UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO BARBOSA DE LIMA

Estudo da aplicação do processo *Pin-in-Paste* na
montagem de placas de circuito impresso usando
pasta de solda *lead-free* (SAC)

São Paulo

2011

RICARDO BARBOSA DE LIMA

Estudo da aplicação do processo *Pin-in-Paste* na
montagem de placas de circuito impresso usando
pasta de solda *lead-free* (SAC)

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração: Microeletrônica

Orientadora: Dra. Ana Neilde Rodrigues
da Silva

São Paulo

2011

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, Ricardo Barbosa

**Estudo da aplicação do processo Pin-in-Paste na montagem de placas de circuito impresso usando pasta de solda lead-free (SAC) / R.B. Lima. -- São Paulo, 2011.
110 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Circuitos impressos 2. Soldagem eletrônica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II. t.

Dedico este trabalho à minha mãe, Zenaide. Minha referência para sempre.

Minha heroína.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Ana Neilde Rodrigues da Silva, que me orientou pacientemente neste desafio.

Ao Valtemar Fernandes Cardoso, que ajudou muito nas longas horas de laboratório.

Ao Alisson José de Amorim, da Multek, pela colaboração no projeto da placa de circuito impresso de teste.

À empresa Micropress pela confecção das placas de circuitos impressos e do estêncil.

Ao Felipe do Laboratório de Metalografia da FATEC/SP que gentilmente ajudou a realizar os cortes metalográficos.

Ao Grupo de Montagem Eletrônica do Laboratório de Sistemas Integráveis da USP pelo uso das instalações de montagem SMT.

E como não poderia deixar de ser, a todos aqueles que de alguma forma tenham colaborado no decorrer deste trabalho.

Por fim agradeço à minha família, que nos momentos difíceis mostrou o quanto é maravilhosa sua união.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de soldagem manual	8
Figura 2 - Sequência de funcionamento da solda onda	9
Figura 3 - (a) Ondas turbulenta e laminar (b) PCI passando na onda laminar....	9
Figura 4 - Identificação das partes principais de uma junta PTH [IPC-610C]	9
Figura 5 - Preenchimento de 100% do PTH [IPC 610C].....	10
Figura 6 - Preenchimento de 75% do PTH [IPC 610C]	11
Figura 7 - Preenchimento de 50% do PTH [IPC 610C].....	11
Figura 8 - Cálculo de volume preenchido a partir do corte metalográfico [FCI, 2008]	11
Figura 9 - (a) Resistor do tipo chip (b) Capacitor cerâmico do tipo chip.....	14
Figura 10 - Diferentes tamanhos de capacitores eletrolíticos em SMD	14
Figura 11 - Capacitores SMD de tântalo	14
Figura 12 - (a) Diodo mini MELF (b) Diodo MELF	15
Figura 13 - Conectores SMD (a) Mini USB (b) Barra de pinos	15
Figura 14 - Transistor SOT-23 e seus terminais identificados	15
Figura 15 - SOIC-8	16
Figura 16 - QFP 100 e QFP 44	16
Figura 17 - BGAs	17
Figura 18 - Exemplo de pote com pasta de solda (Fabricante: Heraeus)	18
Figura 19- Tipos e classes de PCIs: (a) - PCIs do Tipo 1 [IPC 2221]; (b) - PCIs do Tipo 2 [IPC 2221]	22
Figura 20 - Fluxograma de montagem PCI Tipo 1 Classe B	22
Figura 21 - Fluxograma do processo para dupla-refusão	23
Figura 22 - Fluxograma do processo para SMDs de um lado e THCs do outro	24
Figura 23 - Fluxograma do processo para SMDs de um lado e misto do outro	24
Figura 24 - Sistemas automáticos de dosagem – (a) Sistema pneumático (b) Sistema volumétrico	25
Figura 25 - Impressão de pasta de solda e de adesivo sobre as ilhas dos chips na PCI.....	25
Figura 26 - Cotas do filete de solda para os chips [IPC-A-610C]	28
Figura 27 - Cotas dos filetes de solda do QFP-44 [IPC-A-610C]	29
Figura 28 - Exemplos de cortes metalográficos para quatro níveis de soldagem de uma junta PIP: Solda ideal, solda com o mínimo de 75% do volume preenchido (aceitável), solda com volume entre 50% e 75% (defeito) e solda com menos de 50% de preenchimento (defeito)	33
Figura 29 - Fluxograma de montagem de uma PCI Tipo 1 Classe C com PIP .	36
Figura 30 - Fluxograma de montagem de uma PCI Tipo 2 Classe CX com PIP	37
Figura 31 - Cotas dos chips 0402 e 0603	40
Figura 32 - Cotas do QFP-44.....	41
Figura 33 - Foto da barra de pinos utilizada e aplicações possíveis em PCIs ..	42
Figura 34 - Dimensões da barra de pinos [FCI].....	42
Figura 35 - Medidas do conector DB-09 [FCI]	43
Figura 36 - Foto do fusível	43
Figura 37 - Dimensões do fusível [mm]	44
Figura 38 - Leiaute da PCI	44
Figura 39 - Leiaute do painel com as disposições dos PTHs.....	45

Figura 40 - Pannel com 4 PCIs do experimento	46
Figura 41 - Cotas das ilhas dos chips 0402 e 0603	47
Figura 42 - Cotas das ilhas do QFP-44.....	48
Figura 43 - Medidas de fiduciais na norma IPC-SM-782A.....	49
Figura 44 - Medidas adotadas no fiducial da PCI do experimento.....	49
Figura 45 - Considerações sobre altura e largura do filete de solda do THC....	51
Figura 46 - Curvas representando o filete (a) Curva de $f(x)$ e (b) Curva mostrando o volume do sólido obtido com a rotação de $f(x)$	52
Figura 47 - Projeto do estêncil.....	57
Figura 48 - Fotos do estêncil	57
Figura 49 - Impressora automática Panasonic SP60P Modelo KXF-1D3C	62
Figura 50 - Medidor de perfil 3D Vision Master Model 150 da ASC International	63
Figura 51 - Linha de montagem automatizada de SMDs.....	64
Figura 52 - Forno Vitronics.....	65
Figura 53 - Microscópio eletrônico.....	66
Figura 54 - Exemplo de excesso de pasta da solda impressa. Observa-se o excesso de solda gerado na impressão na borda dos volumes de solda.....	69
Figura 55 - Extremidades levantadas nos blocos de solda do QFP-44.....	69
Figura 56 - Deslocamentos nos blocos de impressão do QFP-44	70
Figura 57 - Deslocamentos dos blocos de pasta de solda em (a) DB-09 e (b) Fusível	70
Figura 58 - Blocos de pasta de solda nos componentes (a) chip 0402 (b) Barra de pinos e (c) Fusível. Nestas fotos, observa-se que o defeito no bloco de solda causado pelo deslocamento do estêncil foi reduzido e que os blocos de solda possuem formatos aceitáveis.	71
Figura 59 - Fotografias do excesso de pasta de solda saindo da parte inferior dos PTHs após a impressão nos casos de impressão simples e impressão dupla	73
Figura 60 – Montagem dos componentes (a) montagem manual do DB-09 e (b) PCI com todos os componentes montados.....	74
Figura 61 - Sistema de medição de temperatura do forno com traçador de perfil isolado termicamente e PCI com termopares	74
Figura 62 - Perfil de refusão convencional (R1) da PCI de teste com as curvas de temperatura para cada canal e as temperaturas configuradas em cada zona do forno	75
Figura 63 - Perfil de refusão otimizado (R2) da PCI de teste com as curvas de temperatura para cada canal e as temperaturas configuradas em cada zona do forno	76
Figura 64 - Exemplo de solda obtida no lado inferior de um fusível	77
Figura 65 - Exemplo de solda da parte inferior de um DB-09. Neste exemplo aparecem as principais falhas para esse componente, o excesso de solda na ponta do terminal e a ausência de filete positivo.....	78
Figura 66 - Exemplo de solda com formação de filete positivo em ambos os lados para um DB-09	78
Figura 67 - Exemplo de solda para uma Barra de Pinos. A foto mostra excesso de filete em ambos os lados do PTH.....	79
Figura 68 - Exemplos de solder beading (a) e excesso de fluxo não evaporado (b) na solda da barra de pinos.....	79

Figura 69 - Exemplos de defeitos encontrados por raios x nas barras de pinos	80
Figura 70 - Exemplos de resultados obtidos via análise por raios x dos conectores DB-09	80
Figura 71 - Solda de um fusível com um <i>solder bead</i> abaixo do encapsulamento.....	81
Figura 72 - Exemplo de solda ideal (preenchimento de 100% do PTH e formação de filetes positivos em ambos os lados) para os três THCs utilizados: DB-09, Barra de Pinos e Fusível	81
Figura 73 - Quantidade de defeitos medidos para cada combinação de variáveis	94
Figura 74 - Quantidade de defeitos cosméticos encontrados para cada combinação de variáveis	95
Figura 75 - Variação de defeitos e defeitos cosméticos para cada tipo de refusão.....	95
Figura 76 - Variação de defeitos e defeitos cosméticos para cada tipo de impressão.....	96
Figura 77 - Variação de defeitos e defeitos cosméticos para cada diâmetro de furo utilizado	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais substratos e aplicações em Placas de Circuito Impresso .	6
Tabela 2 - Critérios de aceitabilidade de solda para cada uma das classes de PCIs [IPC-610C].....	10
Tabela 3 - Tipos de pasta de solda em relação aos agentes de limpeza [Coombs, 2008]	18
Tabela 4 - Medidas aceitáveis dos filetes de solda para chips	29
Tabela 5 - Medidas aceitáveis dos filetes de solda para o QFP-44	29
Tabela 6 - Materiais que podem ou não ser utilizados na fabricação de encapsulamentos para PIP	35
Tabela 7 - Previsões tecnológicas para Solda onda e seletiva (iNEMI Roadmap, 2004).....	35
Tabela 8 - Dimensões dos <i>chips</i> 0402 e 060	41
Tabela 9 - Dimensões do CI QFP-44	41
Tabela 10 - Dimensões do conector DB-09	43
Tabela 11 - Diâmetro do furo finalizado de cada PTH da placa de teste	47
Tabela 12 - Medidas das ilhas dos <i>chips</i> 0402 e 0603	48
Tabela 13 - Medidas das ilhas do QFP-44	48
Tabela 14 - Dados básicos para projeto do estêncil.....	55
Tabela 15 - Valores encontrados para cada etapa de cálculo de volume de pasta para cada THC	56
Tabela 16 - Legenda de cada variável no cálculo de volume de pasta de solda	56
Tabela 17 - Composição da pasta de solda utilizada no experimento [Heraeus, W. C.].....	58
Tabela 18 - Quantidades de SMDs utilizados no experimento	64
Tabela 19 - Parâmetros de impressão no experimento preliminar.....	68
Tabela 20 – Variações nas alturas dos blocos de pasta para cada componente	72
Tabela 21 - Parâmetros utilizados na impressora no Experimento 1	73
Tabela 22 - Resultados do Experimento 2 (Fusível) Para Refusão 1.....	82
Tabela 23 - Resultados do Experimento 2 (Fusível) Para Refusão 2.....	83
Tabela 24 - Defeitos e defeitos cosméticos para os fusíveis	83
Tabela 25 - Resultados de microscopia, raios-x e corte metalográfico dos fusíveis.	84
Tabela 26 - Resultados do Experimento 2 (Barra de pinos) Para Refusão 1....	85
Tabela 27 - Resultados do Experimento 2 (Barra de pinos) Para Refusão 2....	86
Tabela 28 - Defeitos e defeitos cosméticos para as barras de pinos	86
Tabela 29 - Comparação dos resultados de microscópio, raios-x e corte metalográfico das amostras de barras de pinos.....	87
Tabela 30 - Resultados do Experimento 2 (DB-09) Para Refusão 1	89
Tabela 31 - Resultados do Experimento 2 (DB-09) Para Refusão 2	89
Tabela 32 - Defeitos e defeitos cosméticos para os DB-09.....	90
Tabela 33 - Comparação dos resultados de microscópio, raios-x e corte metalográfico das amostras de DB-09	90
Tabela 34 - Imagens de microscópio de seleção dos SMDs para cada variação de PCI.....	93

LISTA DE SIGLAS

AART	Alternative Assembly and Reflow Technology
ACA	Anisotropic Conductive Adesive
BGA	Ball Grid Array
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DP	<i>Double Print</i> (Impressão Dupla)
ICA	Isotropic Conductive Adesive
iNEMI	International Electronics Manufacturing Initiative Association Connecting Electronics Industries (Antigo Institute for Printed
IPC	Circuits)
MELF	Metal Electrode Leadless Face
PCI	Placa de Circuito Impresso
PIP	Pin-in-Paste
PTH	Plated Through Hole
QFP	Quad Flat Package
RA	Rosin Activated
RMA	Rosin Mildly Activated
RoHS	Restriction of Harzadous Substances
SP	<i>Single Print</i> (Impressão Simples)
SMC	Surface Mouted Component
SMD	Surface Mounted Device
SMT	Surface Mount Technology
SOIC	Small Outline Integrated Circuit
SOT	Small Outline Transistor
THC	Through Hole Component
THR	Through Hole Reflow
THT	Through Hole Technology
USB	Universal Serial Bus
WL-CSP	Wafer Level Chip Scale Packages
WS	Water Soluble

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SIGLAS	ix
SUMÁRIO	x
RESUMO	1
1. Justificativa e Objetivo	3
2. Introdução	5
2.1 Placas de Circuito Impresso	6
2.2 Tecnologia THT (<i>Through-Hole Technology</i>)	7
2.2.1 Solda manual	7
2.2.2 A solda-onda	8
2.2.3 Características da solda THT	9
2.3 Tecnologia SMT	12
2.3.1 Componentes - SMDs	13
2.4 Processos possíveis em PCIs	21
2.4.1 Etapas de processo da placa Tipo 1 – Classe B	22
2.4.2 Etapas de processo da placa Tipo 2 – Classe B	23
2.4.3 Etapas de processo da placa Tipo 2 – Classe C	23
2.4.4 Etapas de processo da placa Tipo 2 – Classe CX	24
2.5 Aplicação da pasta de solda e ou do adesivo	24
2.5.1 Dosagem utilizando seringa	24
2.5.2 Impressão serigráfica	25
2.5.3 Forno de refusão	27
2.6 Características da solda em SMDs	28
2.7 <i>Pin-In-Paste</i>	30
2.7.1 Descrição do Processo PIP	36
2.7.2 O diâmetro dos furos na PCI	37
3.1 Escolha dos componentes	39
3.1.1 SMD - Chips	40
3.1.2 SMD - Circuito Integrado	41
3.1.3 THC – Conector Barra de Pinos	42
3.1.4 THC – Conector DB09	42
3.1.5 THC – Fusível	43
3.2 Projeto da PCI	44
3.2.1 Dimensões dos PTHs	46
3.2.2 Dimensões das ilhas dos SMDs	47
3.2.3 Dimensões dos fiduciais	48
3.2.4 Projeto do Estêncil	49
3.3 Escolha da Pasta de Solda	57
3.4 Impressão	59
3.5 Montagem dos componentes	59
3.6 Análise dos dados	59
3.7 Delineamento dos experimentos	60
3.7.1 Avaliação das dimensões	61
3.8 Impressão (Experimento 1)	62
3.8.1 Programação da Impressora	63
3.9 Inserção dos componentes	63

3.9.1	Programação da <i>Pick & Place</i>	64
3.9.2	Montagem das PCIs de teste (Experimento 2).....	64
3.10	Refusão.....	64
3.10.1	Traçar perfis do forno com primeiro painel.....	65
3.10.2	Refusão das PCIs.....	65
3.11	Análise.....	66
3.11.1	Microscópio ótico	66
3.11.2	Raios-X.....	66
3.11.3	Corte metalográfico.....	67
4.	Resultados e Discussões.....	68
4.1	Experimento Preliminar de Impressão.....	68
4.2	Experimento 1 – Obtenção dos parâmetros de impressão.....	71
4.3	Impressão e montagem dos componentes	73
4.4	Perfis do forno de refusão.....	74
4.5	Análise das soldas obtidas	76
4.5.1	Fusível	82
4.5.2	Barra de pinos	85
4.5.3	DB-09.....	88
4.5.4	SMDs	92
	REFERÊNCIAS	100

RESUMO

Neste trabalho foram estudadas as etapas de processo envolvidas na tecnologia *Pin-in-Paste* (PIP) de soldagem por refusão de componentes convencionais (THCs - *Through Hole Components* ou Componentes de Furo Passante) em placas de circuito impresso (PCIs), utilizando pasta de solda sem chumbo (*lead-free*) com liga SAC (Sn-Ag-Cu) de forma a atender as novas exigências ambientais para a montagem eletrônica.

Inicialmente foi feito o projeto da PCI de teste com três diferentes componentes THCs e três componentes SMD com encapsulamentos distintos, com o objetivo de reproduzir uma PCI comercial. Foram gerados dois diâmetros de furos diferentes para inserir os THCs, possibilitando o estudo da variação de preenchimento com solda no PTH. Foi proposta uma equação para o cálculo do volume de pasta de solda a ser impresso sobre os furos no processo de montagem. A partir desta equação foram calculadas as dimensões dos furos do estêncil para a PCI de teste. Os parâmetros de impressão foram otimizados em função da variação de pressão e da velocidade do rodo. Duas curvas de refusão foram utilizadas, uma convencional e outra otimizada para verificar a variação na geração de defeitos.

A impressão de pasta de solda ficou superior ao projetado, o que resultou em todas as amostras terem solda acima do parâmetro mínimo de aceitabilidade de volume de 75% de preenchimento do PTH. Esta sobre impressão ocasionou defeitos em boa parte dos componentes, excesso de solda nos filetes e resíduos de fluxo na solda nos PTHs. Tais defeitos foram expressivos para todos os THCs, mostrando que o excesso de pasta impressa foi decisivo na geração de defeitos para todas as combinações das variáveis estudadas. Os SMDs tiveram solda aceitável, apresentando apenas alguns casos de excesso de fluxo ou pouca solda em alguns QFPs devido ao uso de ilhas com dimensões maiores que o exigido em norma.

O processo de Pin In Paste se mostra viável como substituto da solda onda em linhas de montagem para placas com SMDs e THCs mas estudos posteriores deverão ser realizados para a geração de um modelo confiável de projeto de PCIs e estêncil com solda *lead-free* para que tal processo seja utilizado em grande escala na indústria.

ABSTRACT

This study describes the process steps involved in Pin-in-Paste (PIP) reflow soldering technology in printed circuit boards (PCBs) using lead-free solder paste with SAC alloy (Sn-Ag-Cu) in order to attend new environmental requirements for the electronics assembly.

Initially it was designed a PCB test with three different THCs (Through Hole Component) and three different SMD (Surface Mount Device) packages in order to reproduce a commercial board. It was generated two different diameters of holes to insert the THCs, aiming to study the solder fill variation in PTH. An equation was proposed for calculating the volume of solder paste to be printed over the holes in the assembly process. From this equation it was calculated the dimensions of the holes of the stencil. The printing parameters were optimized according to the variation of pressure and speed of the squeegee. Two reflow curves were used in the process, a conventional one and an optimized one to determine the variations in the generation of soldering defects.

The printed solder paste volume was higher than projected, which resulted in solder excess, causing defects in most of the components, such as excess solder in the fillet and solder flux residues in PTHs. Such defects were significant for all THCs, showing that the excess paste that was printed caused critical defects for all combinations of variables. Regarding that all samples were above the reflow minimum acceptable volume of 75% coverage of PTH. The SMDs solders were acceptable, with only few cases of solder flux excess.

The Pin in Paste process was observed as a good option to replace the wave soldering thermal process for mixed PCBs. Further studies should be conducted to generate a reliable model of PCB and stencil design.

1. Justificativa e Objetivo

A montagem de placas de circuito impresso (PCIs) se inicia na década de 40 e, desde então, teve evolução constante nos processos de fabricação, materiais usados e grande redução nas dimensões de placas e componentes eletrônicos. A partir da década de 70, a tecnologia mais utilizada em PCIs para solda de componentes, a THT (*Through Hole Technology* – Tecnologia de Furo Passante), começou a limitar o desenvolvimento da eletrônica, já que a necessidade de se ter os terminais dos componentes atravessando as placas reduzia razoavelmente a área disponível para inserção de componentes [Coombs, 2001]. Nesta mesma época foi desenvolvida uma nova tecnologia de encapsulamento e solda de componentes eletrônicos nas PCIs, a SMT (*Surface Mount Technology* ou Tecnologia de Montagem em Superfície). Uma das grandes vantagens desta tecnologia era a possibilidade de soldar os terminais na superfície da placa, no mesmo lado de posicionamento do componente (evitando furos passantes) e o grande potencial de redução nas dimensões dos encapsulamentos e nas distâncias entre terminais. Tais vantagens confirmaram a SMT como a tecnologia mais usada na atualidade, restando apenas alguns encapsulamentos ou aplicações que necessitam ainda de usar a tecnologia THT [Lee, 2002]. Entre alguns motivos para ainda ser usada a THT estão a baixa capacidade de dissipação de calor dos SMDs (*Surface Mount Devices* ou Dispositivos de Montagem em Superfície), o que é uma grande desvantagem para componentes de alta potência, e a menor força mecânica de terminais de conectores SMDs em comparação com os respectivos THCs (*Through Hole Components* ou Componentes de Terminal Passante).

O uso das duas tecnologias numa mesma placa, a SMT e a THT, faz com que sejam necessários dois processos térmicos para soldar os dois tipos de componentes, a refusão da pasta de solda para os SMDs e a solda-onda para os THCs. Além do estresse térmico em dobro que é gerado na placa e nos componentes pelos dois processos de solda, há ainda o aumento de equipamentos necessários, insumos, operadores, tempo de produção, consumo energético entre outras características que aumentam o custo de cada PCI e sua carga ambiental.

Com a criação na União Europeia da diretiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances* ou Restrição de Substâncias Perigosas) em 1º de julho de 2006, foi proibido o uso de um dos componentes mais usados na solda em eletrônica, o chumbo – utilizado na liga eutética SnPb [Mendes, 2009]. Novas ligas metálicas passaram a ser desenvolvidas para substituir as ligas com chumbo, o que tem sido um grande desafio para os centros de pesquisa, pois a relação custo/benefício da solda estanho e chumbo até hoje não foi igualada. A maioria das ligas conhecidas como *lead-free* (livres de chumbo) ainda possuem temperaturas de refusão maiores que as SnPb, o que torna os processos térmicos mais agressivos e cria a necessidade da troca dos fornos de refusão e dos equipamentos de solda-ondas antigos que foram projetadas para atingir temperaturas suficientes apenas para ligas com chumbo [Lau, 2003].

O processo *Pin in Paste* começou a ser testado na década de 90 com o objetivo de eliminar a solda por onda ou manual da linha de montagem de PCIs mistas, com componentes SMDs e THCs, de forma a permitir que os THCs fossem soldados utilizando pasta de solda e refusão na mesma etapa que os SMDs. Tal processo traz vantagens tais como, eliminação de uma das etapas térmicas, redução de danos aos componentes e à PCI. Além disso, permite a diminuição de custo, de tempo de produção e de intervenção humana na linha e no impacto ambiental. O maior desafio no processo *Pin in Paste* está no projeto do estêncil, que deverá imprimir pasta de solda suficiente sobre os PTHs, para que o volume de solda, após a refusão, seja suficiente para uma interconexão elétrica e mecânica confiável. Em contrapartida, não poderá haver excesso de pasta de solda no processo de impressão das ilhas dos componentes SMD que possuem terminais muito próximos de forma a evitar possíveis formações de curtos.

Assim, o objetivo deste trabalho é o estudo do processo *Pin in Paste* de montagem de THCs em uma placa de circuito impresso mista, contendo alguns THCs e também diferentes SMDs, utilizando pasta de solda *lead-free* com liga SAC, com a finalidade de substituir os processos tradicionais de soldagem e excluir uma etapa de montagem de PCIs ao soldar todos os componentes no mesmo processo de refusão.

2. Introdução

A placa de circuito impresso (PCI) consiste basicamente em um substrato que possui circuitos metálicos impressos em uma ou mais camadas, com finas películas de cobre revestidas com diferentes materiais ou ligas metálicas. Nestes circuitos metálicos são inseridos os componentes eletrônicos, que atualmente podem ser classificados em duas tecnologias principais: THT (*Through-Hole Technology* ou tecnologia de montagem por furo passante) e SMT (*Surface Mount Technology* ou tecnologia de montagem em superfície). A THT tem sido usada há mais de seis décadas e sua tecnologia possui diversas limitações, como custo, limitação na redução das dimensões, etc. Já a tecnologia SMT possui grandes vantagens quando comparada à THT, sendo a principal delas a possibilidade de se reduzir em muito as dimensões dos componentes. Tal característica é extremamente importante numa indústria onde os produtos fabricados diminuem de tamanho e aumentam suas capacidades continuamente, em períodos cada vez menores [Sprovieri, 2006].

O que impede a migração total para a tecnologia SMT é a impossibilidade atualmente em se fabricar, em escala industrial, componentes SMDs que suportem alta capacidade de dissipação, ou no caso de conectores que necessitem de um nível de resistência mecânica que só os THCs podem fornecer. Como numa solda em um THC o terminal é soldado em todo o seu perímetro (na espessura da placa) e o SMD apenas na parte inferior do terminal, a área de contato de solda da primeira tecnologia é muito maior, oferecendo resistência mecânica bem superior. Isso leva, em alguns casos, a necessidade de se realizar processos mistos, SMT e THT, em uma mesma placa, onde grande parte do processo de solda é em SMT, mas ainda necessitando de um segundo processo térmico para os poucos componentes THCs presentes na PCI [Tonapi, 2000].

2.1 Placas de Circuito Impresso

Os materiais mais usados como substrato e suas principais aplicações são exibidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais substratos e aplicações em Placas de Circuito Impresso

Classe	Composição	Aplicações
CEM-1	Resina Epóxi, Fibra de vidro (na superfície) e Papel (no interior). Chamado de Composite.	- Equipamentos eletrônicos em geral - Indústria automotiva - Rádio e TV
CEM-3	Resina Epóxi e Fibra de vidro não trançada	- Equipamentos eletrônicos em geral - Indústria automotiva - Informática - Telecomunicações
FR-1	Resina fenólica e Papel	- Equipamentos de uso geral / Entretenimento
FR-2	Resina fenólica e Papel	- Equipamentos de uso geral / Entretenimento
FR-4	Resina epóxi e tecido de fibra de vidro	- Indústria automotiva - Equipamentos eletrônicos em geral - Equipamentos de alta confiabilidade
RO 3003	PTFE e Cerâmica	- Aplicações comerciais de alta frequência (até 30~40 GHz).
RO 4003	Fibra de vidro com cerâmica e hidrocarboneto	- Aplicações comerciais de alta frequência.
RT / Duroid 5880	PTFE e Microfibra de vidro	- Aplicações de alta frequência e para ambientes com alta umidade.
RT / Duroid 6010	PTFE e Cerâmica	- Aplicações eletrônicas e de micro-ondas que requerem alta constante dielétrica.
TMM	Cerâmica e hidrocarboneto	Circuitos para micro-ondas, RF, antenas e satélites.
Ultralam 2000	PTFE e Fibra de vidro trançada	- Controle de impedância com alta confiabilidade.

Fonte: [Coombs, 2001] e Site Micropress

As placas de circuito impresso são classificadas de acordo com o desempenho que devem ter durante o uso do equipamento onde está inserida [IPC 2221, 1998]. Estas classes se diferenciam principalmente em relação à aceitabilidade das juntas de solda dos componentes. Quanto mais alta for a classe, maior deverá ser a qualidade das soldas, devido a uma função mais crítica do equipamento em questão. As classes vão de 1 a 3 e são descritas a seguir:

- **Classe 1 - Produtos Eletrônicos Gerais:** Incluem produtos para o consumidor comum, alguns computadores e periféricos, assim como equipamentos militares aplicáveis a situações onde imperfeições cosméticas não são importantes e o requerimento mais importante é o funcionamento completo da placa de circuito impresso.

- **Classe 2 – Produtos Eletrônicos para Serviços Dedicados:** Incluem equipamentos de comunicação, máquinas de transações financeiras complexas, equipamentos e instrumentos militares que requerem alto desempenho e vida útil prolongada, e para qual é desejado serviço ininterrupto, mas não é crítico. Algumas imperfeições cosméticas são permitidas.
- **Classe 3 – Produtos Eletrônicos de Alta Confiabilidade:** Incluem equipamentos para uso comercial, militar e médico onde performance ininterrupta é necessária. Falha do equipamento não pode ser tolerada já que é de aplicação médica ou aeroespacial.

2.2 Tecnologia THT (*Through-Hole Technology*)

Para muitas aplicações nas quais são usados conectores, especialmente naquelas que requerem repetidas conexões e desconexões, conectores SMD oferecem resistência mecânica menor que o adequado, tornando imperativo o uso de conectores THC.

No entanto, os THCs foram projetados para serem montados utilizando o processo de solda-onda, assim seus encapsulamentos suportam temperaturas inferiores aquelas utilizadas no processo de refusão dos componentes SMDs [Coleman, 2000].

2.2.1 Solda manual

O processo de solda manual é bastante utilizado em prototipagem e em baixas produções, também é usado em largas produções para componentes com encapsulamentos não compatíveis com as temperaturas de refusão. O processo consiste na soldagem de componentes, THCs ou SMDs, utilizando ferro de solda que, com uma ponta fina, toca a ponta de um fio de solda. Este fio de solda é derretido e escorre para o terminal do componente e para a ilha na placa. Após remover o fio e a ponta do ferro de solda, a solda derretida

esfria e a junção é formada. É o processo mais lento e de maior taxa de erros. A Figura 1 mostra um SMD sendo soldado manualmente.

Figura 1 - Processo de soldagem manual

2.2.2 A solda-onda

A solda-onda é o processo mais utilizado na soldagem de componentes THCs. Basicamente esse processo consiste em um banho superficial de solda líquida no lado da PCI onde estão expostos os terminais dos THCs. Um desenho esquemático do processo é mostrado na Figura 2. O processo de soldagem por onda consiste em cinco etapas. Primeiramente é espirrado fluxo na placa para a limpeza das partes metálicas. No pré-aquecimento, a placa então é aquecida, por resistências, até a temperatura em que o fluxo é ativado, limpando as partes metálicas, e elevando a temperatura dos componentes para que não haja choque térmico quando a PCI atingir a primeira onda. Nos casos em que a PCI possua também componentes SMDs, estes estarão fixados por adesivo no lado inferior da placa. A placa irá primeiramente passar pela onda turbulenta que é formada por jatos desordenados e verticais de solda líquida em contato com a parte inferior da placa. Em seguida a PCI passa pela segunda onda chamada de laminar, que consiste em um fluxo contínuo de solda líquida na horizontal. Nesta etapa a solda líquida molha os terminais dos componentes e os furos na placa soldando os THCs. Os SMDs não são soldados corretamente apenas na onda laminar devido ao efeito de sombra que o corpo componente faz nos terminais que ficam no lado oposto à onda. A primeira onda irá garantir que todos os terminais dos THCs sejam molhados, e a segunda irá remover o excesso de solda a fim de evitar curtos e outros defeitos. Após as duas ondas ocorre o resfriamento da placa, através de

ventoinhas, onde a solda se solidifica e os terminais são soldados aos furos. A Figura 2 mostra as etapas da solda-onda e a Figura 3 exibe as fotos das ondas de solda líquida.

Figura 2 - Sequência de funcionamento da solda onda

Figura 3 - (a) Ondas turbulentas e laminar (b) PCI passando na onda laminar

2.2.3 Características da solda THT

Uma solda do terminal de um THC é dividida em três partes: o preenchimento interno do PTH e os filetes inferior e superior. A IPC utiliza uma nomenclatura que é relacionada com uma solda realizada por onda. Na Figura 4 é mostrado o desenho esquemático de um terminal soldado, evidenciando as regiões de interesse em uma solda THT e com a nomenclatura da IPC:

Figura 4 - Identificação das partes principais de uma junta PTH [IPC-610C]

Como esta nomenclatura perde sentido em se tratando da solda de THCs por PIP, neste trabalho serão utilizadas as seguintes denominações: solda do lado superior do PTH, solda no PTH e solda no lado inferior do PTH.

Na Tabela 2 são descritos os critérios de aceitabilidade de solda em THCs para as três classes de placa:

Tabela 2 - Critérios de aceitabilidade de solda para cada uma das classes de PCIs [IPC-610C]

Critério	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Molhagem da circunferência no lado primário (lado de destino) do terminal e poço	Não Especificado	180°	270°
Preenchimento vertical de solda	Não especificado	75%	75%
Filete da circunferência e molhagem no lado secundário (lado da fonte de solda) do terminal e poço	270°	270°	330°
Porcentagem de área da ilha coberta com solda molhada no lado primário (lado de destino)	0	0	0
Porcentagem de área da ilha coberta com solda molhada no lado secundário (lado da fonte de solda)	75%	75%	75%

Para as classes 1, 2 e 3 o ideal especificado é 100% de preenchimento, como mostrado na Figura 5, além da formação de filetes positivos acima e abaixo das ilhas.

Figura 5 - Preenchimento de 100% do PTH [IPC 610C]

A Figura 6 mostra qual o volume mínimo e o ideal para o preenchimento do PTH, na prática, após a solda do terminal. Assim, o volume de solda

aceitável deve ser no mínimo de 75% do preenchimento do furo. Um total de 25% de depressão é aceitável em cima ou embaixo do furo.

Figura 6 - Preenchimento de 75% do PTH [IPC 610C]

Nas classes 2 e 3 é considerado defeito quando o preenchimento vertical do furo é menor que 75%, como mostrado na Figura 7. Para a classe 1 não há definição de defeito em relação ao volume de solda no PTH.

Figura 7 - Preenchimento de 50% do PTH [IPC 610C]

O guia de aplicação de Pin in Paste da fabricante de conectores FCI [FCI, 2008] apresenta uma fórmula simples para a obtenção do volume preenchido (V_{pth}) a partir do corte metalográfico do PTH (Figura 8):

Figura 8 - Cálculo de volume preenchido a partir do corte metalográfico [FCI, 2008]

$$V_{pth} = (a + b)/2t$$

Onde:

a é a medida do lado esquerdo do filete de solda dentro do PTH

b é a medida do lado esquerdo do filete de solda dentro do PTH

t é a espessura da PCI

2.3 Tecnologia SMT

A tecnologia SMT (*Surface Mount Technology* ou Tecnologia de Montagem em Superfície) foi criada na década de 1960 pela IBM devido à necessidade de se aumentar a densidade das placas dupla face (com componentes nos dois lados da placa) [Lee, 2002]. Mas veio a se popularizar apenas na década seguinte em consequência das dificuldades tecnológicas causadas pela diminuição das dimensões dos componentes e ao aumento do custo de furação da placa de circuito impresso, devido ao uso de componentes com cada vez mais terminais. Com isso, houve um constante desenvolvimento da tecnologia SMT, resultando na diminuição geral dos custos de montagem em comparação com a tecnologia THT e transformando a SMT na tecnologia predominante em montagens de placas de circuito impresso a partir do começo da década de 1990 [Pfluke, 2005]. São listadas abaixo algumas das várias vantagens da tecnologia de montagem em superfície:

- Permite o desenvolvimento de PCIs dupla-face e multicamadas muito mais complexas que a tecnologia THT.
- Redução do peso e volume dos componentes por volta de 90%, aumentando a densidade das placas ao mesmo tempo em que reduz suas dimensões.
- Redução total do peso da placa, diminuindo a influência às vibrações e choques.
- Menor interferência eletromagnética. Os terminais dos THCs servem como antenas e os SMDs diminuem muito a recepção de sinais indesejados.

- SMDs geralmente são mais baratos que THCs, além da redução nos custos com logística e armazenagem dos componentes.
- Processo mais simples de ser automatizado.
- Maior interconectividade. Os componentes em SMD podem ser fabricados com um número muito maior de terminais que um THC.
- Maior eficiência em operações de circuitos digitais devido à menor resistência, capacitância e indutância dos terminais, além das próprias dimensões reduzidas dos componentes, diminuindo os *delays* de propagação e aumentando as velocidades de processamento.
- Efeitos de RF menores do que componentes com terminais (aumentando a previsibilidade do comportamento dos componentes).
- Processo de solda por refusão muito mais simples e com qualidade e repetibilidade muito superiores.
- Disponibilidade limitada de THCs. Alguns componentes estão disponíveis apenas em SMD devido à alta pinagem (quantidade de terminais).
- Diminuição dos altos custos relativos à furação CNC intrínseca à tecnologia THT.
- Redução de intervenção humana, diminuindo taxas de erros e custos com mão-de-obra.
- Aumento da velocidade de produção.
- Melhora total nos prazos de produção.

2.3.1 Componentes - SMDs

Os componentes eletrônicos utilizados em SMT são dispositivos de montagem em superfície ou SMDs (*Surface-Mounted Devices*), também são chamados SMCs (*Surface Mounted Components* – componentes montados em superfície). Os SMDs possuem três formatos básicos: blocos retangulares (chips), cilíndricos (MELFS) ou placas planas (CIs). A seguir são explicados brevemente os principais encapsulamentos de SMDs utilizados na atualidade:

- **Chips:** SMDs com pequenos corpos cúbicos cerâmicos são chamados de *chips*. Seus dois terminais são metalizados por deposição de filmes espessos. Resistores e capacitores são os componentes mais utilizados

neste encapsulamento. Sendo componentes passivos sem polaridade, podem ser montados invertidos em 180° sobre as ilhas da placa sem diferença no circuito. Na Figura 9 podem ser vistos um resistor (a) e um capacitor (b) do tipo *chip*.

Figura 9 - (a) Resistor do tipo chip (b) Capacitor cerâmico do tipo chip

- **Capacitores eletrolíticos:** São característicos por capacitâncias mais altas por unidade de volume que os cerâmicos, tornando-os úteis para correntes mais altas e circuitos de baixa frequência. Nos capacitores eletrolíticos, o negativo é identificado com uma faixa preta no topo do componente. Diferentes tamanhos de capacitores eletrolíticos podem ser vistos na Figura 10.

Figura 10 - Diferentes tamanhos de capacitores eletrolíticos em SMD

- **Capacitores de tântalo:** Os capacitores de tântalo possuem capacitâncias maiores que os chips e os eletrolíticos, sendo usados em aplicações eletrônicas onde é necessária uma alta capacitância em um espaço reduzido. Nos capacitores de tântalo, o anodo é identificado por uma faixa mais escura na lateral (Figura 11).

Figura 11 - Capacitores SMD de tântalo

- **MELF:** SMDs cilíndricos, feitos de cerâmica ou material vítreo, que possuem suas duas extremidades metalizadas por deposição de filme espesso ou cobertura metálica. MELF significa *Metal Electrode Faced components* ou componentes de eletrodo de faces metalizadas. A maioria dos MELFs são diodos bipolares, de corpos vítreos, coberturas metálicas nas extremidades e marcação do catodo com uma faixa preta (Figura 12).

Figura 12 - (a) Diodo mini MELF (b) Diodo MELF

- **Conectores SMD:** A grande vantagem dos conectores em SMD é a facilidade de automação, já que são facilmente montados por máquinas *Pick & Places*. O grande problema ainda é a baixa resistência mecânica em comparação com os conectores THCs. Um conector Mini USB e uma barra de pinos SMD podem ser vistos na Figura 13.

Figura 13 - Conectores SMD (a) Mini USB (b) Barra de pinos

- **SOT:** Os transistores em SMD são conhecidos como SOTs (*Small-Outline Transistors*). Seus terminais são angulados para fora (*gull wing*). O SOT-23, principal encapsulamento dos transistores (também é usado em diodos), possui um terminal do lado esquerdo do componente, e outros dois do lado direito do encapsulamento. Seus terminais são identificados na Figura 14.

Figura 14 - Transistor SOT-23 e seus terminais identificados

- **SOIC:** O *Small-Outline Integrated Circuit* é o principal encapsulamento utilizado atualmente em CIs SMT. Possui, assim como o SOT, terminais angulados para fora do corpo do componente e *pitch* (distância entre terminais) de 1,27 mm. Possui uma numeração que indica o número de

terminais presentes no CI. O menor SOIC é o SOIC-8, com quatro terminais de cada lado do componente. Existem ainda o SOIC 14, SOIC 16, SOIC 20 etc. A marcação do pino 1 é feita com um pequeno círculo no corpo perto do pino ou chanfro na lateral no lado deste pino. A Figura 15 mostra um SOIC-8.

Figura 15 - SOIC-8

- **QFP:** O QFP (*Quad Flat Package*) é um encapsulamento de circuito integrado com terminais nos quatro lados do componente. É bastante usado para memórias e outros componentes programáveis. O *pitch* entre terminais varia de 0,30 a 0,80 mm. O nome QFP é seguido de um número que indica a quantidade total de terminais do componente. A Figura 16 exibe um QFP-100 e um QFP-44.

Figura 16 - QFP 100 e QFP 44

- **BGAs:** O BGA (*Ball-Grid Array*) é um componente que possui os terminais localizados abaixo do encapsulamento, em forma de uma matriz de semi-esferas. Isso diminui o tamanho do componente e aumenta o número de terminais possíveis no encapsulamento, aumentando a complexidade eletrônica do dispositivo e diminuindo a quantidade de componentes na placa. O BGA foi uma necessidade devido ao crescente aumento do número de terminais em CIs. Neste caso os componentes possuem terminais cada vez menores e mais próximos uns dos outros, o que aumenta a taxa de curtos na soldagem, e dificulta o alinhamento do componente durante a montagem. Os BGAs podem ter quantidades bem maiores de terminais com *pitches* relativamente maiores do que os CIs

tradicionais. Na Figura 17 são mostrados BGAs com as esferas aparentes ou soldado em uma PCI.

Figura 17 - BGAs

2.3.2 Tipos de interconexão em SMT

Atualmente as formas de se realizar a interconexão metálica entre o terminal do SMD e a ilha da PCI são: pasta de solda (refusão), solda-onda ou o adesivo condutivo.

- A pasta de solda é uma massa formada por pequenas esferas da liga metálica, um agente aglutinante e um solvente, a quantidade e o tipo de cada um destes componentes são determinados pelo fabricante. Este é atualmente o processo mais utilizado na montagem SMT.
- A solda-onda é o processo que mais se utiliza na soldagem de THCs, podendo também ser usada para soldar SMDs.
- O adesivo condutivo é pouco utilizado atualmente, e é mais aplicado em montagens de placas flexíveis ou de componentes sensíveis a altas temperaturas [Mendes, 2009].

2.3.2.1 Pasta de solda

Como descrito anteriormente, a pasta de solda contém a liga metálica que irá realizar a conexão e o fluxo que contém os agentes de limpeza. Os agentes de limpeza são responsáveis pela remoção de óxidos, tanto da liga da pasta quanto da superfície das ilhas na placa, e a criação de uma superfície com molhabilidade positiva. Devem antes da refusão da pasta, evaporar, com

o objetivo de que apenas a liga metálica fique após o resfriamento. O fluxo promove também a proteção das superfícies metálicas contra novas oxidações.

Figura 18 - Exemplo de pote com pasta de solda (Fabricante: Heraeus)

O fluxo e o sistema aglutinante são classificados como resinosos, solúveis em água e *no-clean*. Os principais tipos de pasta são descritos na Tabela 3 [Coombs, 2008]:

Tabela 3 - Tipos de pasta de solda em relação aos agentes de limpeza [Coombs, 2008]

Tipo	Descrição
R	Resinosa, não ativada
RMA	Resinosa, mediantemente ativada
RA	Resinosa, totalmente ativada
WS	<i>Water soluble</i> (solúvel em água)
NC	<i>No-clean</i> (não é necessária limpeza posterior)

Até a introdução dos processos *lead-free* (sem chumbo) e a implantação das normas RoHS, o material para solda mais utilizado era a liga eutética SnPb (63% estanho - 37% chumbo) que fornecia ótimo desempenho e baixo custo. A liga SnPb foi extremamente importante na evolução da eletrônica como material de solda. Suas propriedades físicas (liga eutética com relativo baixo ponto de fusão - 183°C) e mecânicas (boa confiabilidade em fadiga térmica) facilitaram as montagens de PCIs cada vez mais complexas e no desenvolvimento de muitos encapsulamentos, como BGAs (*Ball Grid Arrays*), *Solder Bump Flip Chips*, e WL-CSP (*Wafer Level Chip Scale Packages*). Para todos os encapsulamentos, a solda SnPb é a melhor forma de unir

mecanicamente e eletricamente os terminais dos componentes às ilhas das PCIs.

Se os processos de fabricação são bem controlados e os produtos são reciclados, o risco ambiental em utilizar ligas com chumbo é muito baixo, já que ele é facilmente reutilizável.

Desde 1992, o congresso norte americano tem tentado de diversas maneiras banir o uso do chumbo em diversas aplicações, incluindo na solda em eletrônica. As razões são, entre outras, que o chumbo está entre os dez materiais mais perigosos ao meio ambiente e o mais perigoso às crianças. De acordo com a Associação Americana de Pediatria, o chumbo pode danificar o cérebro e o sistema nervoso, e até mesmo uma baixa exposição ao chumbo pode causar problemas de aprendizado, perda de audição, problemas de fala e de comportamento, entre outros problemas sérios de saúde [American Academy of Pediatrics]. Das 5 milhões de toneladas de chumbo produzidas anualmente, apenas 0.5 % dessa quantidade é usada em aplicações eletrônicas. Entretanto, esta pequena quantidade de chumbo na eletrônica causa mais preocupação à saúde humana do que em baterias, por exemplo, que possuem quase 100% de reciclagem realizada. Isso se deve ao fato de que, embora a solda seja apenas uma fração do peso dos produtos eletrônicos como televisores, refrigeradores, celulares e computadores, estes equipamentos geralmente são destinados a aterros após o descarte, permitindo que o chumbo chegue aos lençóis freáticos e, assim, sendo consumido de alguma forma pelos seres humanos.

As ligas de solda *lead-free* surgiram como uma alternativa a liga de solda SnPb. A maioria das soldas *lead-free*, especialmente a família mais promissora (Sn-Ag-Cu ou simplesmente SAC), possui um ponto de fusão maior que o da liga SnPb (213°C em média para a SAC e 183°C para SnPb). Estes maiores pontos de fusão requerem perfis de temperaturas de refusão maiores. Para a liga SnPb, a temperatura máxima no perfil é por volta de 220°C, e para a SAC é mais ou menos 260°C. Portanto, para utilizar as soldas *lead-free*, todos os materiais das PCIs e dos componentes devem ser alterados para suportar esta exposição térmica extra. Isso leva não somente a alterações em materiais e equipamentos, mas também aumento em custos e perda de

confiabilidade. Ademais há um considerável aumento no consumo de energia, o que causa mais preocupações ambientais [Lau, 2003].

2.3.2.2 Adesivo condutivo

Adesivos condutivos baseados em metais têm sido considerados opções viáveis na substituição de ligas com chumbo. Durante as últimas décadas, esforços em P&D foram realizados para se avaliar os adesivos condutivos para produções em larga escala na indústria eletrônica. Nos últimos anos eles têm sido largamente utilizados na tecnologia de encapsulamento em montagem híbridas, *die-attach* e de *displays*, mas o interesse por essa tecnologia tem crescido em outras aplicações. A toxicidade e dificuldades em aspectos ambientais das ligas com chumbo tem sido um dos motores nesse aumento de interesse.

Como uma rede condutiva elétrica, o adesivo condutivo consiste em uma matriz polimérica (como o epóxi, silicone, a poliamida ou o poliuretano) preenchido com partículas condutivas. As partículas mais usadas são os metais prata, níquel, cobre, prata/paládio.

O conteúdo metálico está na faixa de 90% da massa (25 a 30% do volume). As partículas metálicas são adicionadas a uma quantidade que supere o limiar de condução elétrica que separe um material condutivo de um isolante. Os adesivos condutivos isotrópicos (ICAs), que conduzem em todas as direções, têm sido comercializados há décadas, mas hoje há um grande interesse nos ACAs (adesivos condutivos anisotrópicos). Nos ACAs a condutividade é possível apenas no plano z (perpendicular ao plano da placa e na direção que a corrente elétrica deve fluir). No plano xy (o plano da placa) este tipo de adesivo se comporta como isolante. Devido a essa propriedade muito interessante, os ACAs podem ser depositados por toda a região de contato e nos arredores dos terminais, pois não provoca curtos entre eles, facilitando extremamente a impressão de componentes complexos como *fine-pitches*. O ACA consiste na presença de partículas metálicas em grande quantidade em z, permitindo boa condutividade elétrica, e baixa concentração das partículas em xy, concentração longe de atingir o nível de condução elétrica.

Adesivos condutivos como materiais de interconexão oferecem outras vantagens sobre ligas metálicas como:

- Maior capacidade em soldagem de *fine-pitches* (principalmente para ACAs – Adesivos Condutivos Anisotrópicos),
- Eliminação de *underfill* ao utilizar ACA.
- Processos a temperaturas bem mais baixas

Mas como os custos dos adesivos condutivos ainda não são tão atraentes em larga escala como para as pastas de solda convencionais, seu uso ainda é bastante restrito.

2.4 Processos possíveis em PCIs

O processo de montagem de PCIs depende se há THCs e/ou SMDs na placa, e do processo de solda escolhido, se pasta de solda ou solda-onda/manual. De acordo com a norma IPC-SM-782A *SMD Design and Land Pattern* existem dois tipos principais de placas no que se refere ao processo, o Tipo 1 (componentes em apenas um dos lados da placa) e o Tipo 2 (componentes dos dois lados da placa). A Figura 19 descreve os dois tipos de PCI e suas classes.

Type 2

(b)

Figura 19- Tipos e classes de PCIs: (a) - PCIs do Tipo 1 [IPC 2221]; (b) - PCIs do Tipo 2 [IPC 2221]

A seguir serão descritas brevemente as etapas de processo básicas realizadas para os principais tipos de placas.

2.4.1 Etapas de processo da placa Tipo 1 – Classe B

O processo mais simples em SMT é quando há apenas SMDs em um lado da PCI e nenhum componente do outro lado (Tipo 1 – Classe B). Neste caso o processo indicado é baseado na pasta de solda. O fluxograma da Figura 20 exhibe as três etapas realizadas neste caso:

Figura 20 - Fluxograma de montagem PCI Tipo 1 Classe B

2.4.2 Etapas de processo da placa Tipo 2 – Classe B

As PCIs Tipo 2 são as placas onde há componentes nas duas faces, e no caso de apenas SMDs na placa, o processo de dupla-refusão é o mais interessante. Neste sistema, os componentes são montados e soldados por refusão de um lado, aí a placa é invertida e o processo se repete. Na segunda refusão, a solda dos componentes que foram soldados na primeira etapa também será refundida, mas a tensão superficial será suficiente para sustentar o componente e impedir que, por força da gravidade, o componente caia. Por esta razão, na dupla-refusão, o lado da placa com componentes pesados deve ser montado por último. No caso de placas com componentes pesados nos dois lados (como CIs e conectores), deverá ser utilizado o processo com adesivo para fixação e em seguida solda-onda, como explicado no item 2.4.3. Pode-se ver na Figura 21 a ordem dos processos realizados na dupla-refusão de PCIs:

Figura 21 - Fluxograma do processo para dupla-refusão

2.4.3 Etapas de processo da placa Tipo 2 – Classe C

Este caso é mais complicado na montagem de PCIs devido à necessidade de se usar adesivo para fixar os SMDs, o que diminui a precisão de montagem da *Pick & Place*, e consequentemente a solda ser realizada pela solda-onda, que resulta em soldas menos confiáveis e com taxas maiores de defeitos [Ganesan, 2006].

Primeiramente é impresso o adesivo na PCI, depois a *Pick & Place* posiciona os SMDs para, em seguida, levar a PCI para o forno de refusão onde será feita a cura do adesivo. Depois a placa é invertida e são inseridos os THCs, que são soldados, junto com os SMDs, na solda-onda. O fluxograma na Figura 22 exibe a ordem desta montagem:

Figura 22 - Fluxograma do processo para SMDs de um lado e THC's do outro

2.4.4 Etapas de processo da placa Tipo 2 – Classe CX

O caso mais complexo de montagens mistas é quando vão THC's e SMDs de um lado e SMDs do outro (Tipo 2 – Classe CX). Nesta situação, a PCI será submetida a três processos térmicos, dois de refusão e um de cura, como pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 - Fluxograma do processo para SMDs de um lado e misto do outro

2.5 Aplicação da pasta de solda e ou do adesivo

A aplicação da pasta de solda ou da cola pode ser feita através de dosagem utilizando seringa ou imprimindo por serigrafia.

2.5.1 Dosagem utilizando seringa

A dosagem da pasta de solda ou do adesivo pode ser feita manualmente ou de forma automatizada e consiste na aplicação de força sobre o êmbolo da seringa por um tempo determinado para que se deposite a quantidade desejada sobre a PCI. Existem duas formas de aplicar esta força, por pressão pneumática ou por uma rosca metálica (dosagem volumétrica). A segunda é mais precisa que a primeira, pois conforme há variação do volume de insumo dentro do tubo, varia-se também a força necessária para se gerar a mesma quantidade de gota dosada (fator que não é compensado pelo sistema

pneumático). Na dosagem volumétrica a quantidade de insumo depositada é sempre a mesma. A Figura 24 mostra os dois tipos de dosador, pneumático (a) e volumétrico (b).

Figura 24 - Sistemas automáticos de dosagem – (a) Sistema pneumático (b) Sistema volumétrico

2.5.2 Impressão serigráfica

A impressão serigráfica consiste em aplicar pasta de solda ou adesivo usando uma máscara de aço inox, latão ou níquel, chamado de estêncil, sobre a PCI. Este processo irá transferir a imagem da máscara para a superfície da PCI. Na impressão, a pasta de solda é transferida para as ilhas dos SMDs na PCI. No caso de adesivo, quando os componentes devem ser colados antes da solda-onda, a cola é transferida para superfície da PCI entre os terminais, numa região onde apenas o corpo do componente irá tocar a placa. A Figura 25 mostra a superfície da PCI nas situações quando o *chip* é montado com pasta de solda serigrafada ou com adesivo.

Figura 25 - Impressão de pasta de solda e de adesivo sobre as ilhas dos chips na PCI

Em geral, boa parte dos defeitos de solda em SMT após a refusão é devida a falhas de impressão (tanto da pasta quanto do adesivo). A importância da impressão de pasta de solda aumenta conforme a distância entre os terminais (*pitch*) e as dimensões do encapsulamento diminuem. As principais variáveis de controle no processo de impressão são:

- **Espessura do estêncil:** Junto com as dimensões das aberturas, determina a quantidade de insumo transferido para as ilhas.
- **Dimensões das aberturas no estêncil:** Junto com a espessura do estêncil, determina a quantidade de insumo transferido para as ilhas.
- **Formato e rugosidade da parede do estêncil:** Interferem na taxa de transferência do insumo na ilha, além de influenciarem na frequência de limpeza do estêncil.
- **Temperatura e umidade do ambiente:** Alteram a viscosidade do insumo, sendo que o processo de impressão deve ser feito dentro das faixas de temperatura e umidade para se obter a qualidade desejada.
- **Reologia da pasta:** Termo usado para representar a fluidez e deformação da pasta de solda sob determinadas condições (como temperatura ou força). Pasta de solda com prazo de validade vencido ou com quantidade expressiva de evaporação de fluxo pode ter sua reologia alterada, modificando seu comportamento durante a impressão e reduzindo a qualidade da mesma.
- **Temperatura da pasta:** Deve estar igual à temperatura do ambiente durante o uso para não haver condensação ou ressecamento. Não deve ultrapassar o tempo de exposição ao ambiente, de acordo com o fabricante.
- **Alinhamento do estêncil:** Um alinhamento não preciso pode causar problemas como curtos, *tombstoning*, *solder balls* etc.
- **Qualidade do rodo de impressão:** Determina a qualidade e repetibilidade do processo de impressão.
- **Pressão do rodo:** Deve ser ajustada de forma a depositar a quantidade exata de pasta requerida. Pressão muito baixa pode ocasionar em excesso de pasta e consequentemente curtos, filetes muitos grandes etc. Por outro lado pressão muito alta pode danificar o estêncil ou o rodo da impressora.

- **Velocidade do rodo:** Velocidades muito altas reduzem a quantidade de pasta depositada e o contrário reduz a produtividade do processo ou pode também causar excesso de pasta.
- **Ângulo do rodo:** A variação do ângulo do rodo altera a quantidade de pasta depositada para uma mesma velocidade e pressão.
- **Stand-off:** É a distância entre a superfície da PCI e do estêncil. Usada como artifício para se depositar mais pasta no caso de um estêncil de espessura menor que a necessária.

2.5.3 Forno de refusão

O forno de refusão consiste em uma esteira ou trilho que levará a PCI para dentro do túnel que, aquecido por resistências cerâmicas, terá sua temperatura elevada gradualmente até a soldagem dos componentes e posterior resfriamento controlado da placa. Primeiramente a placa de circuito impresso irá entrar na zona de pré-aquecimento, onde a temperatura da PCI e dos componentes sobem uniformemente. Numa segunda etapa, conhecida como *soak*, a temperatura atinge um nível em que o fluxo é ativado (temperatura em que a reatividade do fluxo é a mais eficiente), removendo óxidos das superfícies das esferas metálicas da pasta de solda e das ilhas dos SMDs na PCI. A placa então passa para uma região onde as esferas metálicas são fundidas e fica um pouco acima da temperatura de fusão da liga por alguns segundos. Nesta etapa, a tensão superficial da pasta líquida será responsável pelo alinhamento de algum componente que estiver um pouco deslocado, mas também poderá gerar falhas de solda, como *tombstoning* (os *chips* ficam totalmente na vertical), no caso de componentes muito deslocados.

O aquecimento dos fornos de refusão pode ser feito por infravermelho ou por convecção forçada. O processo de aquecimento por infravermelho tem a desvantagem de que componentes altos podem fazer sombra nos componentes menores, e componentes muito claros poderem refletir parte dos raios incidentes. No forno aquecido por convecção estas desvantagens não ocorrem, melhorando a qualidade geral da solda.

2.6 Características da solda em SMDs

Diversas características da solda dos componentes SMDs devem ser analisadas para se verificar se as juntas não irão apresentar problemas de interconexão durante a utilização da PCI. A norma *Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies* [IPC J-STD-001] apresenta as dimensões mínimas e máximas de uma junta de solda em SMD. Como neste trabalho serão utilizados dois dos tipos de componentes mais comuns na indústria, um *chip* e um CI do tipo *gull-wing* (dobra do terminal para fora), serão detalhadas as medidas discutidas na norma IPC apenas para um resistor do tipo chip (0402 e 0603) e um QFP-44.

Na Figura 26 são exibidas as cotas dos três pontos de interesse do filete de solda dos chips: o pé, o calcanhar e a lateral do filete. A Tabela 4 mostra os valores aceitáveis para cada parte do filete.

Figura 26 - Cotas do filete de solda para os chips [IPC-A-610C]

O cálculo de Z_{max} , G_{min} e X_{max} são dados pelas equações 1, 2 e 3:

$$Z_{max} = L_{min} + J_{T_{min}} + T_T \quad (1)$$

Onde:

$J_{T_{min}}$ é o pé mínimo do filete,
 T_T são as tolerâncias combinadas do pé do filete

$$G_{min} = S_{max} - 2J_{H_{min}} - T_H \quad (2)$$

Onde:

$J_{H_{min}}$ é o calcanhar mínimo do filete

T_H são as tolerâncias combinadas do calcanhar do filete

$$X_{max} = W_{min} + 2J_{Smin} + T_S \quad (3)$$

Onde:

J_{Smin} é o filete máximo lateral

T_S são as tolerâncias combinadas da lateral do filete

Tabela 4 - Medidas aceitáveis dos filetes de solda para chips

Encapsulamento	Tolerância [mm]		Solda								
			Pé do filete			Corpo do filete			Lateral do filete		
	F	P	C _L	J _{Tmi} n	J _{Tma} x	C _S	J _{Hmi} n	J _{Hma} x	C _W	J _{Smi} n	J _{Sma} x
0402	0.1 0	0.1 0	0.1 0	0.51 n	0.60 x	0.3 0	- 0.02	0.15 x	0.1 2	0.02 n	0.11 x
0603	0.1 0	0.1 0	0.2 0	0.53 n	0.65 x	0.4 1	0.04 n	0.25 x	0.2 5	0.01 n	0.15 x

A Figura 27 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as cotas dos pontos de interesse do filete de solda de um QFP-44. A Tabela 5 exhibe os valores aceitáveis para as cotas indicadas na Figura 27.

Figura 27 - Cotas dos filetes de solda do QFP-44 [IPC-A-610C]

Tabela 5 - Medidas aceitáveis dos filetes de solda para o QFP-44

Pitch [mm]	Tolerâncias [mm]		Filete da solda								
			Pé [mm]			Calcanhar [mm]			Lateral [mm]		
	F	P	C _L	J _{Tmin}	J _{Tmax}	C _S	J _{Hmin}	J _{Hmax}	C _W	J _{Smin}	J _{Smax}
0.80	0,10	0,10	0,50	0,17	0,43	0,66	0,42	0,75	0,15	0,00	0,10

Como discutido na seção 2.1, as placas são classificadas pela *Association Connecting Electronics Industries* (IPC) em classes de 1 a 3, sendo a 3 a mais rigorosa nos seus requisitos de aceitabilidade.

2.7 Pin-In-Paste

A tecnologia chamada de *Pin-in-Paste*, ou PIP, (que significa pino ou terminal na pasta) consiste na soldagem dos componentes convencionais no mesmo processo utilizado na tecnologia SMT, a refusão. Outras denominações podem ser encontradas na literatura: siglas como THR (*Through Hole Reflow* ou Refusão com Terminal Passante), AART (*Alternative Assembly and Reflow Technology* ou Tecnologia de Refusão e Montagem Anternativa) e *Intrusive Reflow* (Refusão intrusiva). Neste trabalho o processo será chamado de PIP.

Basicamente o PIP consiste em aplicar pasta de solda sobre os furos da PCI onde serão inseridos os terminais do componente (PTH), esse processo é realizado na mesma etapa de impressão onde é depositada a pasta de solda nas ilhas dos SMDs. A abertura do estêncil é um pouco maior do que o diâmetro do PTH, permitindo que seja aplicada pasta também nas bordas do furo. Depois os componentes SMDs são inseridos pela *Pick & Place*, assim como os THCs. Caso a *Pick & Place* não tenha a capacidade de inserir THCs eles poderão ser colocados manualmente logo após a montagem dos SMDs. No final, a placa é soldada pelo processo de refusão, onde a pasta de solda previamente aplicada na superfície deve escorrer e preencher o furo dos THCs e após o resfriamento terá criado a interconexão do terminal do componente com o furo metalizado da PCI.

O PIP é um processo novo, que ainda precisa de melhorias em alguns itens para a obtenção de uma solda com qualidade mínima para que ocorra sua popularização. Melhorias tais como: projeto do estêncil e dos furos da PCI, dispositivos que suportem as temperaturas de refusão, confiabilidade da resistência mecânica da solda, e o desenvolvimento do processo usando a tecnologia *lead-free*, entre outros aspectos que precisam ser estudados para a viabilização de uma completa eliminação dos processos tradicionais de soldagem de THT.

Utilizar o PIP ao invés da solda-onda traz inúmeras vantagens às tradicionais linhas de montagem [Demirtas, 2008]:

- Eliminação da etapa de solda-onda sem adição de nova etapa,
- Diminuição de pessoal,
- Possibilidade da utilização das *Pick & Places* que montam os SMDs para inserirem também os THCs,
- Redução do tempo de montagem,
- Diminuição de taxas de erros pós-montagem com uma melhoria na soldabilidade,
- Redução de espaço usado pela linha de montagem (maior *throughput/m²*),

Na solda onda, o calor da PCI é resultado do contato com a onda, então há um gradiente de temperatura significativo na placa, com o lado de cima dela sempre a uma temperatura mais baixa que o lado inferior. Mesmo com aquecimento adicional superior, este gradiente nunca é eliminado. Assumindo que a solda sempre é atraída para o local mais quente, o fluxo de solda irá relutar em se mover para o lado superior da PCI, porque é o lado mais frio, resultando em uma solda incompleta. Este não é o caso da solda PIP já que o aquecimento da PCI é devido à convecção de calor pelo ar quente que envolve toda a placa, resultando em uma solda mais uniforme na extensão do furo. [Subbarayan, 2011]

Outra desvantagem da solda onda é que uma quantidade significativa de cobre é dissolvida pela onda quando em contato com o furo metalizado, contaminando o tanque de solda. Este problema de dissolução de cobre é evitado no PIP [Subbarayan, 2011].

Outro aspecto importante, é que as empresas fabricantes e montadoras de PCI no Brasil precisarão, em um futuro próximo, migrar sua tecnologia de solda com chumbo para *lead-free*. Atualmente as empresas brasileiras que exportam para a União Européia, Japão, assim como para diversas empresas americanas que se anteciparam à legislação e já produzem com *lead-free*, estão sendo forçadas a migrar também para uma tecnologia de solda sem chumbo. Como é um processo de solda que necessita de temperaturas mais altas para refundir, serão necessárias trocas dos equipamentos que atualmente

soldam os componentes para atingirem as temperaturas demandadas. O gasto das indústrias em troca de equipamentos é relativamente alto e a possibilidade de não se necessitar da compra, por exemplo, de uma nova solda-onda dedicada a *lead-free*, já geraria uma enorme economia na migração do processo de solda na indústria. Outro problema associado à solda-onda *lead-free* é a molhabilidade (capacidade de escoar e recobrir a superfície metálica do terminal) da solda ser menor, diminuindo a qualidade das soldas e dificultando o processo. [Ganesan, 2006]

Outra grande motivação desta pesquisa é o impacto ambiental que ela pode causar. A eliminação do processo de solda-onda reduziria significativamente a emissão de VOC (Compostos orgânicos voláteis) no ambiente, que é resultado da aplicação de fluxo nas PCIs feita pelo equipamento de solda-onda [Barbini, 2005], além de se eliminar os resíduos sólidos deixados pelo equipamento, que devem ser retirados pelo fabricante da solda para tratamento. Atualmente existem fornos de refusão que retiram da atmosfera do forno boa parte do fluxo evaporado antes de soltar o ar pela exaustão, tornando o processo ainda mais limpo. Para as soldas-onda, existe no mercado fluxos VOC-free, que não se baseiam em solventes e sim em água. Embora possua bom desempenho, seu alto custo atual impede uma disseminação em larga escala de seu uso. O mesmo se aplica para as pastas de solda.

Em relação às diferenças de força mecânica das soldas realizadas por refusão e por solda-onda, de acordo com [Wassink, 1989], a solda realizada por solda-onda resulta em uma junção com microestrutura muito fina devido ao rápido resfriamento, levando a uma força mecânica superior à da refusão. Entretanto, [Manko, 1995], descreve que o fenômeno de envelhecimento da solda levaria a microestrutura de grão fino para um processo de microestrutura mais grossa, tornando equivalentes os valores de força mecânica obtidos para juntas realizadas por refusão e por solda-onda.

Em [Seeniraj, 1998] foram realizados uma série de experimentos de tensão mecânica para avaliar as forças e mecanismos de falha entre as soldas realizadas por solda-onda e por PiP. Foi concluído que força mecânica para volumes de solda realizadas por PiP, a partir de 80% de preenchimento, seriam compatíveis com as medidas por soldas realizadas por solda-onda.

Em [Mihály, 2010] é apresentado um modelo de medição de volumes de solda PIP através de equipamentos de raios-X de alta definição. As amostras que tiveram seus volumes de solda calculados utilizando o modelo proposto são avaliadas também através de corte metalográfico. A Figura 28, extraída deste trabalho, exhibe quatro níveis de soldagem de uma junta PIP: solda ideal, solda aceitável (volume preenchido a partir de 75%), e dois níveis de soldas defeituosas: um entre 50% e menor que 75% de preenchimento e o último abaixo de 50% do volume livre do PTH ocupado por solda.

	Optimal	Acceptable	Hidden failure (voids)	Failure
Preliminary qualification	Deposited volume = Required volume	Deposited volume 75-100% of Required volume	Deposited volume = 50-75% of Required volume	Deposited volume = 0-50% of Required volume
Cross section of the PIP solder joint

Figura 28 - Exemplos de cortes metalográficos para quatro níveis de soldagem de uma junta PIP: Solda ideal, solda com o mínimo de 75% do volume preenchido (aceitável), solda com volume entre 50% e 75% (defeito) e solda com menos de 50% de preenchimento (defeito)

Uma outra possibilidade de incrementar o volume de solda após a refusão em uma solda PIP é a utilização de *solder preforms*, que consistem em blocos de solda sólidos que devem ser posicionados sobre as ilhas dos PTHs. Após a refusão estes blocos irão se refundir com a pasta de solda e aumentar o volume final preenchido. Embora este artifício esteja presente no mercado há alguns anos, em forma de anéis que são colocados em volta das ilhas dos PTHs, seu posicionamento não é fácil e de trabalho manual intensivo. Sua automação através de *Pick & Places* também não é simples devido à

difficuldade em alimentá-los. Mas recentemente houve um grande avanço na utilização de *solder preforms* através da comercialização de *preforms* em *chips* (em formato de paralelepípedo como um resistor 0603) [Subbarayan, 2011]. Tal alteração no formato permite uma automação muito mais simples e eficiente através de *Pick & Places*, o que pode ajudar a preencher soldas que ficam muito pobres em volume mesmo utilizando as aberturas máximas possíveis no estêncil para o PTH. O método consiste em posicionar o *chip* de solda perto da borda do furo, mas sem bloqueá-lo, permitindo que o *preform* fique em contato com a região metálica do PTH, mas sem impedir que o terminal passe durante a inserção.

Durante a refusão, a pasta se liquidifica e a tensão superficial da pasta fundida irá molhar a superfície do *preform* e drená-lo para o PTH, preenchendo o furo junto com a pasta impressa.

A protrusão do terminal, ou o comprimento do terminal subtraindo a espessura da placa, não deve superar 1,5 mm [Littelfuse]. Isso é importante para que não haja um deslocamento excessivo de pasta para fora do PTH. De acordo com [Coleman, 2000] esta protrusão não pode ultrapassar em 1,27 mm a superfície da placa. Isso porque quando o terminal é inserido boa parte da pasta de solda é empurrada para fora do furo, e se o terminal for longo demais, a pasta não irá retornar ao furo durante a refusão, reduzindo o volume total de solda. Já na norma IPC a regra é que a protrusão mínima deve ser 1,52 mm. Para este trabalho será considerado correto então o valor de 1,5 mm de protrusão máxima. Caso for necessário o uso de componentes com terminais que criem uma protrusão maior que 1,5 mm, o ideal é o bloqueio do furo ou parte dele com o estêncil, imprimindo apenas sobre e envolta da ilha do PTH [Subbarayan, 2011].

A dificuldade da utilização de THCs em PIP está também nos materiais utilizados na fabricação dos encapsulamentos dos componentes, que geralmente são projetados para suportar de 50 a 100°C a menos que os materiais utilizados em SMDs. A seguir é exibida uma lista (Tabela 6) dos materiais aceitáveis e não aceitáveis para encapsulamentos no processo PIP:

Tabela 6 - Materiais que podem ou não ser utilizados na fabricação de encapsulamentos para PIP

Aceitáveis	Não Aceitáveis
Diallyl Phthalate	ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene
FEP - Fluorinated Ethylene Propylene	Acetal polymer
Neoprene	Acrylic
Nylon 6/6	CAB - Cellulose Acetate Butyrate
PFA - Perfluoroalkoxy Resin	PBT - Polybutylene Terephthalate
Phenolic	Polybutylene
Polyamide-imide	Polycarbonate
Polyarylsulfone	Polyethylene
Polyester	Polyphenylene Oxide
Thermoset	Polypropylene
Polyetherimide	Polystyrene
Polyethylene Terephthalate	PVC - Polyvinyl Chloride
Polyimide	PET - Polyethylene Terephthalate
Polysulfone	
PFTE - Polytetrafluoroethylene	
Silicone	
PPS – Polyphenylene Sulfide	
LCP - Liquid Crystal Polymer	
Polyetheretherketone	

A previsão de solda onda e solda seletiva realizada pela iNEMI (*International Electronics Manufacturing Initiative*) - Tabela 7 - em 2004 mostra um potencial de crescimento no uso do PIP em relação à solda onda de 50% dos THCs até 2015. Embora os dados já estejam um pouco desatualizados, apenas o fato de que a instituição acredita que o processo PIP vá crescer tanto nos próximos anos já é uma informação valiosa ao avaliar a importância deste novo processo.

Tabela 7 - Previsões tecnológicas para Solda onda e seletiva (iNEMI Roadmap, 2004)

Parâmetro	Métrica	2003	2005	2007	2009	2015
Fluxo para solda-onda	VOC-free/halogen-free (%/%)	18/19	23/92	27/95	30/95	90/95
Liga lead-free para solda-onda	Utilização % (outras/SAC)	SnPb	50/50	30/70	10/90	10/90
Pitch mínimo	Mil	75	60	40	20	16
Onda convencional/seletiva	Utilização % (convencional/seletiva)	90/10	75/25	60/40	60/40	60/40
PIP/Solda onda	Utilização %	10/90	30/70	30/70	50/50	50/50
Temperatura de pré-aquecimento	°C	90-110	140-160	140-160	140-160	140-160
Temperatura do tanque de aquecimento	°C	250-260	260-270	260-270	260-270	260-270
Ambiente do processo	N2/ar	50/50	80/20	80/20	280/20	90/10

2.7.1 Descrição do Processo PIP

O processo mais simples de refusão dos componentes convencionais por refusão junto com os SMDs ocorre com as PCIs Tipo 1 Classe C e pode ser resumido como mostra o fluxograma na Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma de montagem de uma PCI Tipo 1 Classe C com PIP

Para aplicar a pasta de solda sobre as ilhas dos SMDs e sobre os furos dos THCs utiliza-se do processo de impressão serigráfica ou de dosagem. Em seguida são posicionados os componentes SMDs, geralmente usando uma *Pick & Place*, seguido pela inserção dos THCs, que pode ser realizada tanto automaticamente ou manualmente. O processo de inserção manual dos THCs nas PCI onde já existam SMDs posicionados mas com a pasta de solda ainda em sua forma original (sem refusão) não é tão trivial pois o operador pode tocar e deslocar algum componente SMD e alterar sua posição, o que é bem mais crítico caso houver SMDs bem próximos aos THCs.

A PCI é levada então ao forno de refusão, onde a pasta de solda será refundida e após o resfriamento serão formados as interconexões de solda nos THCs e SMDs. Caso o forno seja de esteira, e não de trilho, deverão ser utilizadas guias nas laterais das placas para que a face inferior não toque a esteira, evitando deslocamento dos THCs.

Para utilizar o PIP em PCIs Tipo 2 Classe CX deverão ser avaliados os tipos de componentes e a posição de cada um para serem definidas as ordens de cada etapa de montagem. Primeiro deverá ser soldado o lado da PCI com os SMDs pequenos. Em seguida é soldado o lado da placa com os SMDs pesados (como CIs e conectores SMD) e com os THCs. A tensão superficial da pasta de solda líquida não é capaz de sustentar os THCs de ponta cabeça, obrigando a soldá-los apenas na segunda refusão. A Figura 30 mostra o fluxograma para montagem de PCI tipo 2 Classe CX utilizando PIP:

Figura 30 - Fluxograma de montagem de uma PCI Tipo 2 Classe CX com PIP

2.7.2 O diâmetro dos furos na PCI

O diâmetro final do furo do PTH é obtido após o processo de fabricação da PCI, incluindo a camada de metalização (*plating*). Se o diâmetro final for muito pequeno será muito difícil preencher corretamente o furo com a pasta de solda. Por outro lado, furos muito grandes necessitam de um maior volume de pasta, o que resulta na necessidade de uma abertura grande demais no estêncil. Como alternativa pode-se utilizar o *step stencil* que consiste em um estêncil com espessura maior nas aberturas destinadas aos PTHs.

3. Materiais e métodos

Neste trabalho foram consideradas algumas variáveis do processo *pin-in-paste*. Foram montados três tipos diferentes de componentes THC na placa de teste: Conector DB-9, barras de pinos e fusível. Para cada tipo montaram-se duas unidades por placa, sendo duas medidas diferentes de diâmetro do furo para cara THC. Na placa de circuito impresso projetada foram incluídos também 12 SMDs 0402, 12 SMDs 0603 e um QFP-44. Todas as dimensões das ilhas dos SMDs e outros aspectos da placa de teste seguiram a norma IPC-SM-782A *SMD Design and Land Pattern*.

Para cada THC foram consideradas duas medidas diferentes de furo, dentro da faixa sugerida pelo fabricante e da norma IPC-2222 *Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards*.

Uma variável que poderia ter sido considerada seria a espessura do estêncil, variações que poderiam ser interessantes devido à grande relevância que apresentariam no volume de pasta impresso, mas devido ao custo elevado de cada estêncil foi escolhida uma espessura apenas (7 mil) para o desenvolvimento do trabalho. As dimensões das aberturas do estêncil foram calculadas utilizando equações já estudadas na literatura, e de acordo com a norma IPC-7525A *Stencil Design Guidelines*.

A pasta de solda poderia também ser uma variável, já que poderiam ser analisadas várias ligas com e sem chumbo. Como cada liga possui características como molhabilidade, temperaturas de fusão e outras características de soldabilidade diferentes, seria também de bom proveito um estudo detalhado sobre as características de cada liga no processo Pin-In-Paste. Por motivos de custo e de viabilidade no próprio trabalho aqui descrito, foi escolhida a liga SAC. Sua escolha foi devida ao crescente uso de ligas *lead-free*, e consequentemente o desuso das ligas com chumbo, sendo a liga SAC a mais utilizada, testada e aceita atualmente [Mendes, 2009].

O Experimento 1 consistiu na obtenção dos melhores parâmetros de impressão de pasta de solda na placa, sendo que as variáveis mais importantes são: pressão, velocidade de impressão e ângulo da lâmina. Como alternativa para uma maior deposição de pasta sem alterar o projeto, foi

também utilizada a dupla impressão, onde a placa é impressa duas vezes pela *screen-printer*.

A inserção dos componentes SMDs foi através de *Pick & Place* de alta precisão da Panasonic. Os THCs foram inseridos manualmente logo após os SMDs.

No forno foram ajustados dois perfis de temperatura que, ao serem comparados com o perfil de referência do fabricante, permitiriam, em teoria, que todos os componentes da placa atingissem as temperaturas e tempos mínimos em cada zona do processo, sendo que a diferença máxima de temperatura entre componentes aceita na placa deveria ser de 10°C. As placas foram montadas e soldadas no mesmo dia, para evitar diferenças de temperatura e umidade no ambiente.

As soldas obtidas nos THCs e SMDs foram primeiramente analisadas com microscópio ótico e comparadas com a norma IPC 610C para placas Classe 2, que descreve a aceitabilidade de volume da solda de componentes das duas tecnologias para placas de média performance. A norma determina que, para os componentes convencionais, 75% do furo metalizado deve estar preenchido com pasta de solda, além de algumas outras medidas mínimas. Como análise de caráter experimental, as amostras fotografadas foram radiografadas com um equipamento de raios-x para uso odontológico, com o intuito de procurar por lacunas de solda dentro do furo metalizado.

Para avaliação da qualidade dos raio-x e para uma observação real da molhabilidade da solda gerada foram realizados também cortes metalográficos nos THCs. Tais cortes permitiram analisar o formato das soldas obtidas, suas dimensões, defeitos e outras características internas.

Para se concluir se o processo de refusão com PiP da PCI com componentes mistos atingiu os objetivos, foram analisadas também as soldas dos SMDs, que deveriam atingir os limites mínimos de volume e presença de defeitos descritos pela norma IPC 610C para placas Classe 2.

3.1 Escolha dos componentes

Atualmente nas placas projetadas em SMT, ainda são utilizados alguns THCs, sendo que a maioria são conectores e dispositivos de potência.. Foram

escolhidos três tipos de componentes THC após um estudo mercadológico dos THCs capazes de serem soldados por refusão na tecnologia *lead-free*. Já que os THCs serão submetidos a temperaturas bem mais altas do que acontece no processo de solda-onda (até 260°C para *lead-free*), foi necessário encontrar componentes que suportassem altas temperaturas sem que houvesse deformação no material de encapsulamento. Nesta etapa verificou-se que os THCs mais utilizados pelas empresas montadoras de PCI e os mais utilizados nos artigos avaliados foram os conectores.

Serão montados três tipos diferentes de componentes THC na placa de teste: Conector DB-9, barras de pinos e fusível (para cada tipo serão duas unidades por placa). Na placa haverá também 12 SMDs 0402, 12 SMDs 0603 e um QFP-44.

3.1.1 SMD - Chips

Foram escolhidos os *chips* 0402 e 0603 por serem os mais utilizados atualmente na indústria brasileira, nas mais variadas aplicações. *Chips* menores, como 0201, ainda são muito pouco utilizados e trariam problemas de projeto de estêncil mais complexos já que a medida única escolhida de 7 mil seria muito espessa para este encapsulamento, imprimindo pasta em excesso. *Chips* maiores, como 0805 e 1206 ainda são largamente utilizados, mas já estão em declínio de uso na indústria nacional há alguns anos.

As medidas dos chips 0402 e 0603 devem seguir a norma *IPC-SM-782A SMD Design and Land Pattern*. A Figura 31 e a Tabela 8 mostram as dimensões mínimas e máximas para cada *chip* escolhido.

Figura 31 - Cotas dos chips 0402 e 0603

Tabela 8 - Dimensões dos *chips* 0402 e 0603

Encapsulamento	L		S		W		T		H
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Máx.
0402 [mm]	1.00	1.10	0.40	0.70	0.48	0.60	0.10	0.30	0.40
0603 [mm]	1.50	1.70	0.70	1.11	0.70	0.95	0.15	0.40	0.60

3.1.2 SMD - Circuito Integrado

O CI escolhido é um QFP-44 LC75372E da Sanyo, um sistema de controle eletrônico de volume de som estéreo automotivo. A opção de utilizar um CI comercial e não um componente *dummy* ocorreu devido ao alto custo encontrado no mercado para o segundo tipo. Optou-se pelo encapsulamento QFP-44 por possuir um *pitch* de 0,80 mm, intermediário entre os SOICs 1,27 mm e os *ultra fine-pitches* de 0,30 mm. *Pitches* muito reduzidos poderiam trazer problemas de qualidade de solda inerentes à tecnologia que poderiam criar confusão na análise de dados dos SMDs, secundários neste trabalho. Além de possuírem um alto custo em comparação com CIs de *pitches* médios.

As dimensões do CI QFP-44 devem seguir a norma *IPC-SM-782A SMD Design and Land Pattern*. A Figura 32 e a Tabela 9 mostram as dimensões mínimas e máximas para este CI que será usado na placa de teste.

Figura 32 - Cotas do QFP-44

Tabela 9 - Dimensões do CI QFP-44

Cota Dimensão [mm]	L		S		W		T		A	B	P	H
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
	12.95	13.45	11.05	11.71	0.30	0.45	0.65	0.95	10.00	10.00	0.80	2,45

3.1.3 THC – Conector Barra de Pinos

A barra de pinos (ou pin header) é um conector muito utilizado em PCIs para diversas aplicações (Figura 33).

Figura 33 - Foto da barra de pinos utilizada e aplicações possíveis em PCIs

Na Figura 34 abaixo são exibidas as dimensões da barra de pinos utilizada neste trabalho:

Figura 34 - Dimensões da barra de pinos [FCI]

3.1.4 THC – Conector DB09

Os conectores *D-Subminiature* (mais conhecidos como DB) são os mais populares na aplicação de I/O no mercado, a exemplo dos conectores de sinal de monitor de vídeo dos computadores. São muito usados em segmentos como telecomunicações, industrial, instrumentação e médico. Pelo seu grande uso no mercado e pela boa quantidade de pinos (9, 15 ou 25) o DB foi escolhido para ser um dos componentes THC para o processo de PiP. O DB-15 foi escolhido pela melhor relação custo/pino. A Figura 35 e a Tabela 10 mostra as medidas do DB-09 utilizado:

Figura 35 - Medidas do conector DB-09 [FCI]

Tabela 10 - Dimensões do conector DB-09

A	B	C	G	J	L	N
30,81	24,99	16,96	6,05	11,67	9,50	2,00

3.1.5 THC – Fusível

O terceiro THC escolhido foi um fusível Littelfuse TR5 desenvolvido especialmente para a tecnologia PIP. O encapsulamento possui uma elevação embaixo do corpo com o objetivo de que este não toque as ilhas da placa durante o processo de montagem e solda. Sua escolha foi com o intuito de aumentar a diversidade de THCs soldados na placa de teste, para que esta não possuísse apenas conectores. A massa térmica deste componente também é diferente dos outros THCs escolhidos, o que poderia trazer alguma informação importante sobre refusão de THCs com diferentes massas térmicas. A Figura 36 mostra o fusível escolhido e seus pontos de interesse.

Figura 36 - Foto do fusível

As dimensões dadas pelo fabricante podem ser vistas na Figura 37.

Figura 37 - Dimensões do fusível [mm]

3.2 Projeto da PCI

A placa de circuito impresso foi construída usando como substrato o laminado epóxi com fibra de vidro (FR4), que é o material mais utilizado hoje na indústria. O tipo de placa escolhida foi Tipo 1 Classe 2, assim como foi realizado em boa parte da literatura. A cor da máscara é verde e as sinalizações serigráficas são brancas. A espessura da placa também é a mais comum no mercado: 1,6 mm. Reduziram-se as dimensões da placa o quanto possível, com o objetivo de reduzir custos de fabricação. Os componentes foram posicionados de forma a reduzir regiões com massas térmicas muito diferentes no painel. A Figura 38 mostra o projeto em CAD da placa.

Figura 38 - Leiaute da PCI

Realizou-se um estudo sobre as dimensões dos furos e das ilhas metalizadas dos mesmos para se determinar quais são as medidas para se obter a melhor soldabilidade para cada tipo de componente proposto. Foram

avaliadas as medidas propostas na bibliografia, as sugestões dos *datasheets* de cada fabricante e as normas IPC 2221 - *Generic Standard on Printed Board Design* e IPC-2222 - *Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards* para se propor dois diâmetros diferentes para cada THC. A inclusão da variável diâmetro do furo no trabalho foi incluída por não ter sido muito discutida na literatura e por haver uma provável relação entre esta dimensão e a qualidade e volume de solda obtida. A Figura 39 mostra as dimensões do painel e das furações dos PTHs.

Figura 39 - Leiaute do painel com as disposições dos PTHs

No estudo realizado por Dongkai e colaboradores. não foi notada diferença relevante de molhabilidade da solda e sua qualidade entre os tipos de acabamento de PCIs em. Neste trabalho, foram estudados os acabamentos HASL *Lead-Free* (*Hot Air Soldering Level Lead-Free*), *Organic Solderability Preservative* (OSP) e o *Electroless Nickel Immersion Gold* (ENIG) [Dongkai, 2005]. Baseado nestes resultados o acabamento escolhido para a PCI usada

neste trabalho foi o *HASL Lead-Free*, pois se mostrou o mais acessível economicamente e de maior utilização no mercado.

As PCIs do experimento foram fabricadas pela empresa [Micropress] e a foto do painel pode ser vista na Figura 40:

Figura 40 - Painel com 4 PCIs do experimento

3.2.1 Dimensões dos PTHs

Em [Guhan] é descrito um experimento que teve cinco diâmetros diferentes para um mesmo terminal soldado (10, 20, 30, 40 e 50 mil acima do diâmetro do terminal do componente). Os resultados não são muito conclusivos, sendo que o autor comenta que para 10 mil seria muito difícil inserir o componente e para 50 mil haveria a necessidade de imprimir muita pasta de solda, além do risco de bolhas no interior do PTH. Os diâmetros de 20, 30 e 40 mil a mais que o diâmetro do terminal seriam os indicados pelo autor no projeto dos furos das PCIs. Outro comentário está em relação à quantidade de terminais em um conector THT, quanto maior o número de terminais, maior deve ser o diâmetro do furo, para facilitar a inserção.

As dimensões dos PTHs (*Plated Through Holes*) ou os furos metalizados onde são inseridos os THCs foram projetadas de acordo com a instrução dos fabricantes dos componentes. Foi avaliado se tais dimensões cumprem as dimensões mínimas e máximas da norma IPC-2222 - *Sectional Design*

Standard for Rigid Organic Printed Boards. A Tabela 11 mostra os diâmetros dos PTHs de cada componente a ser usado no experimento.

Tabela 11 - Diâmetro do furo finalizado de cada PTH da placa de teste

Identificação	Diâmetro/lado do terminal (mm)	Diâmetro Furo (mm) $\pm 0,1$	Diâmetro Ilha (mm) $\pm 0,1$	Largura excedente (mm)
CN-1	0.51	0.80	1.15	0.29
CN-2	0.51	0.90	1.15	0.39
DB-1	0.50	0.90	1.65	0.40
DB-2	0.50	1.00	1.65	0.50
DB-Guia	3.10	3.10	5.80	0.00
F1	0.60	0.90	1.50	0.30
F2	0.60	1.00	1.50	0.40

3.2.2 Dimensões das ilhas dos SMDs

As ilhas dos SMDs foram projetadas de acordo com a norma [IPC-SM-782A]. A área que deve estar livre envolta das ilhas dos componentes é determinada por múltiplos de quadrados de 0,5 mm de lado. A quantidade de quadrados é determinada nas tabelas de dimensões das ilhas neste trabalho pela letra M.

As dimensões das ilhas dos chips 0402 e 0603, na placa de teste, devem seguir a norma [IPC-SM-782A]. A Figura 41 e a Tabela 12 mostram as dimensões mínimas e máximas para estes *chips* que serão usadas na placa de teste.

Figura 41 - Cotas das ilhas dos chips 0402 e 0603

Tabela 12 - Medidas das ilhas dos *chips* 0402 e 0603

Chip	Z	G	X	Y	C	M
0402	2.20	0.40	0.70	0.90	1.30	2X6
0603	2.80	0.60	1.00	1.10	1.70	4X6

As dimensões das ilhas do CI QFP-44, na placa de teste, devem seguir a norma *IPC-SM-782A SMD Design and Land Pattern*. A Figura 42 e a Tabela 13 mostram as dimensões mínimas e máximas para este CI que será usado na placa de teste.

Figura 42 - Cotas das ilhas do QFP-44

Tabela 13 - Medidas das ilhas do QFP-44

Encapsulamento	Z	G	X	Y	C	D	E	M
QFP 44	13.80	10.20	0.50	1.80	12.00	8.00	0.80	30X30

3.2.3 Dimensões dos fiduciais

Foram incluídos três fiduciais em cada placa, mais três fiduciais no painel. Suas dimensões seguiram a norma *IPC-SM-782A SMD Design and Land Pattern*. A norma determina que o diâmetro mínimo da área cobreada é de 1 mm. Um recuo da máscara de solda deve estar envolta do círculo cobreado com uma dimensão mínima de um raio do círculo e preferencialmente de um diâmetro do círculo, como mostra a Figura 43.

Figura 43 - Medidas de fiduciais na norma IPC-SM-782A

Devido à pequena dimensão total da placa foi escolhido utilizar as dimensões mínimas de fiducial, com diâmetro do círculo cobreado de 1 mm e diâmetro do círculo de recuo de 2 mm, como mostra a Figura 44.

Figura 44 - Medidas adotadas no fiducial da PCI do experimento

3.2.4 Projeto do Estêncil

As dimensões das aberturas do estêncil utilizado na impressão da pasta de solda no furo da PCI são muito importantes, já que também irão determinar a quantidade e a posição da pasta de solda que entrará no furo. No trabalho deverão ser consideradas todas as dimensões do projeto do estêncil, o material utilizado em sua fabricação e o material do rodo utilizado na impressão.

Para se determinar as dimensões da abertura do estêncil para cada PTH, deve-se considerar a quantidade desejada de pasta a preencher o furo na PCI. Em geral, cerca de metade da massa da pasta de solda é composta por metal, sendo que o resto é evaporado durante a refusão. O volume da solda de um terminal de um THC é calculado pela equação a seguir [Jensen, 2003]:

$$V_s = V_h + 2V_f - V_p$$

Onde:

V_s é o volume total da solda do terminal

V_h é o volume do furo da PCI

V_f é o volume do filete de solda

V_p é o volume do pino do componente

O volume de pasta a ser impressa no furo deve ser aproximadamente o dobro do desejado de solda (V_s). Para se determinar o real volume de pasta a ser impressa, deve-se realizar o seguinte cálculo:

$$V_{SP} = \frac{V_S}{F}$$

Onde:

V_{SP} é o volume de pasta de solda a ser impressa

F é o fator de redução da pasta de solda (varia entre 0,45 e 0,55)

Para este projeto, considerou-se F como 0,5, já que as variações em torno deste valor na literatura são consideradas pouco relevantes.

O volume do furo, de formato cilíndrico, é calculado por:

$$V_h = \frac{\pi D_h^2 t_b}{4}$$

Onde:

D_h é o diâmetro do furo finalizado

t_b é a espessura da placa

Depois é necessário calcular o volume do filete ideal para as dimensões do furo e do componente. Na literatura foi possível encontrar a equação a seguir que descreveria o volume do filete.

$$V_f = 0,215R_f^2 \cdot 2\pi(0,2234R_f + r_t)$$

Onde:

R_f é o raio do filete

r_t é o raio do pino

Como em nenhum dos artigos pesquisados foram encontradas as deduções para obtenção da equação, foi criado um modelo simplificado de cálculo do volume do filete utilizando uma equação simples de segundo grau:

$$f(x) = x^2 + r_t$$

Onde:

r_t é o raio do terminal

Neste modelo será considerado que a largura e a altura do filete serão iguais a $R_f - r_t$, conforme o desenho a Figura 45:

Figura 45 - Considerações sobre altura e largura do filete de solda do THC

Ao plotar a equação $f(x)$ de $x = 0$ a $x = R_f$ (raio do filete), obtém-se a curva mostrada na Figura 46. Ao rotacionar em torno do eixo X a área cinza obtida na curva anterior, resulta-se no sólido de volume V exibido na Figura 46.

Figura 46 - Curvas representando o filete (a) Curva de $f(x)$ e (b) Curva mostrando o volume do sólido obtido com a rotação de $f(x)$

Calculando o volume V e subtraindo deste valor o volume do terminal dentro do filete (com altura = R_f), chega-se a expressão do volume de solda do filete. O volume do sólido de revolução gerado por uma função $f(x)$ é igual a:

$$V = \pi \int_a^b [f(x)]^2 dx$$

Aplicando esta fórmula à função quadrática proposta, obtêm-se:

$$V = \pi \int_0^{R_f - r_t} [x^2 + r_t]^2 dx$$

Resolvendo a integral de 0 a $R_f - r_t$, chega-se a seguinte expressão:

$$V = \pi \left(r_t^2 (R_f) + \frac{2r_t (R_f - r_t)^3}{3} + \frac{(R_f - r_t)^5}{5} \right)$$

Para se obter o volume de solda no filete, deve-se subtrair o volume ocupado pelo terminal na altura do filete V_t . Este volume é dado por:

$$V_t = \pi r_t^2 (R_f - r_t)$$

A equação então que define o volume de solda no filete é dada por:

$$V_f = V - V_t$$

Substituindo as equações de V e V_t em V_f , temos:

$$V_f = \pi \left(r_t^2 (R_f - r_t) + \frac{2r_t (R_f - r_t)^3}{3} + \frac{(R_f - r_t)^5}{5} \right) - \pi r_t^2 (R_f - r_t)$$

A equação final para cálculo do volume de filete proposta é:

$$V_f = \pi \left(\frac{2r_t (R_f - r_t)^3}{3} + \frac{(R_f - r_t)^5}{5} \right)$$

Continuando o desenvolvimento da expressão que irá calcular o volume de pasta a ser impresso, deve-se obter então o volume ocupado pelo pino dentro da espessura na placa. Para pinos de seção transversal circular, calcular o volume V_p através de:

$$V_p = \frac{\pi D_p^2}{4} t_b$$

Para pinos de seção transversal quadrada ou retangular, considerar a área equivalente da seção de um pino cilíndrico. Primeiro deve-se igualar a área da seção do terminal à fórmula da área do círculo:

$$L_p \cdot W_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$$

Onde:

L_p é a largura do pino

W_p é o comprimento do pino

Então isola-se o termo do diâmetro D_p para se encontrar o valor equivalente de área circular para o pino de seção transversal quadrada ou retangular:

$$D_p = 2 \sqrt{\frac{L \cdot W}{\pi}}$$

Juntando as equações acima se encontra o valor do volume total de solda a ser impresso para o PTH:

$$V_{SP} = \frac{\frac{\pi D_h^2 t_b}{4} + 2\pi \left(\frac{2r_t(R_f - r_t)^3}{3} + \frac{(R_f - r_t)^5}{5} \right) - \frac{\pi D_p^2 t_b}{4}}{F}$$

Que pode ser reduzida a:

$$V_{SP} = \frac{\frac{\pi t_b (D_h^2 - D_p^2)}{4} + 2\pi \left(\frac{2r_t(R_f - r_t)^3}{3} + \frac{(R_f - r_t)^5}{5} \right)}{F}$$

Sabendo-se o volume total de solda a ser impresso para cada furo, deve-se decidir o formato da abertura do estêncil, sendo que o formato retangular irá resultar num maior volume de solda em comparação ao tradicional formato circular. Caso seja retangular, a equação para a abertura do estêncil será:

$$V_S = L_S \cdot W_S \cdot t_S$$

Onde:

L_s é o comprimento da abertura do estêncil

W_s é a largura da abertura do estêncil

t_s é a espessura do estêncil

Na sequência deve-se calcular a área da abertura do estêncil, para depois se descobrir cada lado do retângulo. Como já se conhece o volume total de solda a ser impresso, dividir este valor pela espessura do estêncil, encontrando a área da abertura:

$$A_s = \frac{V_s}{t_s}$$

As regiões impressas tem que ficar pelo menos a 0,3 mm de distância para evitar curtos entre os terminais de acordo com [Littelfuse]. Em [Coleman, 2000] argumenta-se que esta distância deve ser a partir de 0,4 mm. Neste trabalho optou-se por utilizar uma média entre estes dois valores, ou seja, 0,35 mm. Deve-se então descobrir o valor máximo de largura do retângulo da abertura que respeite esta distância, para depois se calcular, dividindo a área encontrada acima por este valor, a dimensão do comprimento do retângulo.

Foram adicionados ao estêncil os fiduciais do painel para que a impressora automática pudesse reconhecer e alinhar a lâmina do estêncil com a placa. Fiduciais estes sendo apenas uma marca escura com o mesmo formato do fiducial da placa, não podendo ser vazados. As Tabelas 14, 15 e 16 exibem os valores resultantes no cálculo de volume do estêncil utilizando o modelo apresentado neste trabalho.

Tabela 14 - Dados básicos para projeto do estêncil

Parâmetro	Valor
Espessura da placa (t_b)	1.60 mm
Espessura do estêncil (t_s)	0.178 mm
Distância entre furos (d_{min})	0.350 mm

Tabela 15 - Valores encontrados para cada etapa de cálculo de volume de pasta para cada THC

ID	L_p/D_p	$D_{p_{calc}}$	V_p	D_h	D_{pad}	R_f	r_t	V_h	V_f	V_s	V_{sp}	A_s	Pitch	X_s	Y_s
CN-1	0.50	0.56	0.400	0.80	1.15	0.58	0.28	0.804	0.054	0.512	1.024	5.75	2.00	1.65	3.49
CN-2	0.50	0.56	0.400	0.90	1.25	0.63	0.28	1.018	0.087	0.793	1.585	8.91	2.00	1.65	5.40
DB-1	0.50	0.56	0.400	0.90	1.25	0.63	0.28	1.018	0.087	0.793	1.585	8.91	2.74	2.39	3.73
DB-2	0.50	0.56	0.400	1.00	1.35	0.68	0.28	1.257	0.133	1.122	2.245	12.61	2.74	2.39	5.28
F1	0.60	0.60	0.452	0.90	1.25	0.63	0.30	1.018	0.074	0.714	1.428	8.02	5.08	2.83	2.83
F2	0.60	0.60	0.452	1.00	1.35	0.68	0.30	1.257	0.115	1.034	2.069	11.62	5.08	3.41	3.41

Tabela 16 - Legenda de cada variável no cálculo de volume de pasta de solda

COLUNA	DESCRIÇÃO
ID	Identificação do componente na placa
L_p/D_p [mm]	L_p é o lado da seção transversal quadrada do pino do componente ou o diâmetro (D_p)
$D_{p_{calc}}$ [mm]	Diâmetro do círculo equivalente da seção transversal quadrada do pino
V_p [mm³]	Volume do pino
D_h [mm]	Diâmetro do furo (PTH) - Planejado anteriormente
D_{pad} [mm]	Diâmetro da ilha do PTH - Planejado anteriormente
R_f [mm]	Raio do filete - ($D_{pad}/2$)
r_t [mm]	Raio do pino - $D_p/2$
V_h [mm³]	Volume do furo (PTH)
V_f [mm³]	Volume do filete
V_s [mm³]	Volume de solda total no terminal (contando os dois filetes e dentro do furo, descontando o pino)
V_{sp} [mm³]	Volume de pasta de solda necessário na impressão para gerar V_s após a refusão
A_s [mm²]	Área do furo no estêncil
Pitch [mm]	Distância entre dois terminais na matriz de pinos do conector
X_s [mm]	Menor lado do furo quadrado do estêncil (o máx possível respeitando a dist mín sem curtos - d_{min})
Y_s [mm]	Maior lado do furo quadrado do estêncil (A_s/X_s)

A Figura 47 exibe o projeto do estêncil com os furos (SMDs e PTHs) e fiduciais em verde:

Figura 47 - Projeto do estêncil

O estêncil foi fabricado pela empresa Micropress e sua foto pode ser vista na Figura 48.

Figura 48 - Fotos do estêncil

3.3 Escolha da Pasta de Solda

Muitas ligas diferentes para pasta de solda são utilizadas atualmente. Elas se diferem principalmente pela presença ou não de chumbo, pela composição e proporção de seus elementos, pela quantidade de chumbo e pela granulação o que apresenta no resultado diferenças de características como molhabilidade, temperaturas de fusão, tipos de componentes mais

indicados outras características de soldabilidade. A pasta de solda poderia ser uma ótima variável neste trabalho, principalmente na comparação de desempenho entre as ligas com e sem chumbo, além das outras diferenças mencionadas acima. Mas como foi observado nos artigos sobre Pin-In-Paste e sobre as perspectivas globais do mercado de pasta de solda, as ligas que utilizam chumbo em sua composição terão seu uso cada vez mais restrito pelas leis de cada país, sendo que os mais desenvolvidos, como Japão, EUA e União Européia já proíbem ou restringem largamente o uso deste elemento, o que torna irrelevante um estudo, mesmo que bem sucedido, do processo Pin-In-Paste utilizando ligas de pasta de solda com chumbo.

Estudos mostraram que a força da junção da solda e os mecanismos de falha no processo de PIP são independentes do tipo de pasta escolhida (*water-soluble* ou *no-clean*, que são as mais utilizadas no mercado) [Seeniraj, 1998]. O fluxo mais forte tipicamente utilizado em pastas *water-soluble* não melhora significativamente a força da junção.

Poderia também ser considerada a refusão em ambiente de nitrogênio, que aumenta a molhabilidade da pasta de solda. Mas este tipo de soldagem torna o processo mais caro, por causa da geração do nitrogênio, e é bem pouco utilizado na indústria atualmente.

Optou-se, portanto, por utilizar apenas uma liga de pasta de solda, sem chumbo (*lead-free*). A pasta de solda escolhida foi a *Solder Paste Series F 640*, uma SAC (Sn-Ag-Cu). Por motivos de custo e de viabilidade no próprio trabalho aqui descrito, foi escolhida a liga SAC. Esta é a liga mais utilizada, testada e aceita atualmente no mercado. A Tabela 17 mostra os dados da pasta de solda utilizada:

Tabela 17 - Composição da pasta de solda utilizada no experimento [Heraeus, W. C.]

Propriedade	Especificação
Composição	Sn96.5Ag3Cu0.5
Ponto de fusão	217°C
Tamanho da partícula	25-45 μ m
Densidade	7,4 (g/cc)
Conteúdo metálico	88 % $\pm$ 1
Viscosidade	130 $\pm$ 40 Pas
Quantidade de fluxo	11%

3.4 Impressão

A impressão serigráfica de pasta de solda nas placas será feita por uma impressora automática com lâmina de aço inox. Este equipamento possui regulagem de ângulo de impressão, pressão e velocidade. Foram analisadas as interações entre as variáveis e determinada a melhor combinação, de forma que a deposição fosse a mais otimizada. A análise do volume de pasta transferido foi realizada medindo a altura da pasta impressa em vários componentes THCs diferentes.

3.5 Montagem dos componentes

A montagem dos SMDs foi realizada por uma *Pick & Place* de alta precisão. Logo após a montagem dos SMDs será feita manualmente a inserção dos THCs. A diferença entre montagem manual e automatizada dos THCs em relação ao resultado do processo Pin-In-Paste seria um possível alvo de estudo, mas está fora do escopo deste trabalho. A precisão de posicionamento dos pinos, se centralizado ou não no PTH, não interfere na força da junta da solda de acordo com [Seeniraj, 1998] o que permite montar manualmente os componentes sem comprometer a qualidade da solda final. É praticamente impossível manter a posição do pino no centro do furo devido aos movimentos que a força de tensão superficial da pasta molhada causa nos terminais do componente.

3.6 Análise dos dados

As soldas obtidas nos THCs deverão ter preenchimento de volume mínimo de 75% do PTH. Para avaliar os volumes de cada amostra, serão feitos testes com microscópio ótico, raio-x e também corte metalográfico.

Após cada sequência de montagem será feita uma primeira análise visual utilizando microscópio ótico. Serão analisados os dois lados dos terminais dos componentes, a fim de verificar se há formação de filetes positivos, se a solda aparentemente atingiu o limite mínimo de volume

preenchido, se há sinais de pequenas bolhas, solda fria ou insuficiente e também se existe presença excessiva de fluxo após a soldagem. Com esta primeira análise já é possível verificar se há necessidade de realizar alguma grande alteração de projeto (placa ou estêncil principalmente). Caso as observações realizadas por microscópio sejam bem sucedidas, deverão ser prosseguidas as investigações por raios-X, a fim de se realizar uma análise mais completa do volume de solda obtido e dos defeitos gerados (principalmente *voids*).

A última análise das soldas dos THCs de ambas as sequências será qualitativa, com a utilização de cortes metalográficos de uma pequena amostra de pinos para se analisar o formato da soldas obtidas, suas dimensões, defeitos e outras características internas.

Por fim deverão ser analisadas também as soldas dos SMDs, que terão que atingir os limites mínimos de volume e quantidade aceitável de defeitos.

3.7 Delineamento dos experimentos

Os experimentos a serem delineados neste trabalho deverão seguir um cronograma rígido, a fim de permitir que os resultados obtidos sofram o mínimo de interferências não planejadas para que possam ser analisados e tragam informações relevantes dentro da proposta apresentada.

Os componentes, placas e estêncil fabricados deverão ter algumas dimensões específicas mensuradas para avaliar a conformidade das medidas em relação ao projeto e desvios máximos prometidos pelos fabricantes. A impressão deverá seguir os padrões mais rígidos de controle do ambiente para evitar que a pasta de solda sofra variações relevantes de temperatura ou umidade durante os experimentos, de forma a não inserir variáveis não desejadas nos resultados. A inserção dos componentes também será feita de forma cuidadosa, sendo que os SMDs serão posicionados por uma *Pick & Place* de alta precisão, e os THCs posicionados manualmente.

As análises deverão mostrar quantitativamente e qualitativamente os resultados obtidos, de forma a permitirem o entendimento das variáveis mais relevantes e das mudanças que poderão efetivamente melhorar o processo de PiP.

3.7.1 Avaliação das dimensões

As partes projetadas e posteriormente fabricadas por terceiros (placas e estêncil) e os THCs deverão ser medidos com paquímetro para avaliar se suas dimensões estão dentro dos desvios previstos no projeto, com isso pode-se verificar se existe a necessidade de se fabricar novamente alguma parte ou alterar o fornecedor. Como os SMDs são considerados componentes de alta precisão das dimensões, além de terem um objetivo secundário no projeto, não serão feitas medidas dos encapsulamento utilizados.

3.7.1.1 Caracterização dos THCs

Medir as dimensões dos terminais de uma amostra dos componentes para verificar se estão de acordo com as informações dos fabricantes. As dimensões mais relevantes são o comprimento do terminal e seu diâmetro.

3.7.1.2 Caracterização das PCIs

Medir com paquímetro o diâmetro de uma amostra dos furos finalizados (PTHs) das placas e verificar se as medidas estão de acordo com o determinado pelo fabricante. Cada componente possui dois diâmetros diferentes na placa de teste. Medir também a espessura da PCI para averiguar a concordância com o projeto.

3.7.1.3 Caracterização do estêncil

O estêncil possui duas dimensões que deverão ser medidas para cada PTH, a largura e o comprimento dos furos, para se verificar a concordância com as medidas requeridas. Cada PTH possui dois diâmetros diferentes, e deverão ser medidos todos os furos do estêncil. A espessura do estêncil será considerada de acordo com o valor combinado com o fabricante devido à

grande dificuldade de medição da mesma e por causa da conhecida qualidade e precisão do material usado (folha de inox).

3.8 Impressão (Experimento 1)

O processo de impressão é o mais exigente, já que a configuração da impressora, limpeza das partes envolvidas e atenção ao ambiente no qual a pasta será inserida são de extrema importância para o sucesso do experimento. Será usada a impressora automática Panasonic SP60P Modelo KXF-1D3C (Figura 49).

Figura 49 - Impressora automática Panasonic SP60P Modelo KXF-1D3C

Foram selecionadas três velocidades de impressão (15, 20 e 25 mm/s) e três pressões distintas. O ângulo de impressão foi ajustado em 60°. As suposições iniciais serão feitas baseando-se na literatura e no manual da impressora. Cada impressão de pasta sobre a PCI (ensaio) será caracterizada pela altura medida da pasta de solda para cada PTH diferente, sendo que serão feitos dois ensaios para cada combinação de variáveis. A medida da altura da pasta impressa será feita utilizando o medidor de perfil 3D Vision Master Model 150 da ASC International (Figura 50).

Figura 50 - Medidor de perfil 3D Vision Master Model 150 da ASC International

Com os valores medidos foi determinada a configuração otimizada da impressora para se atingir o melhor volume de pasta de solda. As PCIs foram limpas com álcool isopropílico antes da impressão para remoção de qualquer sujeira provinda da fabricação da PCI.

3.8.1 Programação da Impressora

Para a programação da impressora foi criado um programa contendo os dois fiduciais da placa e do estêncil, a velocidade, pressão e ângulo de impressão otimizados, de acordo com o experimento anterior.

3.8.1.1 Imprimir primeira sequência

Impressão da primeira sequência de placas de teste, sendo que cada placa impressa irá direto para *Pick & Place* sem interferência humana.

3.9 Inserção dos componentes

Os componentes SMDs foram inseridos pela *Pick & Place* Panasonic CN-402 Modelo KXF-4Z4C (Figura 51). Na sequência foram inseridos manualmente os componentes THCs.

Figura 51 - Linha de montagem automatizada de SMDs

3.9.1 Programação da *Pick & Place*

Na programação da *Pick & Place* são ensinadas as coordenadas dos fiduciais e as coordenadas e ângulos de posicionamento dos componentes. A máquina foi alimentada com os seguintes componentes em SMD (Tabela 18):

Tabela 18 - Quantidades de SMDs utilizados no experimento

Encapsulamento	Quantidade usada
Resistor 0402	192
Resistor 0603	192
QFP-44	24

3.9.2 Montagem das PCIs de teste (Experimento 2)

Um lote de 24 placas foi montado totalmente no mesmo dia pela *Pick & Place*. Para cada combinação das três variáveis (entradas), foram feitos dois ensaios. As variáveis analisadas foram a variação do diâmetro do PTH (dois valores para cada furo), o perfil de refusão (um perfil convencional e um otimizado) e o tipo de impressão (impressão simples ou dupla).

3.10 Refusão

O processo de refusão da pasta de solda será feito com um forno profissional com aquecimento por convecção forçada da marca Vitronics que

possui 10 zonas de aquecimento e 3 de resfriamento (Figura 52).

Figura 52 - Forno Vitronics

3.10.1 Traçar perfis do forno com primeiro painel

Duas curvas de perfil de temperatura foram estudadas para analisar se haveria variação na qualidade da solda e no preenchimento dos furos. O primeiro painel montado foi usado na obtenção tais curvas com o traçador. Foram inseridos cinco termopares (capacidade máxima do traçador de perfil) próximos aos terminais dos componentes da placa (QFP-44, barra de pinos, DB-9, Fusível e região com resistores)

Na primeira curva o forno teve suas resistências programadas para imitar ao máximo na placa de teste com componentes o perfil de temperatura indicado pelo fabricante da pasta de solda. A segunda curva, proposta neste trabalho, teve como objetivo uma curva de aquecimento e resfriamento mais linear, sem a formação do patamar no pré-aquecimento, comum aos perfis tradicionais.

3.10.2 Refusão das PCIs

O lote foi montado e as PCIs foram passadas no forno de refusão, uma placa em seguida da outra, de forma a não sobrecarregar o forno. 12 PCIs para cada uma das duas curvas propostas.

3.11 Análise

Após a sequência de montagem, as placas foram analisadas visualmente e por raios-x. A análise por corte metalográfico foi realizada por último, por ser de caráter destrutivo.

3.11.1 Microscópio ótico

Através de um microscópio eletrônico, serão fotografados os perfis de solda obtidos, além dos defeitos visíveis tanto dos THCs quanto dos SMDs. Esta análise já poderá determinar se o processo foi mal sucedido de imediato ou se outras análises serão necessárias para confirmar o bom desempenho do experimento. A Figura 53 mostra o microscópio eletrônico utilizado para fotografar os blocos de solda impressos:

Figura 53 - Microscópio eletrônico

3.11.2 Raios-X

Foi utilizado um equipamento de raios-x para uso odontológico da Dabi Alante modelo Spectro 70XA inspeção por raios-x será determinante na procura por *voids* na solda dos terminais dos THCs. Para a revelação usou-se o Revelador Kodak Ref. 861 0248. Como fixador, após a revelação, utilizou-se o Fixador Kodak Ref. 156 2826.

3.11.3 Corte metalográfico

Foi realizado o corte metalográfico de um THC por placa, o mesmo que anteriormente teve suas soldas fotografadas e radiografadas.

4. Resultados e Discussões

4.1 Experimento Preliminar de Impressão

Foi realizado um experimento prévio de impressão para realizar os primeiros ajustes com pressão e velocidade. Estes ajustes serviram para determinar os valores que serão utilizados posteriormente para gerar a tabela otimizada de parâmetros de impressão. Para esta primeira fase usou-se a pasta de solda lead-free SAC Heraeus (liga Sn 96,5/Ag 3/Cu 0.5, fluxo NC, *mesh size* 325). O experimento foi realizado em ambiente a 22,5°C e 46% de umidade relativa do ar.

A Tabela 19 mostra os parâmetros utilizados em cada uma das impressões realizadas e o que foi observado visualmente. O ângulo de impressão ficou fixo em 60°.

Tabela 19 - Parâmetros de impressão no experimento preliminar

	Pressão [N/mm²]	Velocidade [mm/s]	Observações
1	15	25	Quantidade e formatos quase ideais
2	15	50	Muita pasta
3	15	75	Muita pasta
4	15	100	Muita pasta
5	20	25	Quantidade e formatos quase ideais
6	20	50	Muitas falhas
7	20	75	Muitas falhas
8	20	100	Pouca pasta
9	25	25	Algumas falhas
10	25	50	Muitas falhas
11	25	75	Muitas falhas
12	25	100	Pouca pasta
13	30	25	Quantidade e formatos quase ideais
14	30	50	Quantidade excessiva
15	30	75	Muitas falhas
16	30	100	Pouca pasta

Os resultados iniciais obtidos foram analisados apenas por microscópio ótico. Foram também percebidas algumas dificuldades durante o processo de impressão que foram posteriormente observadas em menor intensidade durante a realização do experimento 1.

Figura 54 - Exemplo de excesso de pasta da solda impressa. Observa-se o excesso de solda gerado na impressão na borda dos volumes de solda.

Na maioria dos componentes observou-se um deslocamento da pasta na parede da solda no lado esquerdo de cada bloco. Tais deslocamentos foram causados por ocorrência de um descolamento em ângulo da PCI em relação ao estêncil, e não vertical como deve ser. Estes deslocamentos podem gerar falhas nas soldas dos componentes como curtos entre terminais, redução dos volumes finais de solda nos SMDs e PTHs, aumento na incidência de *solder bidding* sobre a máscara de solda, deslocamento dos SMDs durante o posicionamento, deslocamento dos SMDs durante a refusão, entre outros. A Figura 55 mostra em duas fotos alguns dos terminais do QFP com suas extremidades levantadas e puxadas para a direita, ilustrando a grande possibilidade de geração de curtos que podem ocorrer após a refusão.

Figura 55 - Extremidades levantadas nos blocos de solda do QFP-44

Na Figura 56a é possível perceber que o deslocamento de pasta na extremidade dos blocos de pasta de solda no QFP ocorria somente nos

terminais que estão na vertical; os blocos na horizontal não exibem, nesta escala da fotografia, qualquer deslocamento. Há ainda expressiva redução do volume de solda impressa nas ilhas na horizontal em comparação com as na vertical. Tal diferença de volume foi reduzida através da otimização de parâmetros de impressão no experimento seguinte. Na mesma foto (Figura 56a) pode-se observar na região A um volume adequado de impressão de pasta, já na região C é verificado, além do deslocamento das extremidades dos blocos, um volume excessivo de pasta, que aumentaria razoavelmente as chances de curtos entre terminais. Em uma foto com maior aproximação (Figura 56b) pode-se ver com mais clareza o deslocamento do bloco nas ilhas da vertical.

Figura 56 - Deslocamentos nos blocos de impressão do QFP-44

Nos THCs o problema de deslocamento também foi observado, como mostram as fotos na Figura 57 (DB-9 e Fusível):

Figura 57 - Deslocamentos dos blocos de pasta de solda em (a) DB-09 e (b) Fusível

Após regulagem de ângulo de descida do estêncil na impressora houve uma grande redução no deslocamento dos blocos. A Figura 58 contém três fotos que mostram os blocos de pasta de solda impressos para os resistores 0402, barra de pinos e fusível:

Figura 58 - Blocos de pasta de solda nos componentes (a) chip 0402 (b) Barra de pinos e (c) Fusível. Nestas fotos, observa-se que o defeito no bloco de solda causado pelo deslocamento do estêncil foi reduzido e que os blocos de solda possuem formatos aceitáveis.

As melhores combinações de parâmetros encontradas nos resultados do experimento preliminar, apresentados na Tabela 16, foram utilizadas para formar a tabela de impressão para o experimento principal de impressão. A variações de velocidade para o experimento 1 foram 15, 20 e 35 mm/s e a pressão variou entre 20, 25 e 30 N/mm². Os resultados obtidos no experimento 1 são apresentados no item 4,2.

4.2 Experimento 1 – Obtenção dos parâmetros de impressão

O Experimento 1 foi realizado em ambiente a 22,0°C e 54% de umidade relativa do ar.

A Tabela 20 mostra todas as combinações usadas, tendo sido realizada réplica para cada combinação. Foi medida a altura para um bloco de pasta de solda diferente para cada THC, totalizando três medidas por ensaio. Os THCs foram escolhidos aleatoriamente para cada painel.

Tabela 20 – Variações nas alturas dos blocos de pasta para cada componente

Ensaio	Impressão	Velocidade [mm/s]	Pressão [$\times 10^{-2}$ N/m ²]	h-DB	h-f	h-BP	Média 1	Média 2	Comentário
1	FR	15	20	0,250	0,250	0,260	0,253	0,251	Visualmente bem uniforme
2	RF	15	20	0,245	0,250	0,250	0,248		Visualmente bem uniforme
3	FR	15	25	0,270	0,250	0,250	0,257	0,252	Uniforme, poucas falhas
4	RF	15	25	0,230	0,250	0,260	0,247		Uniforme, poucas falhas
5	FR	15	30	0,210	0,260	0,260	0,243	0,247	Uniforme, poucas falhas
6	RF	15	30	0,260	0,260	0,230	0,250		Desuniforme
7	FR	25	20	0,270	0,240	0,280	0,263	0,245	Falhas no db
8	RF	25	20	0,240	0,220	0,220	0,227		Falhas no db
9	FR	25	25	0,290	0,280	0,270	0,280	0,273	Um pouco de excesso
10	RF	25	25	0,260	0,290	0,250	0,267		Um pouco de excesso
11	FR	25	30	0,290	0,300	0,240	0,277	0,282	Excesso visível de pasta
12	RF	25	30	0,290	0,290	0,280	0,287		Excesso visível de pasta
13	FR	35	20	0,270	0,300	0,210	0,260	0,293	Excesso visível de pasta
14	RF	35	20	0,350	0,280	0,350	0,327		Excesso visível de pasta
15	FR	35	25	0,240	0,300	0,340	0,293	0,260	Muitas falhas
16	RF	35	25	0,190	0,210	0,280	0,227		Muitas falhas
17	FR	35	30	0,200	0,210	0,230	0,213	0,203	Muitas falhas
18	RF	35	30	0,180	0,190	0,210	0,193		Muitas falhas

Onde:

RF é a impressão com o rodo traseiro, indo de trás para a frente da impressora;

FR é a impressão com o rodo dianteiro, indo da frente para a parte de trás da impressora;

h-BP é a altura da pasta na ilha da barra de pinos;

h-DB é a altura da pasta na ilha do DB-9 e

h-F é a altura da pasta na ilha do fusível.

Média 1 é o valor médio entre os três componentes diferentes do mesmo ensaio

Média 2 é o valor médio obtido da Média 1 para os dois ensaios repetidos

Após avaliação das alturas pelo medidor de altura e dos formatos dos blocos de pasta de solda por microscópio, foi verificado que a melhor combinação de impressão para esta PCI seria (Tabela 21):

4.3 Impressão e montagem dos componentes

O Experimento 2 consistiu na impressão, montagem e refusão dos componentes e foi realizado em ambiente a 21°C e 61% de umidade relativa do ar, dentro das especificações do fabricante da pasta de solda.

Tabela 21 - Parâmetros utilizados na impressora no Experimento 1

Parâmetro	Valor
Velocidade [mm/s]	15
Pressão [$\times 10^{-2}$ N]	25
Down Speed [mm/s]	05

Os mesmos parâmetros utilizados para impressão simples, mostrados na Tabela 21 foram usados para impressão dupla. A Figura 59 mostra a parte inferior da PCI logo após a impressão nos casos de impressão simples e impressão dupla. Pode-se observar blocos de pasta de solda saindo pelo furo, sendo que no caso de impressão dupla há uma quantidade maior de pasta sendo expulsa pelo PTH.

Figura 59 - Fotografias do excesso de pasta de solda saindo da parte inferior dos PTHs após a impressão nos casos de impressão simples e impressão dupla

Foi encontrado dificuldade em montar o DB-09, pois o furo do pino guia teve sua dimensão projetada com o mesmo diâmetro nominal do próprio pino, dificultando a inserção do componente. Como o pino é dividido em duas partes, com um corte no meio para gerar uma pressão (efeito mola) nas paredes do PTH e aumentar a estabilidade mecânica, optou-se por apertar com um alicate

as duas partes do pino, reduzindo sua força de inserção do componente. Mesmo assim ainda foi difícil inserir alguns DB-09, o que pode ter gerado defeitos como expulsão de pasta do furo ou deslocamento dos blocos. A Figura 60 mostra um DB-09 sendo inserido e uma PCI de teste totalmente montada.

Figura 60 – Montagem dos componentes (a) montagem manual do DB-09 e (b) PCI com todos os componentes montados

4.4 Perfis do forno de refusão

Dois perfis de refusão foram utilizados no processo térmico da montagem das PCIs de teste utilizando o sistema apresentado na Figura 62.

Figura 61 - Sistema de medição de temperatura do forno com traçador de perfil isolado termicamente e PCI com termopares

O primeiro perfil (identificado neste trabalho como R1) teve como modelo o perfil indicado pelo fabricante [Heraeus, W. C] e o resultado obtido pode ser visto na Figura 62.

Figura 62 - Perfil de refusão convencional (R1) da PCI de teste com as curvas de temperatura para cada canal e as temperaturas configuradas em cada zona do forno

O perfil otimizado tem como objetivo a redução na geração de defeitos de solda através de um pré-aquecimento linear (Ning-Cheng Lee, 2000). A Figura 63 mostra o perfil otimizado (R2) obtido com a PCI de teste. O equipamento de gravação da temperatura (Solderstar) apresentou falhas durante a operação na obtenção de R2, e a curva final obtida exibiu alguns ruídos que podem ter influenciado nas medidas. Não se pode alcançar totalmente o objetivo de um pré-aquecimento linear, já que quanto mais se aproximava de uma reta, mais se afastava as temperaturas medidas em cada canal. Um patamar antes da refusão, parecido ao que se utiliza na curva

convencional, se mostrou necessário para que não houvesse uma diferença maior que 10°C entre as diferentes regiões medidas.

Figura 63 - Perfil de refusão otimizado (R2) da PCI de teste com as curvas de temperatura para cada canal e as temperaturas configuradas em cada zona do forno

4.5 Análise das soldas obtidas

Após a refusão, as soldas obtidas nos THCs e SMDs foram analisadas utilizando microscópio ótico, raio X e corte metalográfico (os dois últimos apenas para os THCs). As soldas THTs foram comparadas com a norma IPC-A-610C *Acceptability Of Electronic Assemblies* para placas Classe 2, que descreve a aceitabilidade de volume da solda de componentes das tecnologias PTH e SMT. Esta norma determina que, para a Classe 2, os componentes

convencionais deverão ter no mínimo 75% de seus furos metalizados preenchidos com pasta de solda totalmente refundida e em contato tanto com o terminal do componente quanto com a parede do PTH.

A primeira análise foi visual utilizando microscópio ótico. Foram analisados os dois lados dos terminais dos componentes, a fim de verificar se há formação de filetes positivos, se a solda aparentemente atingiu o limite mínimo de volume preenchido, se há sinais de pequenas bolhas, solda fria ou insuficiente e também se existe presença excessiva de fluxo após a soldagem.

O fusível foi o componente com os melhores resultados na análise visual, com formação de filete nos lados inferior e superior para todas as placas analisadas. Um exemplo de solda obtida para o fusível, no lado inferior, pode ser visto na Figura 64.

Figura 64 - Exemplo de solda obtida no lado inferior de um fusível

Para os DB-09, houve um índice de falhas maior, com alguns casos de ausência de filete positivo e excesso de solda nas pontas dos terminais do componente, o que foi atribuído à expulsão da pasta de solda durante a inserção. Durante a inserção manual, como os furos para os terminais de guia estavam muito apertados, houve a necessidade de uma pressão maior para que os terminais entrassem totalmente nos furos, o que causou um deslocamento muito rápido de volume de pasta de solda que havia dentro dos furos. Como boa parte da solda ficou na ponta dos terminais, após refusão, apenas uma parte retornou ao furo, sendo que o resto caiu no túnel do forno. A Figura 65 exhibe a parte inferior de um DB-09 soldado, com problemas de junção sem a formação de filete e excesso de solda nas pontas dos terminais.

Figura 65 - Exemplo de solda da parte inferior de um DB-09. Neste exemplo aparecem as principais falhas para esse componente, o excesso de solda na ponta do terminal e a ausência de filete positivo

Mesmo com a dificuldade de inserção dos conectores DB-09, houve alguns casos para este componente de solda completa, com formação de filetes positivos nos lados inferior e superior do PTH conforme mostra a Figura 66. Estes casos foram encontrados em maior quantidade nas placas soldadas com a Refusão 2.

Figura 66 - Exemplo de solda com formação de filete positivo em ambos os lados para um DB-09

No caso das barras de pinos, em quase todos os casos houve formação excessiva de filetes, tanto no lado inferior quanto no lado superior dos PTHs. Tal defeito é relacionado ao excesso de pasta de solda impressa sobre os furos. Um exemplo de solda para a barra de pinos pode ser visto na Figura 67.

Figura 67 - Exemplo de solda para uma Barra de Pinos. A foto mostra excesso de filete em ambos os lados do PTH

Os outros defeitos encontrados nas soldas das barras de pinos foram presença de *solder beads* nas laterais do encapsulamento e excesso de fluxo não evaporado tanto na solda quanto ao redor dos filetes. Ambos os defeitos são diretamente ligados ao excesso de pasta de solda impressa para estes componentes. A Figura 68a mostra um defeito de solda (três *solder beads*) e a Figura 68b mostra um exemplo de defeito cosmético, uma grande quantidade de fluxo residual pós refusão:

(a)

(b)

Figura 68 - Exemplos de solder beading (a) e excesso de fluxo não evaporado (b) na solda da barra de pinos

A análise foi seguida por imagens de raios-X, afim de se realizar um estudo mais completo do volume de solda obtido e dos defeitos gerados (principalmente *voids* nos PTHs e *beadings* sob os encapsulamentos dos terminais). A Figura 69 mostra exemplos de defeitos encontrados nas barras de

pinos: *void* no filete inferior, excesso de solda sob o encapsulamento e filete com volume excessivo:

Figura 69 - Exemplos de defeitos encontrados por raios x nas barras de pinos

A análise por raio-x pode mostrar também a soldabilidade nos terminais do DB-09. A Figura 70 mostra um exemplo de solda com baixa molhabilidade (solda fria) no lado superior do PTH e um DB-09 com soldagem correta dos terminais e formação de filetes adequados nos lados superior e inferior.

Figura 70 - Exemplos de resultados obtidos via análise por raios x dos conectores DB-09

Foi possível perceber pelas radiografias a principal falha nas soldagens dos fusíveis, os solder beads. Como o encapsulamento fica muito próximo da superfície da PCI, a formação dos beads ocorre sob o corpo do componente, é difícil em alguns casos identificar se houve formação de solder beads, mas tornam-se facilmente visíveis na radiografia, como mostra a Figura 71.

Figura 71 - Solda de um fusível com um *solder bead* abaixo do encapsulamento

A última análise das soldas dos THC's de ambas as sequências foi através de cortes metalográficos de uma amostra de pinos de um THC para cada placa que se produziu, a fim de se analisar o formato da soldas obtidas, suas dimensões, defeitos e outras características internas.

Figura 72 - Exemplo de solda ideal (preenchimento de 100% do PTH e formação de filetes positivos em ambos os lados) para os três THC's utilizados: DB-09, Barra de Pinos e Fusível

Os próximos itens apresentam uma análise mais completa sobre os resultados para cada THC usado, avaliando as variações na solda obtida para cada combinação das variáveis aplicadas neste trabalho: Dimensão do PTH, tipo de impressão (simples ou dupla) e tipo de refusão (convencional ou otimizada).

4.5.1 Fusível

Os resultados de solda obtidos nos fusíveis foram os mais próximos do projetado, com 100% das amostras com preenchimento completo de solda no PTH (Volume de solda igual a 100%). Houve também em todos os casos a formação de filetes. O defeito mais comum encontrado foi o *solder beading*, que foi identificado com facilidade nas amostras que foram radiografadas (Tabela 25). Nas amostras não radiografadas, a identificação visual foi possível em apenas uma parte dos fusíveis, sendo que na outra parte não é possível precisar se havia ou não este defeito devido à proximidade do encapsulamento com a PCI. As Tabelas 19 e 20 mostram os resultados obtidos para R1 e R2, respectivamente, de volume de solda, defeitos, defeitos cosméticos (para os furos D1 e D2) de todas as amostras de fusível.

Tabela 22 - Resultados do Experimento 2 (Fusível) Para Refusão 1

Diâmetro PTH	D1			D2		
Ensaio	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos
SP-1	100	0	1	100	1	2
SP-2	100	1	2	100	1	1
SP-3	100	0	0	100	0	2
SP-4	100	1	1	100	0	1
SP-5	100	0	1	100	0	2
SP-6	100	0	2	100	1	3
DP-1	100	0	3	100	0	2
DP-2	100	1	2	100	0	2
DP-3	100	1	2	100	1	4
DP-4	100	0	3	100	1	4
DP-5	100	1	3	100	1	1
DP-6	100	0	2	100	0	3

Tabela 23 - Resultados do Experimento 2 (Fusível) Para Refusão 2

Diâmetro PTH	D1			D2		
Ensaio	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos
SP-1	100	0	1	100	0	1
SP-2	100	1	0	100	1	2
SP-3	100	0	1	100	0	0
SP-4	100	0	1	100	0	1
SP-5	100	1	0	100	1	1
SP-6	100	0	0	100	0	0
DP-1	100	0	2	100	0	1
DP-2	100	1	1	100	0	2
DP-3	100	0	1	100	0	1
DP-4	100	0	2	100	0	2
DP-5	100	1	3	100	0	1
DP-6	100	1	1	100	1	3

Os resultados das duas tabelas anteriores foram resumidos na Tabela 24, de forma a apresentar percentualmente os totais de defeitos para cada combinação das variáveis Impressão (Impr. - SP para *single print* e DP para *double print*), Refusão (Ref. – R1 para refusão convencional e R2 para refusão otimizada) e Diâmetro (Diâm. - D1 para diâmetro menor e D2 para diâmetro maior).

Tabela 24 - Defeitos e defeitos cosméticos para os fusíveis

Impr.	Ref.	Diâm.	Total Defeitos	% Defeitos	Total D. Cosméticos	% D. Cosméticos	75% ≤ V < 100%	% (75% ≤ V < 100%)	V = 100%	% (V = 100%)
SP	R1	D1	2	10,53	7	9,09	0	0,00	6	12,50
SP	R1	D2	3	15,79	11	14,29	0	0,00	6	12,50
SP	R2	D1	2	10,53	3	3,90	0	0,00	6	12,50
SP	R2	D2	2	10,53	5	6,49	0	0,00	6	12,50
DP	R1	D1	3	15,79	15	19,48	0	0,00	6	12,50
DP	R1	D2	3	15,79	16	20,78	0	0,00	6	12,50
DP	R2	D1	3	15,79	10	12,99	0	0,00	6	12,50
DP	R2	D2	1	5,26	10	12,99	0	0,00	6	12,50
Total			19	100,00	77	100,00	0	0,00	48	100,00

A Tabela 25 mostra fotos tiradas dos componentes que tiveram suas análises também realizadas por corte metalográfico e por raios-x. São feitos comentários a respeito de volume de solda e presença de defeitos para cada componente.

Tabela 25 - Resultados de microscopia, raios-x e corte metalográfico dos fusíveis.

Placa	Foto	RaioX	Corte
R1SP1F2
	Filete ideal. Excesso de fluxo nas pontas dos terminais	Pequeno <i>bead</i> perto do terminal à esquerda	Boa formação de filetes nos dois terminais e preenchimento de 100% do furo
R1SP6F1
	Formação completa de filete. Excesso de fluxo	Pequeno <i>bead</i> perto do terminal esquerdo	Formação completa dos filetes. Pequeno <i>void</i> à esquerda. Preenchimento superior à 90%.
R1DP2F1
	Formação ideal de filetes nos lados superior e inferior	<i>Beads</i> na parte superior	Formação completa de filete e preenchimento de 100%
R1DP4F2
	Formação ideal de filete nas partes superior e inferior	Pequeno <i>bead</i> próximo ao terminal esquerdo	Boa formação de filetes e preenchimento de 100%. Um pouco de excesso na ponta inferior dos terminais
R2SP5F1
	Filetes ideais em ambos os lados	Dois <i>beads</i> próximos ao terminal direito	Pequeno <i>void</i> . Preenchimento superior a 80%

R2DP2F1
	Boa formação de filetes em ambos os lados	Quatro pequenos <i>beads</i> sob o componente	Boa formação de filetes e preenchimento de 100%
R2DP4F2
	Boa formação de filetes em ambos os lados. <i>Bead</i> perceptível próximo ao terminal direito	<i>Bead</i> próximo ao terminal direito	Boa formação de filetes em ambos os lados e 100% de preenchimento

4.5.2 Barra de pinos

O conector do tipo barra de pinos apresentou volume de solda superior a 75% para todos os terminais analisados, mas teve uma alta taxa de defeitos e defeitos cosméticos. As Tabelas 23 e 24 mostram os resultados de volume e defeitos para R1 e R2, respectivamente.

Tabela 26 - Resultados do Experimento 2 (Barra de pinos) Para Refusão 1

Diâmetro PTH	D1			D2		
	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos
SP-1	≥75	0	2	100	1	1
SP-2	100	1	1	100	2	1
SP-3	100	2	0	100	0	2
SP-4	100	0	0	≥75	2	1
SP-5	≥75	0	1	100	0	0
SP-6	100	0	1	100	1	1
DP-1	100	1	2	100	0	2
DP-2	≥75	0	3	100	1	3
DP-3	100	3	1	100	1	2
DP-4	100	1	1	≥75	3	1
DP-5	≥75	0	2	100	2	4
DP-6	≥75	1	1	100	3	2

Tabela 27 - Resultados do Experimento 2 (Barra de pinos) Para Refusão 2

Diâmetro PTH		D1		D2		
Ensaio	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos
SP-1	≥75	0	2	≥75	0	1
SP-2	100	1	1	100	0	2
SP-3	100	3	0	100	1	2
SP-4	100	2	0	100	0	3
SP-5	100	0	0	≥75	0	1
SP-6	≥75	0	1	100	3	1
DP-1	100	0	2	100	0	2
DP-2	100	1	2	100	0	3
DP-3	100	2	3	100	2	4
DP-4	100	0	3	100	0	3
DP-5	100	1	2	100	0	2
DP-6	100	0	2	100	3	3

A Tabela 28 mostra os defeitos e volumes alcançados para todas as amostras analisadas, e apresenta na primeira combinação (impressão simples, refusão convencional e diâmetro menor) o melhor resultado em termo de taxa de defeitos em comparação com o total. Os melhores índices de volume com 100% de preenchimento ocorreram nas placas impressas com dupla impressão.

Tabela 28 - Defeitos e defeitos cosméticos para as barras de pinos

Impr.	Ref.	Diâm.	Total Defeitos	% Defeitos	Total D. Cosméticos	% D. Cosméticos	75% ≤ V < 100%	% (75% ≤ V < 100%)	V = 100%	% (V = 100%)
SP	R1	D1	3	6,82	5	6,25	2,00	4,17	4,00	8,33
SP	R1	D2	6	13,64	6	7,50	1,00	2,08	5,00	10,42
SP	R2	D1	6	13,64	4	5,00	2,00	4,17	4,00	8,33
SP	R2	D2	4	9,09	10	12,50	2,00	4,17	4,00	8,33
DP	R1	D1	6	13,64	10	12,50	3,00	6,25	3,00	6,25
DP	R1	D2	10	22,73	14	17,50	1,00	2,08	5,00	10,42
DP	R2	D1	4	9,09	14	17,50	0,00	0,00	6,00	12,50
DP	R2	D2	5	11,36	17	21,25	0,00	0,00	6,00	12,50
Total			44	100,00	80	100,00	11,00	22,92	37,00	77,08

A Tabela 29 mostra fotos tiradas das barras de pinos que tiveram suas análises também realizadas por corte metalográfico e por raios-x. São feitos

comentários a respeito de volume de solda e presença de defeitos para cada componente.

Tabela 29 - Comparação dos resultados de microscópio, raios-x e corte metalográfico das amostras de barras de pinos

Placa	Foto	RaioX	Corte
R1SP2CN 2
	Excesso de solda nos filetes de todos os terminais	Sem sinais de defeitos	Pequenos voids. Preenchimento interno superior a 90%
R1DP1CN 1
	Excesso de solda no lado inferior na maioria dos terminais. Formação de um <i>beading</i> grande no lado superior próximo aos quatro furos que	Visível excesso de solda em vários terminais	Formação de filete em ambos os lados. Pequenos voids em alguns furos. Preenchimento superior a 90%
R1DP5CN 2
	Excesso de solda nos lados inferior e superior	Muita solda no lado superior	Pequenos <i>beadings</i> no furo. Preenchimento acima de 90%
R1DP6CN 1
	Excesso nos filetes no lado inferior	Excesso nos filetes no lado inferior	Pequenos voids. Muita solda no lado inferior. Preenchimento superior a 90%

R2SP3CN 2
	Excesso de solda no filete inferior	Excesso de solda no filete inferior	Formação de filetes em ambos os lados. Filetes com muita solda na parte inferior. Preenchimento de 100%
R2SP4CN 1
	Excesso de solda nos filetes inferiores	Voids em dois dos filetes inferiores	Excesso de solda nos filetes inferiores. Preenchimento de 100%
R2SP6CN 2
	Formação de três grandes <i>beadings</i> . Excesso de fluxo		Formação de <i>voids</i> . Preenchimento superior a 75%
R2DP6CN 2
	Formação de grandes <i>beadings</i>	Vários <i>beadings</i>	Excesso de solda nos filetes inferiores. Preenchimento de 100%

4.5.3 DB-09

O conector do tipo DB-09 apresentou volume de solda superior a 75% para todos os terminais analisados, mas teve uma alta taxa de defeitos e defeitos cosméticos. As Tabelas 27 e 28 mostram os resultados de volume e defeitos para R1 e R2, respectivamente.

Tabela 30 - Resultados do Experimento 2 (DB-09) Para Refusão 1

Diâmetro PTH		D1		D2		
Ensaio	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos
SP-1	≥75	3	0	100	1	0
SP-2	100	2	0	≥75	2	1
SP-3	≥75	2	1	100	2	1
SP-4	≥75	2	1	≥75	1	1
SP-5	100	1	0	100	2	0
SP-6	≥75	2	2	≥75	3	2
DP-1	100	0	2	100	1	3
DP-2	100	1	1	≥75	3	2
DP-3	≥75	1	1	≥75	1	5
DP-4	≥75	2	3	100	2	4
DP-5	≥75	2	2	100	1	4
DP-6	100	1	2	100	1	3

Tabela 31 - Resultados do Experimento 2 (DB-09) Para Refusão 2

Diâmetro PTH		D1		D2		
Ensaio	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos	Volume de solda	Defeitos	D. Cosméticos
SP-1	100	4	2	≥75	3	3
SP-2	≥75	3	2	≥75	2	2
SP-3	≥75	2	1	≥75	3	2
SP-4	100	2	0	100	1	0
SP-5	100	1	2	100	2	1
SP-6	100	2	1	≥75	3	2
DP-1	≥75	2	2	100	2	4
DP-2	100	1	4	≥75	3	2
DP-3	≥75	1	4	≥75	1	3
DP-4	≥75	3	2	100	2	4
DP-5	100	2	2	≥75	2	3
DP-6	100	2	3	≥75	1	3

A Tabela 32 mostra os defeitos e volumes alcançados para todas as amostras de DB-09 analisadas, e apresenta na quinta combinação (impressão dupla, refusão convencional e diâmetro menor) o melhor resultado em termo de taxa de defeitos em comparação com o total.

Tabela 32 - Defeitos e defeitos cosméticos para os DB-09

Impr.	Ref.	Diâm.	Total Defeitos	% Defeitos	Total D. Cosméticos	% D. Cosméticos	75% $\leq V < 100\%$	% (75% $\leq V < 100\%$)	V = 100%	% (V = 100%)
SP	R1	D1	12	13,48	4	4,21	4,00	8,33	2,00	4,17
SP	R1	D2	11	12,36	5	5,26	3,00	6,25	3,00	6,25
SP	R2	D1	14	15,73	8	8,42	2,00	4,17	4,00	8,33
SP	R2	D2	14	15,73	10	10,53	4,00	8,33	2,00	4,17
DP	R1	D1	7	7,87	11	11,58	3,00	6,25	3,00	6,25
DP	R1	D2	9	10,11	21	22,11	2,00	4,17	4,00	8,33
DP	R2	D1	11	12,36	17	17,89	3,00	6,25	3,00	6,25
DP	R2	D2	11	12,36	19	20,00	4,00	8,33	2,00	4,17
Total			89	100,00	95	100,00	25,00	52,08	23,00	47,92

A Tabela 33 mostra fotos tiradas dos conectores DB-09 que tiveram suas análises também realizadas por corte metalográfico e por raios-x. São feitos comentários a respeito de volume de solda e presença de defeitos para cada componente.

Tabela 33 - Comparação dos resultados de microscópio, raios-x e corte metalográfico das amostras de DB-09

Placa	Foto	RaioX	Corte
R1SP3DB1
	Sem formação de filetes na parte inferior do terminal. Baixa molhabilidade e excesso de solda na parte superior.		Baixa molhabilidade no lado superior da PCI e alguns voids. Preenchimento de pelo menos 75% do furos.
R1SP4DB1
	Baixa molhabilidade nos terminais no lado superior	Baixa molhabilidade nos terminais no lado superior	Baixa molhabilidade. Pequenos voids. Excesso na ponta do terminal.

R1SP5DB2				Formação de filete no lado inferior e excesso com baixa molhabilidade no lado superior	-	Formação de filete mas com excesso na ponta do terminal no lado inferior. Presença de pequenos voids. Preenchimento superior a 80%
R1DP3DB2				Falhas visuais no preenchimento pelo lado inferior e excesso com baixa molhabilidade no lado superior	Baixa molhabilidade no lado superior	Presença de voids e preenchimento superior a 75%
R2SP1DB1				Boa formação de filetes nos lados inferior e superior.	Preenchimento e filetes ideais.	Boa molhabilidade e formação de filetes em ambos os lados. Excesso de solda no lado superior, mas aceitável. Pequenos voids. Preenchimento superior a 90%
R2SP2DB2				Baixa molhabilidade em apenas uma fileira de terminais no lado superior. Formação de filetes no lado inferior	Baixa molhabilidade em apenas uma fileira de terminais no lado superior.	Formação de filete em ambos os lados, mas com excesso no lado superior. Pequenos voids. Preenchimento superior a 90%
R2DP1DB1

	Formação de filetes m ambos os lados, mas com excesso no lado superior		Excesso nos filetes do lado superior. Pequenos voids. Preenchimento superior a 80%
R2DP1DB1
	Boa formação de filetes em ambos os lados	Boa formação de filetes em ambos os lados	Boa formação de filetes em ambos os lados e 100% de preenchimento
R2DP5DB1
	Formação de filetes em ambos os lados, mas com excesso no lado superior	Excesso nos filetes do lado superior	Pequeno voids e excesso nos filetes superiores. Preenchimento superior a 90%

4.5.4 SMDs

Para se concluir se o processo de refusão com PIP atingiu os objetivos, foram analisadas também as soldas dos SMDs, que deveriam também atingir os limites mínimos de volume e presença de defeitos descritos pela norma IPC 610C para placas Classe 2. Tal análise foi realizada apenas por microscópio ótico, sendo que a falha mais encontrada foi excesso de fluxo, causado por uma quantidade de pasta impressa um pouco superior ao necessário. Tal quantidade superior não causou excesso de solda em nenhum dos SMDs. Houve sim falta de solda nos QFP-44, que, por erro de projeto, tiveram suas ilhas com dimensões maiores que o afirmado em norma IPC. Devido a tal erro de dimensão da ilha, a pasta de solda teve mais espaço para se espalhar, molhando toda a ilha e empobrecendo os filetes de solda nos terminais do QFP-44. Foi observado também uma baixa molhabilidade da solda nos terminais do QFP-44, que pode ser justificada por terminais levemente oxidados devido ao tempo excessivo de armazenamento. A Tabela 34 exhibe

fotos das soldas do QFP-44 e chips 0402 e 0603 para os dois perfis de refusão e os dois tipos de impressão:

Tabela 34 - Imagens de microscópio de seleção dos SMDs para cada variação de PCI

Impr.		QFP-44	R0402	R0603
R1	SP
		Pouca solda e baixa molhabilidade nos terminais	Solda ideal	Solda ideal. Excesso de fluxo.
	DP
		Solda aceitável	Solda ideal	Solda ideal
R2	SP
		Pouca solda	Solda ideal. Excesso de fluxo	Solda ideal. Excesso de fluxo
	DP
		Pouca solda e baixa molhabilidade nos terminais	Solda ideal	Solda ideal. Excesso de fluxo

4.5.5 Considerações finais sobre o PIP

O *Pin In Paste* se mostrou um processo bastante viável neste projeto dentro da perspectiva de preenchimento do PTH, que é a maior restrição para uso massivo comentada na literatura. Como neste trabalho houve uma impressão de pasta de solda excessiva devido a problemas de ajustes com a impressora automática, em nenhuma amostra encontrou-se uma solda com menos de 75% de preenchimento do PTH, parâmetro utilizado neste trabalho para avaliar se a solda possui volume mínimo aceitável ou não. A quantidade de solda na verdade se mostrou excessiva em todos os casos, o que gerou defeitos relacionados a excesso de pasta impressa como muito fluxo residual sobre a solda e ao redor do PTH, solda na ponta do terminal do THC que foi empurrado pela mesma e não conseguiu voltar ao furo durante a refusão, e principalmente *solder beadings*.

Figura 73 - Quantidade de defeitos medidos para cada combinação de variáveis

Figura 74 - Quantidade de defeitos cosméticos encontrados para cada combinação de variáveis

Não houve variação na ocorrência de defeitos totais nem defeitos cosméticos em comparação entre os dois tipos de refusão, conforme a Figura 75 mostra.

Figura 75 - Variação de defeitos e defeitos cosméticos para cada tipo de refusão

Em relação à geração total de defeitos nas soldas comparadas entre os tipos de impressão (única e dupla), encontrou-se uma quantidade muito próxima de defeitos entre os dois grupos (8,2% de geração de defeitos a mais para impressão simples). Mas a diferença na geração de defeitos cosméticos

mostrou-se 123,1% superior na dupla impressão (DP), mostrando que o excesso de pasta de solda foi o maior causador dos defeitos cosméticos.

Figura 76 - Variação de defeitos e defeitos cosméticos para cada tipo de impressão

Na comparação da geração total de erros ao variar o tamanho do diâmetro do PTH, observa-se que os defeitos gerados são 62,2% superiores para o diâmetro menor (D1) em comparação com o diâmetro maior (D2). No caminho oposto, o aumento do furo acrescentou em 33,3% a quantidade de defeitos cosméticos nas amostras.

Figura 77 - Variação de defeitos e defeitos cosméticos para cada diâmetro de furo utilizado

Pôde-se perceber nos gráficos anteriores que houve um comportamento oposto de geração de defeitos em comparação com os defeitos cosméticos. Tal comportamento deveria ser inverso, já que ambos os tipos de defeitos deveriam aumentar nas combinações das variáveis que fossem menos eficientes para a obtenção de soldas corretas. Novos estudos com mais valores para cada variável deverão ser realizados para compreender melhor a geração de defeitos e defeitos cosméticos quando se altera a dimensão do PTH, o tipo de refusão ou a impressão. Para melhorar a qualidade dos dados adquiridos, seria necessário um estudo com um número maior de diâmetros diferentes para o PTH, além de se obter as curvas de refusão com maior precisão e utilizar um sistema de impressão automático com maior confiabilidade.

5. Conclusões

Neste trabalho foram estudadas e implementadas as etapas de processo envolvidas na tecnologia *Pin-in-Paste* (PIP) de soldagem por refusão de componentes convencionais (THCs - *Through Hole Components* ou Componentes de Furo Passante) em placas de circuito impresso (PCIs), utilizando pasta de solda sem chumbo (*lead-free*) com liga SAC (Sn-Ag-Cu).

O trabalho consistiu primeiramente no projeto da PCI de teste com três THCs diferentes e três encapsulamentos de SMD distintos. Para cada THC foram gerados dois diâmetros de furos diferentes, para estudo da variação de preenchimento com solda no PTH e geração de defeitos e defeitos cosméticos. Foi proposta uma equação para cálculo do volume de pasta de solda a ser impresso sobre os PTHs e com esta foi projetado e fabricado um estêncil.

O Experimento 1 consistiu na obtenção dos melhores parâmetros de impressão com a variação de pressão e velocidade. Para os valores de altura de pasta impressa medidos que mais se aproximavam da altura real do estêncil, não foi possível obter impressões uniformes em toda a PCI. Portanto foi necessário usar uma combinação de pressão ($\times 10^{-2}$ N/m²) e velocidade (15 mm/s) do rodo que permitisse uma impressão mais uniforme possível em toda a placa, mesmo obtendo valores de altura medidos nos blocos de solda bem altos, 0,252 mm (da ordem de 41,60% a mais de solda).

O Experimento 2 se baseou na montagem e refusão dos componentes utilizando duas curvas de refusão distintas, uma convencional e a segunda otimizada, proposta neste trabalho. A segunda curva não mostrou diferenças na geração de defeitos nem de defeitos cosméticos.

A variação do método de impressão mostrou que para impressão simples a geração de defeitos foi 8,2% maior que para a impressão dupla. Num comportamento oposto, a geração de defeitos cosméticos foi 123,1% superior para a impressão dupla.

Os defeitos gerados para o diâmetro menor (D1) são 62,2% superiores em comparação com o diâmetro maior (D2). Novamente com comportamento oposto o aumento do furo acrescentou em 33,3% a quantidade de defeitos cosméticos nas amostras.

Baseando nos resultados e no desenvolvimento do presente trabalho novos estudos podem ser feitos com objetivo de encontrar um modelo padrão para o processo de montagem pin in paste. Neste contexto os parâmetros de processo que necessitam ser estudados e otimizados são: alteração dos parâmetros de impressão, ajustes no forno de refusão, maior quantidade de diâmetros estudados, utilização de *solder preforms*, utilização de *step-stencil*, modificação de projeto da PCI (como dimensões dos furos ou acabamento), utilização de atmosfera em N₂.

REFERÊNCIAS

American Academy of Pediatrics; Committee on Environmental Health; Lead Exposure in Children: Prevention, Detection, and Management: <http://pediatrics.aappublications.org/content/116/4/1036.full> (Último acesso realizado em 22/04/11)

Assembly Sciences and Technology, Cisco Systems - Investigation for Use of 'Pin in Paste'

Barbini, Denis; Wang, Paul; Implementing Lead-Free Wave Soldering - Higher levels of copper and iron can change the alloy and require new guidelines, Printed Circuit Design & Manufacture, May 2005

Coleman William E., Jean, Denis, IL, Julie, Stencil Design for Mixed Technology Through-hole/SMT Placement and Reflow SMT Net, Volume 2, Issue No. 3, March, 2000

Coombs, Clyde F.; Printed Circuits Handbook; Fifth Edition, McGraw-Hill, 2001

Demirtas, Atilim; Pin in paste stencil design for notebook mainboard, Global SMT & Packaging, N° 39, February 2008

Dongkai, Shangguan; Lead-Free Soldering and Environmental Compliance: An Overview, Flextronics International, 2005

FCI; Pin In Paste Application Guide; 2008

Ganesan, Sanka; Pecht, Michael; Lead- free Electronics, IEEE Press, 2006.

Micropress, www.micropress.com.br , (Último acesso realizado em 10/08/2011)

Subbarayan, G., Priore.R., Koep, P., Lewin, S., Raut, R., Sethuraman, S. “ Investigation for Use of Pin in Paste Reflow Process with Combination of Solder

Preforms to Eliminate Wave Soldering”, Artigo submetido ao evento *International Printed Cicuits APEX*, Las Vegas, Apr 2011

Hinerman, Jay B; Srihari, K; Westbt, George R; *The Pin-in-Paste (or AART) Processes for Odd Form and Through Hole Printed Circuit Boards*, Universal Instruments Corporation.

Hwang, Jennie S; *Lead-free Reliability for Harsh-environment Electronics* — SMT Magazine May, 2007.

iNEMI *Roadmap; International Electronics Manufacturing Initiative*, 2004.

IPC 2221 - *Generic Standard on Printed Board Design*

IPC 2222 - Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards, Fevereiro de 1998.

IPC-7525 – Stencil Design Guidelines

IPC-7526 - Stencil and Misprinted Board Cleaning Handbook

IPC-A-610C - Acceptability Of Electronic Assemblies

IPC-A-610C PO - *Aceitabilidade de Montagens Eletrônicas*.

IPC-SM-782A - SMD Design and Land Pattern

Mihály, Janóczki; László, Jakab, (2010) "X-ray solder alloy volume measurement (XSVM) in pin-in-paste technology (PIP)", *Soldering & Surface Mount Technology*, Vol. 22 Iss: 1, pp.26 - 40

Jensen, Tim; Lasky, Ronald C.; *Electronics Assembly: Practical Tips for implementing the Pin-in-Paste Process*, Assembly Magazine, February 2003

Heraeus, W. C.; Application Recommendation Solder Paste Series F640 V 10-05

IPC J-STD-001; *Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies*

Lau, John H.; Wong C.P.; Lee, Ning Cheng, Lee; S. W. Ricky; Electronics manufacturing with lead-free, halogen-free, and conductive-adhesive materials, McGraw-Hill, 2003.

Lee, Ning-Cheng; Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies, Newnes, 2002.

Littelfuse – Pin in Paste Application Note

Manko, H, H., “Soldering Handbook for Printed Circuits and Surface Mounting”, Vanostrand Reinhold, New York, New York, 1995

Mendes, Luis Tadeu Freire; Estudo experimental da migração eletroquímica em soldagem eletrônica Sn/Ag/Cu “Lead Free”, 2009.

Ning-Cheng Lee, *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies*, Newnes, 2000.

Pfluke, Karl; Short, Richard H; *Eliminate Lead-free Wave Soldering*, SMT Magazine June, 2005.

Preforms to Eliminate Wave Soldering

Reflow Process with Combination of Solder

Seeniraj R., Manassis D., e Westby G. R., A Comprehensive Evaluation Of The

Strength Of AART Solder Joints, 1998 IEEE/CPMT Int'l Electronics Manufacturing Technology Symposium

Sprovieri, John; 01005s and Lead-Free Solder, Assembly Magazine; May 1, 2006.

Tonapi, Sandeep. S.; Srihari K.; *Implementation of the pin-in-paste process in a contract manufacturing environment*, International Journal of Production Research, Volume 38, Issue 17, November 2000 , pages 4535 – 4553.

Wassink, K., "Soldering in Electronics", Second Edition, Electrochemical Publications, Ayr, Scotland, 1989.

X-ray Solder Alloy Volume Measurement (XSVM) in Pin-in-Paste Technology (PIP)