD-ROM.
199. MEHTA, C.; WANG, B. Green Quality Function Deployment III: A methodology for developing environmentally conscious products. **Journal of Design and Manufacturing Automation**. 4: 1-16, 2001.

200. MELCONIAN, S. **Mecânica técnica e resistência dos materiais**. 18. ed. São Paulo: Érica, 2007. 360 p.
201. MEIRA, C.; KIPERSTOK, A. Prevenção da poluição – Cap. 5: **ACV: análise do ciclo de vida**. Bahia, 2003.
202. MENAD, N.; BJORKMAN, B.; ALLAIN, E. Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap. **Resources, Conservation and Recycling**. 24: 65–85, 1998.
203. MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical Behavior of Materials**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008, 82 p.
204. MIHAESCU, R; CARSTEA, H. Ecological technologies for soldering without lead in electronic and telecommunications: today and tomorrow. **Proc 26th Int Spring Seminar on Electron Technol: Integrated Managem of Electron Mater Prod**, 8-11 May, High Tatras, Slovak Republic. 232-234, 2003.
205. MO, Z. **Reliability and applications of adhesives for microsystem packaging**. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2005.
206. MOHABUTH, N.; HALL, P.; MILES, N. Investigating the use of vertical vibration to recover metal from electrical and electronic waste. **Minerals Engineering**. 20: 926–932, 2007.
207. MORRIS, J. Isotropic conductive adhesives: Future trends, possibilities, and risks. In: **IEEE Polytronic 2005**. Conference. 2005.
208. MORRIS, J.; LIU, J. Electrically conductive adhesives: a research status review. In: **Micro-and opto-electronic materials and structures: physics, mechanics, design, reliability, packaging**. 1st edn. New York: Springer, 2007, p. B527-B570.
209. MURUGAN, R. et al. Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model. **Powder Technology**. 183: 169-176, 2008.
210. NAKAHARA, H. Types of printed wiring boards. In: COOMBS, Clyde F (Org.). **Printed Circuits Handbook**. 6^a Edição, Nova York: McGraw-Hill Handbooks, 2008, p. 115-128.
211. NAVARRO, R. **Materiais e Ambiente**. João Pessoa: Editora universitária, UFPB, 2001.
212. NIKON METROLOGY. **X-ray and CT Inspection**. Disponível em: http://www.nikonmetrology.com/en_US/Products/X-ray-and-CT-Inspection. Acesso em: 11 jan. 2015.

213. NIU, X. e LI, Y. Treatment of waste printed wire boards in electronic waste for safe disposal. **Journal of Hazardous Materials**. 145: 410–416, 2007.
214. NOGUEIRA, C.; QUEIROZ-NETO, J. e MANZATO, L. **O impacto do uso de solda lead free no processo de tecnologia de montagem em superfície (SMT)**. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. João Pessoa – PB, 2007.
215. NOUSIAINEN, O. et al. Metallurgical reactions in composite 90Pb10Sn/lead-free solder joints and their effect on reliability of LTCC/PWB assembly. **Journal of Electronic Materials**. 35: 1857–1865, 2006.
216. ONGONDO, F.; WILLIAMS, I.; CHERRETT, T. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. **Waste Management**. 31: 714–730, 2011.
217. OWENS, C. et al. Identification of estrogenic compounds emitted from the combustion of computer printed circuit boards in electronic waste. **Environmental Science and Technology**. 41: 8506–8511, 2007.
218. PEIRAVI, A. Testing and Reliability Improvement of High Reliability Consumer Electronics Products Manufactured on Printed Circuit Boards. **Journal of American Science**. 2009:5(3) 95-105.
219. PIGOSSO, D. et al. Ecodesign methods focused on remanufacturing. **Journal of Cleaner Production**. 18: 21–31, 2010.
220. PUCKETT J. et al. **Exporting harm: the high-tech trashing of Asia**. BAN and SVTC – The Basel Action Network and Silicon Valley Toxics Coalition. Seattle WA, USA, 51 pp. Disponível em: <<http://www.ban.org/e-waste/technotrashfinalcomp.pdf>>, 2002.
221. PUENTE, S.T., TORRES, F. and GIL, P. As approach to disassembly sequence generation. In: **IFAC Workshop on Intelligent Assembly and Disassembly**. Canela, Brasil. 2001.
222. QI, H. et al. Effects of Printed Circuit Board Materials on Lead-free Interconnect Durability. **Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics**, Polytronic, 2005. IEEE Polytronic 2005. 23-26 Oct. 2005, 140 – 144, 2005.
223. RAFIROIU, D. et al. Inception of corona discharges in typical electrode configurations for electrostatic processes applications. **Thirty-Fourth IAS Annual Meeting** (Industry Applications Conference). 387–392, 1999.

224. RAHIMIFARD, S.; ABU BAKAR, M.; WILLIAMS, D. Recycling process planning for the End-of-Life management of waste from electrical and electronic equipment. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. 58: 5-8, 2009.
225. RAHMAN, F. et al. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants (Review). **The Science of the Total Environment**. 275: 1-17, 2001.
226. RALSTON, O. **Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids**. Amsterdam, New York, 1961.
227. RAMANI, K. et al. Integrated Sustainable Lifecycle Design: A Review. **Journal of Mechanical Design**. 132: 1-15, 2010.
228. RICHTER, H.; LORENZ, W. e BAHADIR, M. Examination of organic and inorganic xenobiotics in equipped printed circuits. **Chemosphere**. 35: 169-179, 1997.
229. RIESS, M. et al. Analysis of flame retarded polymers and recycling materials. **Chemosphere**. 40: 937-941, 2000.
230. ROBINSON, B. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. **Science of the Total Environment**. 408: 183-191, 2009.
231. ROCHA, G. **Diagnosis of Waste Electric and Electronic Equipment Generation in the State of Minas Gerais**. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). Governo Minas, Minas Gerais. 2009. Disponível em: <http://ewasteguide.info/Rocha_2009>. Acesso em: 09 out. 2013.
232. RODRIGUES, A. **Impactos sócio-ambientais dos resíduos de equipamentos eletrônicos e eletrônicos**: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil. Dissertação (Mestrado). Universidade Metodista de Piracicaba, Departamento de Engenharia de Produção, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Santa Bárbara D'Oeste, 2007.
233. ROTTER, S. **Schwermetalle in Haushaltsabfällen (Heavy Metals in Household Waste)**. Doctoral Thesis. Edited by Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V.Pirna, Germany, 2002.
234. RUBIN, R. et al. Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. **Journal of Cleaner Production**. 64: 297-305, 2014.
235. SAKAO, T. A. QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design. **International Journal of Production Research**. 45: 4143-4162, 2007.
236. SCHELDON, C. **ISO 14001 and beyond**: Environmental managements systems in the real world. Sheffield: Greenleaf Publishing, 1997.

237. SCHISCHKE, K.; HAGELÜKEN, M.; STEFFENHAGEN, G. **Introdução às estratégias de ECODESIGN** – Porquê e Como. Fraunhofer IZM, Berlim, Alemanha. Disponível em: <<http://www.ecodesignarc.info>>. Acesso em: 04 de Set. 2010.
238. SCHLUMMER, M. et al. Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. **Chemosphere**. 67: 1866-1876, 2007.
239. SCHMELZER, G.; WOLF, S. e HOBERG, H. **Neues nassaufbereitungsverfahren fuer bestandteile von rotschlacken** (new wet treatment for components of incineration slag), Aufbereitungs-Tech. 37: 149–157, 1996.
240. SEPÚLVEDA, A. et al. A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India. **Environmental Impact Assessment Review**. 30: 28-41, 2010.
241. SHARON, G; TULKOFF, C. **Temperature Cycling and Fatigue in Electronics**. DfR Solutions. Acesso em 10 jan. 2015. <http://www.dfrsolutions.com/>
242. SILVA, F. et al. Criação de uma Interface Multimídia Aplicada ao Estudo do Ecodesign - “CD-ROM Ecodesign: Elementos de Junção”. In: **P&D – Design**. Curitiba. 2006.
243. SINHA-KHETRIWALA, D.; KRAEUCHIB, P.; SCHWANINGER, M. A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India. **Environmental Impact Assessment Review**. 25: 492–504, 2005.
244. SKWAREKA et al. Analysis of tin whisker growth on lead-free alloys with Ni presence under thermal shock stress. **Materials Science and Engineering B**. 176: 352–357, 2011.
245. **SMART GROUP** - Surface Mount and Related Technologies. Disponível em: <http://www.smartgroup.org/>. Acesso em: 10 abr. 2011.
246. SMITH, W.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre: Bookman, 2012.
247. SPAHR, Tim. **Snap-Fits for Assembly and Disassembly**. Ticon. 1991.
248. SURESH, S. **Fatigue of materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. xxi, 679 p.
249. STEVELS, A. **Adventures in EcoDesign of Electronic Products: 1993-2007**. Enschede, The Netherlands: PrintPartners Ipskamp, 2007.

250. SUBRAMANIAN, K. (Ed.). Lead-free electronic solders. A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics. Publisher: Springer. 1 edition, 384 p., 2007.
251. SUGANUMA, K. Advances in lead-free electronics soldering. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**. 5: 55-64, 2001.
252. SUGANUMA, K. **Lead-free soldering in electronics: science, technology and environmental impact**. CRC Press. 2003.
253. SUTHERLAND, J.; GUNTER, K.; WEINMANN, K. A Model for Improving Economic Performance of a Demanufacturing System for Reduced Product End-of-Life Environmental Impact. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**. 51: 45–48, 2002.
254. SVTC - Silicon Valley Toxics Coalition. **Just say no to E-waste: Background document on hazards and waste from computers**. 2007. Disponível em: http://cmase.uark.edu/teacher/Environmental_Ed/2006%20E-Waste%20Info/E-Waste/Just%20Say%20No%20-%20E-Waste%20Backgrounder.pdf. Acesso em: 20 out. 2013.
255. SZCZYGIEL, Z. et al. 1998. The Direct Reduction of Sulfide Minerals for the Recovery of Precious Metals. **Journal of Metals**. 50: 55–59, 1998.
256. TALEB, K. e GUPTA, S. Disassembly of multiple product structures. **Computers Ind. Engin.** 32: 949-961, 1997.
257. TANAKA, H.; SHIGEHARU, A e YAMAMOTO, S. **Confirming reliability of printed circuit boards with temperature cycle and thermal shock**. ESPEC Technology Report, no. 3, ESPEC Corp., 1997.
258. TANSKANEN, P.; TAKALA, R. A decomposition of the end of life process. **Journal of Cleaner Production**. 14: 1326-1332, 2006.
259. TANSKANEN, P. Management and recycling of electronic waste. **Acta Materialia**. 61: 1001–1011, 2013.
260. TAURINO, R.; POZZI, P.; ZANASI, T. Facile characterization of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) for mechanical recycling. **Waste Management**. 30: 2601–2607, 2010.
261. TAYLOR, J. Dry electrostatic separation of granular materials. **IAS Annu. Meet.** (IEEE Ind. Appl. Soc.) 35: 1741–1759, 1988.
262. TELLER, M. Recycling of electronic waste material. In: Arnim von Gleich (ed.). **Sustainable Metals Management: Securing our Future - Steps Towards a Closed Loop Economy**. Springer. 19: 563–576, 2006.

263. THEO, L. Integrated recycling of non-ferrous metals at Boliden Ltd. In: **IEEE International Symposium on Electronics and the Environment**. 1998, p. 42–47.
264. TOWNSEND, T. et al. Leachability of printed wire boards containing leaded and lead-free solder. **Journal of Environmental Management**. 88: 926–931, 2008.
265. TRES, Paul A. **Designing Plastic Parts for Assembly**. Munich: Hanser Publishers. 2006.
266. TSYDENOVA, O.; BENGTTSSON, M. **Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment**. *Waste Management*. 31: 45–58, 2011.
267. TUNCUK, A. et al. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. **Minerals Engineering**. 25: 28-37, 2012.
268. TURBINI, L. et al. Examining the environmental impact of lead-free soldering alternatives. **IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.** 24:4-9. 2003.
269. UMEDA, Y. et al. Toward integrated product and process life cycle planning—An environmental perspective. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. 61: 681–702, 2012.
270. UNEP - United Nations Environment Programme. **E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use**. Environment Alert Bulletin, 2005.
271. UNIFIX. **Silicone**: Ficha técnica. Disponível em: <<http://www.unifix.com.br/>>. Acesso em: 05 jan. 2015.
272. UNITED UNIVERSITY UNION. **2007 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)**. Final Report to European Commission, Bonn, 2007.
273. VASILE, C. et al. Feedstock recycling from the printed circuit boards of used computers. **Energy Fuel**. 22: 1658–1665, 2008.
274. VASUDEVAN, V. et al. Slow Cycle Fatigue Creep Performance of Pb-Free (LF) Solders. **Electronic Components and Technology Conference**. ECTC '07. Proceedings. 57th, 2007.
275. VAZ, E.; ACCIARI, H.; CODARO, E. Um método para avaliar a taxa de corrosão. **Quim. Nova**. 34, 1288-1290, 2011.
276. VEERAKAMOLMAL, P. e GUPTA, S. Design for disassembly, reuse and recycling. In: Goldberg, L. (Ed.), **Green Electronics/Green Bottom Line: Environmentally Responsible Engineering**. Butterworth-Heinemann, pp. 69–82. 2000.

277. VEHLow, J. et al. Thermal treatment of electrical and electronic waste plastics. **Waste Manage. Res.** 18: 131–140, 2000.
278. VEIT, M.; PEREIRA, C.; BERNARDES, A. Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. **Journal of Materials.** 54: 45–47, 2002.
279. VEIT, H. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso.** Tese de doutorado em Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre, 2005.
280. VEIT, et al. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. **Waste Management.** 25: 67-74, 2005.
281. VEIT, H. et al. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. **Journal of Hazardous Materials.** 137: 1704-1709, 2006.
282. VERDANT ELECTRONICS. **Robust, Simplified and Solder-Free Assembly Processing of Electronics Products.** Disponível em: <<http://www.verdantelectronics.com/>>. Acesso em: 22 nov. 2010.
283. VIALI, L. Texto V: **Correlação e regressão.** Série estatística básica. Disponível em: <http://www.mat.pucrs.br/~lori/>. 2014.
284. VLAD, S. et al. **Numerical analysis of the electric field in plate-type electrostatic separators.** In: **IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.).** 3: 1961–1966, 1998.
285. WANG, D. et al. Determination of polybrominated diphenyl ethers in soil and sediment from an electronic waste recycling facility. **Chemosphere.** 60: 810–816, 2005.
286. WCED. **Report of the World Commission Environment and Development: Our Common Future.** Brundtland Commission. Oxford: Oxford university Press, 1987.
287. WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. Environmental Assessment of Products. **Volume 1: methodology, tools and case studies in product development.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. 543p.
288. WIDMER, R. et al. Global perspectives on e-scrap. **Environmental Impact Assessment Review.** 25: 436–458, 2005.
289. WILKINSON, S.; DUFFY, N.; CROWE, M. **Waste from electrical and electronic equipment in Ireland: a status report.** EPA Topic Report, 2001.
290. WILLIAMS, J; SHU, L. Analysis of Remanufacturer Waste Streams across Product Sectors. **CIRP Annals-Manufacturing Technology.** 50: 101–104, 2001.
291. WILLIAMS, E. et al. Environmental, social, and economic implications of global reuse and recycling of personal computers. **Environ Sci Technol.** 42: 6446–6454, 2008.

292. WONG, et al. Trace metal contamination of sediments in an e-waste processing village in China. **Environmental Pollution**. 145: 434-442, 2007.
293. WONG, C.; LU, D. **Materials for Advanced Packaging**. Springer. 2009. 724 p.
294. WU, C.; WONG, Y. Rare-earth additions to lead-free electronic solders. **J Mater Sci – Mater in Electronics**. 18:77–91, 2007.
295. WU, J.; LI, J.; XU, Z. Optimization of key factors of electrostatic separation for crushed PCB wastes using roll-type separator. **Journal of Hazardous Materials**. 154: 161–171, 2008a.
296. WU, J.; LI, J.; XU, Z. Electrostatic separation for multi-size granule of crushed printed circuit board waste using two-roll separator. **Journal of Hazardous Materials**. 159: 230–234, 2008b.
297. WU, J.; LI, J.; XU, Z. Electrostatic separation for recovering metals and nonmetals from waste printed circuit board: problems and improvements. **Environ. Sci. Technol**. 42: 5272–5276, 2008c.
298. WU, J.; LI, J.; XU, Z. A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board. **Journal of Hazardous Materials**. 161: 257–262, 2009.
299. **WÜRTH ELEKTRONIK**. Disponível em: <<http://www.we-online.com>.> Acesso em: 20 set. 2010.
300. YANG, J. et al. Removal force models for component disassembly from waste printed circuit board. **Resources, Conservation and Recycling**. 53: 448-454, 2009.
301. YOKOYAMA, S.; IJI, M. **Recycling of printed wiring boards with mounted electronic parts**. Proceedings IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. 1997, p. 109–114.
302. ZENG, X. et al. A novel dismantling process of waste printed circuit boards using water-soluble ionic liquid. *Chemosphere*. 93: 1288–1294, 2013.
303. ZHANG, S.; FORSSBERG, E. Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. **Resources, Conservation and Recycling**. 21: 247-269, 1997.
304. ZHANG, S.; FORSSBERG, E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. **Powder Technology**. 105: 295–301, 1999.
305. ZHENG, Y. et al. The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the polypropylene composites. **Journal of Hazardous Materials**. 163: 600-606, 2009.

306. ZHOU, Y.; QIU, K. A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards. **Journal of Hazardous Materials**. 175: 823-828, 2010.
307. ZOU, C. et al. Nanoparticles of the lead-free solder alloy Sn–3.0Ag– 0.5Cu with large melting temperature depression. **Journal of Electronic Materials**. 38: 351–355, 2009.
308. ZUCHOWSKI, R. Analysis of the Thermal Fatigue Process. **Journal of Materials Processing Technology**. 1-3: 167-172, 2000.