

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

TIAGO DE FREITAS MACHADO

**Análise de fluxos de solda e o impacto no processo de
soldagem de esferas em encapsulamento do tipo BGA**

São Leopoldo, RS

2016

Tiago de Freitas Machado

Análise de fluxos de solda e o impacto no processo de soldagem de esferas em encapsulamento do tipo BGA

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Willyan Hasenkamp
Coorientador:
Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod

São Leopoldo, RS

2016

M149a Machado, Tiago de Freitas.

Análise de fluxos de solda e o impacto no processo de soldagem de esferas em encapsulamento do tipo BGA/ Tiago de Freitas Machado.
- 2016.

87 p. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade do Vale do Rio dos Sinos,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,2016.

"Orientador: Prof. Dr. Willyan Hasenkamp; coorientador: Prof. Dr.
Eduardo Luis Rhod."

1. Engenharia elétrica. 2. Soldagem. 3. Solda e soldagem.
I. Título

CDU 621.3

Tiago de Freitas Machado

Análise de fluxos de solda e o impacto no processo de soldagem de esferas em encapsulamento do tipo BGA

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 15 de Setembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Tatiana Louise Avila de Campos
Rocha – UNISINOS
Avaliador

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes –
UNISINOS
Avaliador Externo

Prof. Dr. Willyan Hasenkamp (Orientador)
Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod (Coorientador)

Visto e permitida a impressão
São Leopoldo, RS

Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod
Coordenador PPG em Engenharia Elétrica

“Dedico este trabalho aos meus pais que trabalharam incansavelmente para me educar e me deram a oportunidade de alcançar mais este degrau.

Agradecimentos

Agradeço aos meus familiares que me apoiaram e incentivaram durante este trabalho, principalmente a esposa Suzana Caroline Belotto.

Meus agradecimentos à empresa HT-Micron e à Universidade do Vale do Rio dos Sinos por me proporcionarem, via PADIS - Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Indústria de Semicondutores, a bolsa de estudos que me incentivou a iniciar este mestrado e forneceu os meios necessários para que atingisse meus objetivos.

Agradeço imensamente aos membros do instituto ITT-Chip da Unisinos Celso Peter, Elcio Kondo e todo time de apoio.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Unisinos em especial a Professora Tatiana Louise de Campos Ávila Rocha.

Aos Membros da banca examinadora e professores da Unisinos pelas valiosas contribuições à conclusão deste trabalho e desta etapa de aprendizado.

Aos profissionais da HT Micron Semicondutores que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa. Especialmente aos colegas Marcio Strake, Fabiano Souza e Marnio Cerqueira.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”
(Theodore Roosevelt)

Resumo

O processo de soldagem de esferas em componentes do tipo esferas organizadas em matriz do inglês *BGA*, *ball grid array* é crítico para o encapsulamento de semicondutores pois uma falha pode gerar rejeitos e retrabalhos indesejáveis ao desempenho da produção.

O processo atual da empresa de encapsulamentos analisada apresentou, de forma acumulada, entre os meses de janeiro a junho de 2015 uma taxa de 1220 defeitos por milhão de unidades produzidas, relacionadas ao modo de falha denominado tamanho da esfera com o código SB003. Matérias primas alternativas para aplicação em processo de soldagem de esferas em encapsulamento de semicondutores de diferentes fabricantes, podem apresentar melhor desempenho com relação a esta ocorrência.

A redução das perdas de material e de defeitos no processo de soldagem de esferas é essencial para que uma empresa de encapsulamento de semicondutores se mantenha competitiva financeiramente no mercado tanto nacional quanto internacional.

O objetivo deste trabalho foi avaliar através de análises de laboratório e aplicações práticas, quatro opções de fluxos de solda solúveis ou parcialmente solúveis em água. Foram comparadas as características de viscosidade, índice de acidez, pH e perda de massa através de *TGA* do inglês *thermogravimetric analysis*, aprimorando o conhecimento intrínseco sobre este material e seu comportamento nesta etapa.

Foi analisado o impacto dos diferentes fluxos de solda no desempenho da soldagem, realizando a observação da ação do fluxo em um forno de refusão e a habilidade de realinhar esferas de solda fora de posição que impactam na redução da ocorrência de defeitos. Obteve-se como resultado o fluxo A com melhor performance para realinhamento, 9,58% das esferas foram reposicionadas, perda de massa gradual e menos abrupta que os demais.

Palavras-chaves: Soldagem de esferas. Fluxo de solda. BGA. Encapsulamento.

Abstract

The process of soldering spheres in ball grid array components, called *BGA*, is critical to the semiconductor packaging, because one failure can generate rejects and undisable reworks to production performance.

The current process of the packaging company analyzed presented, in accumulated form, between the months of January and June of 2015 the defect rate of 1220 defects per million of produced units, related to the failure mode denominated ball size with the code SB003. Alternative raw material for solder sphere process applied to semiconductor packaging of different manufacturer could show better performance related to these occurrence.

The reduction of material waste and defects reduction in the soldering spheres process is essential to keep a semiconductor packaging company competitive financially both in the national and international market.

The objective was to evaluate through laboratory analysis and practical applications four options of soldering flux water and non-water soluble. Characteristics were compared of viscosity, acidity level, pH and mass loss through thermogravimetric analysis *TGA* improving the intrinsic knowledge about this material and its behavior in the step.

The impact was analyzed of different solder flux performance on soldering, performing observation of the flux action on the reflow oven and the ability to realign the solder spheres misplaced that impact on the reduction of the occurrence of defects. It was obtained as result the flux A with better performance of realignment, 9.58% of misplaced spheres were repositioned, present gradual mass loss and less abrupt than the others.

Key-words: Sphere soldering. Solder flux. BGA. Packaging.

Lista de figuras

Figura 1 – Previsão de mercado e exemplo de componentes BGA	23
Figura 2 – Pareto de defeitos (jan. a junho de 2015)	26
Figura 3 – Resultado da aplicação com diferentes percentuais de metal e mesma formulação de fluxo.	32
Figura 4 – Resultados da força de cisalhamento.	33
Figura 5 – Resultado da força de arrancamento das esferas em amostras de CuOSP. . .	33
Figura 6 – Pads SMD e NSMD com base na IPC 9708	34
Figura 7 – Amostras dos fluxos em <i>pad</i> OSP após a refusão.	35
Figura 8 – Perda de massa entre Fluxo A e B.	36
Figura 9 – Perda de massa entre Fluxo C e D.	37
Figura 10 – Fluxo A antes e depois da refusão.	38
Figura 11 – Fluxo B antes e depois da refusão.	38
Figura 12 – Fluxo C antes e depois da refusão.	39
Figura 13 – Fluxo D antes e depois da refusão.	39
Figura 14 – Fluxo A com esferas oxidadas antes e depois do reflow.	40
Figura 15 – Fluxo B com esferas oxidadas antes e depois do reflow.	40
Figura 16 – Fluxo C com esferas oxidadas antes e depois do reflow.	41
Figura 17 – Fluxo D com esferas oxidadas antes e depois do reflow.	41
Figura 18 – Média e variação da força de cisalhamento em forma gráfica.	42
Figura 19 – Seção transversal da esfera de solda.	43
Figura 20 – Modelo do ensaio utilizando elementos finitos com 8 nós.	44
Figura 21 – Efeito da variação da velocidade na força de cisalhamento.	45
Figura 22 – Efeito da variação da altura de choque na força de cisalhamento.	45
Figura 23 – Identificação e flexibilidade do PCB	47
Figura 24 – Apresentação das esferas de solda.	48
Figura 25 – TGA para análise de perda de massa.	49
Figura 26 – Máquina de aplicação de fluxo e esferas.	50
Figura 27 – Ilustração da ferramenta de pinos.	50
Figura 28 – Passos da aplicação de fluxo.	51
Figura 29 – Forno de refusão para soldagem dos substratos.	52
Figura 30 – Lavadora de substratos.	52
Figura 31 – Nordson Dage Serie 4000 para ensaios mecânicos	53
Figura 32 – Microscópio Binocular Óptico para inspeção visual	54
Figura 33 – Registros da elaboração das misturas	56
Figura 34 – pHmetro Digimed DM-22	57
Figura 35 – Reômetro Anton Paar - MCR 102	58

Figura 36 – Exemplo de posicionamento da ferramenta de testes	60
Figura 37 – Comparativo da viscosidade em forma gráfica	64
Figura 38 – Termogravimetria Fluxo A em atmosfera de ar sintético	66
Figura 39 – Termogravimetria Fluxo A em atmosfera de nitrogênio.	67
Figura 40 – Termogravimetria Fluxo B em atmosfera de ar sintético.	68
Figura 41 – Termogravimetria Fluxo B em atmosfera de nitrogênio.	69
Figura 42 – Termogravimetria Fluxo C em atmosfera de ar sintético.	70
Figura 43 – Termogravimetria Fluxo C em atmosfera de nitrogênio.	71
Figura 44 – Termogravimetria Fluxo D em atmosfera (a) de ar sintético e (b) de Nitrogênio	71
Figura 45 – Sobreposição TGA em atmosfera ar sintético.	72
Figura 46 – Sobreposição TGA em atmosfera de nitrogênio.	73
Figura 47 – Aspecto visual das esferas de solda posicionadas corretamente	75
Figura 48 – Evidências encontradas com Fluxo A	76
Figura 49 – Evidências encontradas com Fluxo B	77
Figura 50 – Evidências encontradas com Fluxo D	78
Figura 51 – Boxplot comparativo da força de arrancamento ente A, B e D	79
Figura 52 – Boxplot e dispersão da força de arrancamento entre A e B	80
Figura 53 – Histograma combinado com <i>boxplot</i>	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Taxa de falhas em defeitos por milhão no processo de soldagem de esferas. . .	25
Tabela 2 – Levantamento bibliográfico sobre o tema abordado	27
Tabela 3 – Ácidos orgânicos em ordem decrescente de acidez	30
Tabela 4 – Propriedades básicas dos fluxos viscosos	35
Tabela 5 – Média das forças de arrancamento e variação entre diferentes fluxos	42
Tabela 6 – Configurações com altura do choque bloqueada e variação da velocidade . . .	44
Tabela 7 – Configurações com velocidade fixa e variação da altura do choque	44
Tabela 8 – Proporções de fluxo pastoso e fluxo líquido	56
Tabela 9 – Fabricantes de Esferas e Fluxo de Solda	61
Tabela 10 – Fabricantes escolhidos para realização dos testes	62
Tabela 11 – Comparação de custo simplificada	63
Tabela 12 – Resultados da análise de pH	63
Tabela 13 – Comparativo de viscosidades	65
Tabela 14 – Comparativo do número de acidez	65
Tabela 15 – Tabela de perdas de massa nos TGA's	73
Tabela 16 – Avaliação da refusão	74
Tabela 17 – Resultado da soldagem de PCB's com esferas desalinhasdas	76
Tabela 18 – Percentual de realinhamento	78
Tabela 19 – Resumo das avaliações	81

Lista de abreviaturas e siglas

CAGR	Compound Annual Growth rate
Cu-OSP	Copper with Organic Solderability Preservative
DRAM	Dynamic random access memory
ENIG	Electroless nickel immersion gold
Imm Sn	Immersion Tin
LED	Light Emitting Diode
SMD	Solder mask defined
NSMD	Non solder mask defined
OSP	Organic Solderability Preservative
PCB	Printed circuit board
PN	Part Number
Pop	Package-on-package
SAC305	Sn(Tin9 6,5%), Ag(Silver 3%), Cu(Copper 0,5%)
SB003	Solder Ball 003
SoP	Solder on Pad
SMT	Surface mounted technology
BGA	Ball Grid Array
TGA	Thermogravimetric analysis
FR-4	Flame retardant 4

Sumário

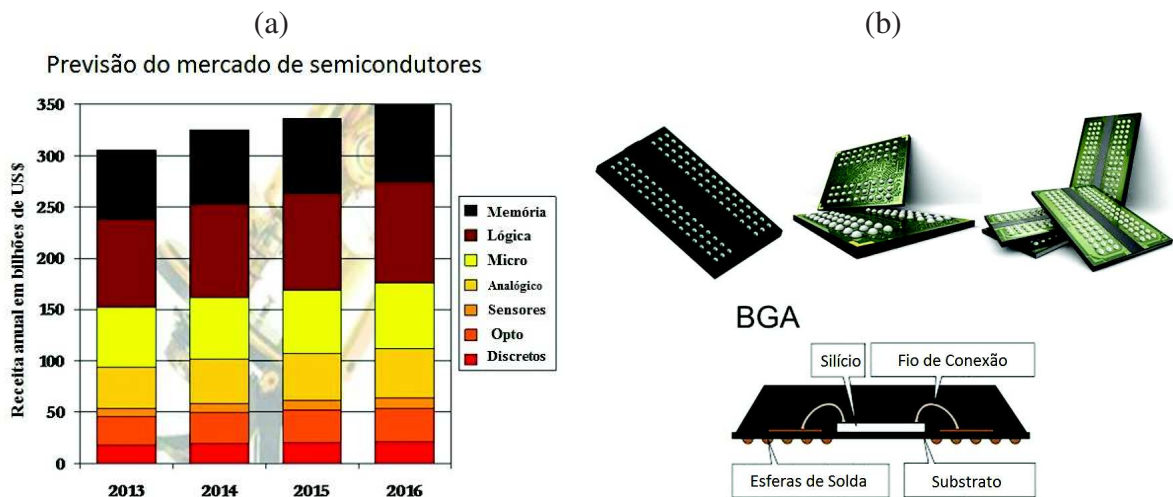
1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Delimitação do Tema ou Problema	25
1.2	Delimitações do Trabalho	26
1.3	Objetivos	26
1.3.1	Objetivo Geral	26
1.3.2	Objetivos Específicos	27
1.4	Justificativa	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	Materiais Envolvidos	29
2.2	Posicionamento e deposição de esferas	31
2.3	Resultados em trabalhos semelhantes	34
3	MATERIAIS, FERRAMENTAS E MÉTODOS	47
3.1	Materiais	47
3.1.1	PCB - Substrato	47
3.1.2	Esferas de solda	47
3.1.3	Fluxo de Solda	48
3.1.4	Relatório de fornecedores de semicondutores	49
3.2	Ferramentas	49
3.2.1	Instrumentos de laboratório	49
3.2.2	Máquina de aplicação de fluxo e esferas	50
3.2.3	Forno de refusão	51
3.2.4	Lavadora de placas	52
3.2.5	Máquina de ensaios mecânicos	53
3.2.6	Microscópio óptico binocular para inspeção	54
3.2.7	Software Estatístico	54
3.3	Métodos	54
3.3.1	Seleção de fluxos	54
3.3.1.1	<i>Preparação dos Fluxos C e D</i>	55
3.3.2	Análise das características técnicas	56
3.3.2.1	<i>Medição do pH</i>	56
3.3.2.2	<i>Viscosidade</i>	57
3.3.2.3	<i>Número de acidez</i>	58
3.3.2.4	<i>Termogravimetria</i>	58
3.3.3	Comparação de custo	59

3.3.4	Testes de produção	59
3.3.4.1	<i>Aplicação de Fluxo</i>	59
3.3.4.2	<i>Refusão e lavagem</i>	59
3.3.4.3	<i>Avaliação do desempenho do fluxo para o deslocamento no posicionamento das esferas de solda</i>	59
3.3.4.4	<i>Avaliação do teste de cisalhamento</i>	60
4	RESULTADOS	61
4.1	Levantamento dos fornecedores	61
4.2	Comparação de custo simplificada	62
4.3	Análises das características dos materiais	63
4.3.1	Medição do pH	63
4.3.2	Viscosidade	64
4.3.3	Número de acidez	65
4.3.4	Termogravimetria	66
4.4	Resultado dos testes de produção	74
4.4.1	Refusão - Inspeção visual	74
4.4.2	Perfomance para realinhamento das esferas	75
4.4.3	Teste de cisalhamento	79
5	CONCLUSÃO	83
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	Índice	87

1 Introdução

O mercado de componentes eletrônicos no mundo movimentou no ano de 2015 o equivalente a 340 bilhões de dólares com previsão de 350 bilhões em 2016 segundo Dyke e Chou (2016) da organização não governamental mundial de estatísticas de mercado de semicondutores WSTS, do inglês *World semiconductor trade statistics* e mostrado no gráfico (a) da figura 1. Aproximadamente 100 bilhões de dólares apenas em memórias predominantemente com encapsulamento BGA, do inglês *Ball grid array* conforme exemplificado no item (b) da figura 1. Este volume estimado em 1995 era de menos de 20 milhões de dólares citado por Vardaman, Crowley e Goodman (1995) da empresa Techsearch International Inc. que atua no mercado desde 1987, demonstrando o crescimento deste mercado nos últimos 20 anos.

Figura 1 – Previsão de mercado e exemplo de componentes BGA



Fonte: Traduzido de Dyke e Chou (2016) e Micron.com

Dentre os componentes eletrônicos, segundo Vardaman, Crowley e Goodman (1995) os de maior tecnologia e valor agregado são os dispositivos semicondutores, onde milhares de circuitos são fabricados em lâminas de silício. Nestes dispositivos, posteriormente são realizadas as interconexões utilizando fios de ouro, cobre ou mesmo malhas metálicas, do inglês *lead frame*, com substratos de resina e fibra de vidro. Este processo é chamado de encapsulamento. Vardaman, Crowley e Goodman (1995) também concluíram em sua publicação que os tipos de encapsulamentos existentes são os mais variados, guiados pelas inovações tecnológicas e criação de novos processos possibilitando mais velocidade de processamento interno bem como aumento de portas de entradas e saída, do inglês *input/output, I/O*, redução do consumo de energia e tamanho físico nos mais diferentes formatos de acordo com sua aplicação.

O processo de soldagem de esferas SBA, do inglês *solder ball attach* em um encapsulamento do tipo matriz de esferas BGA é o objeto de estudo deste trabalho por ser um produto

atualmente em fabricação no Brasil e com grande mercado. Os componentes BGA se tornaram populares na década de 90 segundo Vardaman, Crowley e Goodman (1995) e ganharam força na indústria com a crescente demanda por componentes menores e distância entre conexões reduzidas, do inglês *fine pitch*, possibilitando o maior aproveitamento da área de montagem das placas de circuito impresso PCB, do inglês *printed circuit board* que utilizam a tecnologia de montagem de superfície SMT, do inglês *surface mounted technology*.

Durante o processo de encapsulamento de componentes BGA, a etapa de soldagem de esferas impacta diretamente no rendimento da produção, este fator é medido comparando-se a quantidade de matéria-prima inserida no início do ciclo produtivo para transformação de uma quantidade final definida. Este fator de rendimento, do inglês *Yield*, é calculado dividindo-se a quantidade de produto final no encerramento do ciclo produtivo pelo tamanho do lote inicial em forma de matéria prima percentualmente conforme demonstra a equação 1.1 adaptada de Cunningham (1990) considerando os retrabalhos durante o processo. O tempo de ciclo, do inglês *Cycle time*, torna-se outro indicador afetado diretamente pela ocorrência dos defeitos, de forma simplificada é medido como o tempo total gasto do início ao fim de todas etapas do processo de encapsulamento. Os retrabalhos são demorados, complexos e aumentam o *cycle time* como detalhado por Wein (1992) em seu artigo. Para melhorar o rendimento deste processo em seu artigo Sy, Hsu e Jimarez (2007) mencionou que foram testadas durante os anos novas tecnologias como impressão com fluxo de solda, transferência por pino, variações de formulações por fabricantes de fluxo e melhorias nos acabamentos das ilhas de solda, do inglês *pad*, por fornecedores de placas de circuito impresso.

$$Yield = (Q) \times (\%G) + (Q) \times (1 - \%G) \times (\%R) \quad (1.1)$$

Onde:

Q = Quantidade total de peças do lote.

$\%G$ = Percentual peças boas produzidas.

$\%R$ = Percentual de peças defeituosas retrabalhadas.

Ryu et al. (2008) em seu trabalho afirmou que o processo mais popular e comumente utilizado é a aplicação de um fluxo de solda viscoso com transferência por meio de pinos aos *pads* do substrato. Mesmo desta forma este processo ocasiona problemas de perda de esferas, esferas conectadas e pontes, impactando o rendimento do processo. Por este motivo a avaliação de diferentes composições de fluxo de solda e esferas é de fundamental importância para melhoria do rendimento do processo de soldagem tanto no âmbito produtivo como econômico visto que são utilizadas matérias primas importadas de tecnologia estrangeira.

1.1 Delimitação do Tema ou Problema

As empresas de encapsulamento dentro do seu processo para componentes do tipo BGA estabelecem metas agressivas para cada estágio a fim de atingir e manter o nível de qualidade esperado pelo mercado de eletro-eletrônicos tanto no Brasil quanto no restante do mundo. Para manterem-se competitivas no mercado o maior aproveitamento de cada matéria prima é indispensável e influencia diretamente nas metas de processo. Para que o processo de encapsulamento se mantenha competitivo, é necessário trabalhar constantemente para atingir uma meta de 99,9% de eficiência total.

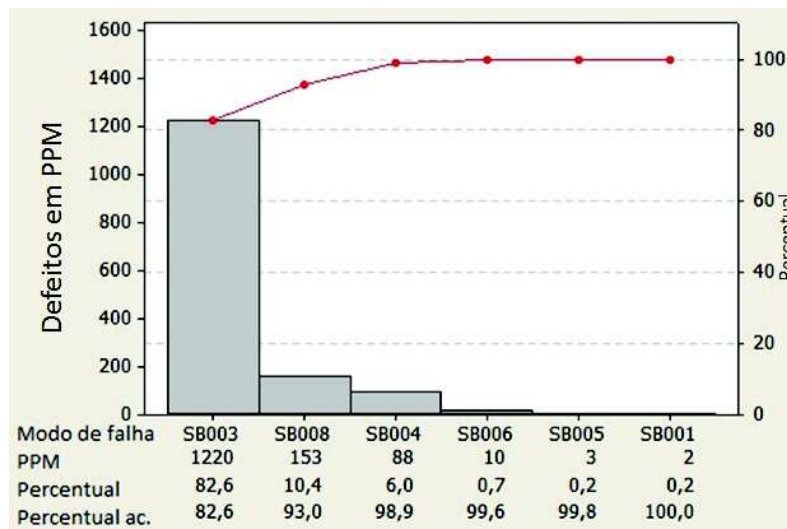
Observa-se na tabela 1 a grande variação do desempenho mês a mês o que demonstra que existem variáveis desconhecidas que devem ser corrigidas através da melhoria contínua dos processos. A Figura 2 mostra que existe um modo de falha predominante aqui categorizado como *SB003* que inclui das falhas ocorridas por tamanho da esfera do inglês *ball size* que será o foco do trabalho de redução visando convergir para um processo estável e confiável onde as variáveis são conhecidas. Entre elas podemos citar os materiais empregados na soldagem como fluxo de solda e esferas. Como proposta a avaliação de diferentes fornecedores de fluxo de solda com formulações mais modernas poderão manter a empresa dentro do cenário de evolução e atualização dos seus processos produtivos contribuindo para sua competitividade no mercado Brasileiro.

Tabela 1 – Taxa de falhas em defeitos por milhão no processo de soldagem de esferas.

Tipos de falhas	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Junho	Jan-Jun
SB001 - Solda frágil - Solder BST (Ball shear test)	5	5	0	4	1	0	2
SB003 - Tamanho - Ball size	3152	2332	756	108	41	698	1220
SB004 - Falta - Missing ball	34	44	223	94	101	87	88
SB005 - Ponte - Bridge ball	0	0	0	21	2	1	3
SB006 - Descoloração - Ball discolor	43	0	0	0	2	1	10
SB008 - Mancha na PCB - PCB FM	452	157	62	27	33	81	153

Fonte: Dept. de Qualidade da empresa visitada - Ano base 2015.

Figura 2 – Pareto de defeitos (jan. a junho de 2015)



Fonte: Dept. de Qualidade da empresa visitada - Ano base 2015.

1.2 Delimitações do Trabalho

Este trabalho consiste na avaliação de potenciais alterações em materiais aplicáveis no processo de SBA, em uma linha de produção de componentes com encapsulamento BGA, utilizados neste caso, primordialmente, para aplicação de circuitos integrados memória DRAM *Dynamic random access memory* com esferas de 0,45mm e um *pitch* de 0,8mm, comumente aplicados em projetos que utilizam tecnologia de montagem em superfície. Este processo é de grande importância no cenário atual das empresas de tecnologia que utilizando materiais importados de alto custo e negociados em dólar. A delimitação deste trabalho se concentra na pesquisa de alternativas viáveis de fluxo de solda e com menor custo para o processo de SBA excluindo variações nos processos adjacentes como moldagem e forno de refusão e modos de falha como empenamento. Os materiais analisados serão comparados com o mesmo ajuste de máquina, ferramental e parâmetros do processo.

1.3 Objetivos

Os objetivos se dividem em geral com a identificação de melhorias possíveis para o processo de soldagem de esferas e específicos que possibilitarão tais identificações.

1.3.1 Objetivo Geral

Identificar as opções viáveis de materiais disponíveis no mercado e avaliar estatisticamente os resultados dos testes para o processo de soldagem de esferas (SBA);

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) identificar os fornecedores de insumos para SBA atuantes no mercado nacional, se concentrando nas grandes marcas.
- b) analisar através da documentação disponível dos fabricantes sua composição química, métodos de aplicação possíveis, características de armazenamento, acondicionamento e prazo de validade;
- c) Comparar simplificadamente o custo do material, importação e logística através de cotações dos materiais propostos juntamente com o departamento de compras;
- d) analisar, em laboratório, as características técnicas dos materiais propostos;
- e) propor uma metodologia de testes a fim de ser possível inferir a influência dos materiais testados nos modos de falha do processo.

1.4 Justificativa

A justificativa para este trabalho apresenta-se unindo os fatores mais relevantes para uma organização: qualidade, custo e agilidade de entrega. As alternativas para os materiais e novas técnicas no processo de SBA possibilitam a redução do custo do material utilizado, melhoria do rendimento fabril, redução de perdas e de tempo gasto com retrabalhos ou ajustes de máquina.

Há também a carência na produção científica para este tema no âmbito nacional como observado pelo levantamento bibliográfico realizado nos principais portais com publicações científicas apresentado na Tabela 2.

As publicações relevantes foram identificadas através da leitura sumária dos títulos verificando se o assunto é similar no tema deste trabalho. Obteve-se nos Periódicos da CAPES apenas o trabalho de HISERT e MACKIE (2007) relevante ao tema deste trabalho pois também comparou tipos de fluxos utilizando *PCBs* em resina FR-4 assim como nesta proposta.

Tabela 2 – Levantamento bibliográfico sobre o tema abordado

Abrangência	Palavras associadas	IEEE	Science Direct	Google Scholar	Capes
Inglês	BGA Solder	1153	1002	36700	1671
	BGA Solder Ball	1047	850	32000	672
	BGA Solder Ball Attach	113	373	18600	27
	BGA Solder Ball Attach Flux	15	135	5730	6
	Relevantes	3	>10	>10	1

Fonte: Produzido pelo autor

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos para evolução do trabalho com base em artigos sobre o tema citando:

- Materiais Envolvidos
- Posicionamento e deposição de esferas
- Resultados em trabalhos semelhantes

2.1 Materiais Envolvidos

Barber (1937) citou em seu artigo que durante o processo de soldagem, o fluxo de solda age como promotor da limpeza dos *pads*. Também classificou pela primeira vez os fluxos quanto a composição química, aplicações e com propósito prático conforme abaixo:

1. **Salino**, tais como cloreto de zinco, amônia, cálcio, magnésio, alumínio e outros metais. Soluções de um ou mais destes sais são popularmente conhecidos como ácidos;
2. **Ácido carboxílico** tais como esteárico, oleico, palmítico, benzóico, tartárico, furóico, ftálico e ácidos orgânicos similares;
3. **Base orgânica fraca**, como anilina, uréia, etileno, diamina, acetamina e outras animas ou amidos;
4. **Resinas**.

Ainda segundo (BARBER, 1937) o fluxo é o agente que promove ou acelera a zona líquida no material em fusão tendo como função garantir o contato entre os metais brutos para formação de ligas. Em 1937 o mecanismo da reação do fluxo não era completamente entendido e sua teoria ainda teria muito a avançar. Segundo Barber (1937), os fluxos de composição salina e ácida de classe 1 possuem resíduos que por sua característica higroscópica facilitam a remoção com água quente ou em forma de vapor, por outro lado têm tendência de absorver umidade do ar aumentando seu volume total se dispersando distantes do ponto original de aplicação, por este motivo montagens eletrônicas que são testadas satisfatoriamente quando novas irão mostrar vazamento de corrente quando acondicionadas ou em uso pela absorção de umidade pelo resíduo do fluxo deixado após a soldagem.

Barber (1937) ainda explica que fluxos da classe 2 tem como exemplo o ácido carboxílico, são orgânicos e se decompõem, volatilizam e sublimam ou carbonizam dependendo do tempo e

temperatura da aplicação da solda. São efetivos em uma curta zona de temperatura e precisam de uma variação para obter uma movimentação da solda.

Na classe 3 segundo Barber (1937) tem-se como representantes as aminas, amidos e bases orgânicas fracas que são mais ativas que fluxos baseados em ceras e graxas, menos estáveis, volatilizam e decompõem-se mais rapidamente. São aplicadas para restringir o metal fundido a um ponto específico do inglês *spot work*. Limitam a corrosão, mas não são higroscópicos, dificultando a remoção dos resíduos embora os mesmos sejam volatilizados e carbonizados. Os fluxos de classe 4 são constituídos por resinas não corrosivas e geram resíduos não condutivos, não retém detritos após a soldagem e são menos ativos e, conseqüentemente, menos efetivos como agente de fluxo, seus valores principais estão nas características singulares dos resíduos.

Uma teoria que avançou de acordo com Barber (1937) foi de que o fluxo de solda diminui a tensão superficial da solda fundida (ou líquida) o que seria uma definição visto que a liquidez ou "molhagem" é um fenômeno relacionado a tensão superficial mas não explica a ação de limpeza da superfície dos metais. O argumento de que o fluxo de solda dissolve os óxidos aparentemente não cobre todos os fatos. No trabalho realizado por Barber (1937) fica evidente através da Tabela 3 que a comparação entre a constante de dissociação e atividade do fluxo não são diretamente relacionadas, concluindo que é mais importante que os elementos constituintes da formulação devem ser obrigatoriamente livres dos grupos oxidantes.

Tabela 3 – Ácidos orgânicos em ordem decrescente de acidez.

Ácidos	Constante de dissociação	Atividade do fluxo
Tricloroacético	$2,0 \times 10^{-1}$	Muito pobre
Oxálico	$3,0 \times 10^{-2}$	Boa
Maleico	$1,5 \times 10^{-2}$	Boa
Ftálico	$1,2 \times 10^{-2}$	Boa
Tartárico	$1,0 \times 10^{-2}$	Boa
Salicílico	$1,0 \times 10^{-3}$	Boa
Cítrico	$8,0 \times 10^{-4}$	Boa
Monocloroacético	$1,5 \times 10^{-4}$	Pobre
Sulfanílico	$6,0 \times 10^{-4}$	Muito Pobre
Múico	$6,0 \times 10^{-4}$	Boa
Lático	$1,4 \times 10^{-4}$	Boa
Benzoico	$6,0 \times 10^{-5}$	Boa
Succínico	$6,0 \times 10^{-5}$	Boa
Bórico	$6,0 \times 10^{-10}$	Pobre
Carbólico	$6,0 \times 10^{-10}$	Pobre
Quinólico	$1,0 \times 10^{-10}$	Pobre

Fonte: (BARBER, 1937)

Concluindo, Barber (1937) afirma que a teoria que melhor explica a ação do fluxo, dependendo da sua atividade, é que primeiramente ocorre a penetração do filme de óxido e conseqüente ataque do metal bruto, liberando pequenas quantidades de hidrogênio ou vapores redutores que previnem o aumento da oxidação (desde que os agentes oxidantes não estejam

presentes no fluxo). É improvável que o fluxo dissolva a maioria dos óxidos, o mais provável é que o fluxo molhe, suspenda e coagule os óxidos liberados pela penetração e ação redutora.

2.2 Posicionamento e deposição de esferas

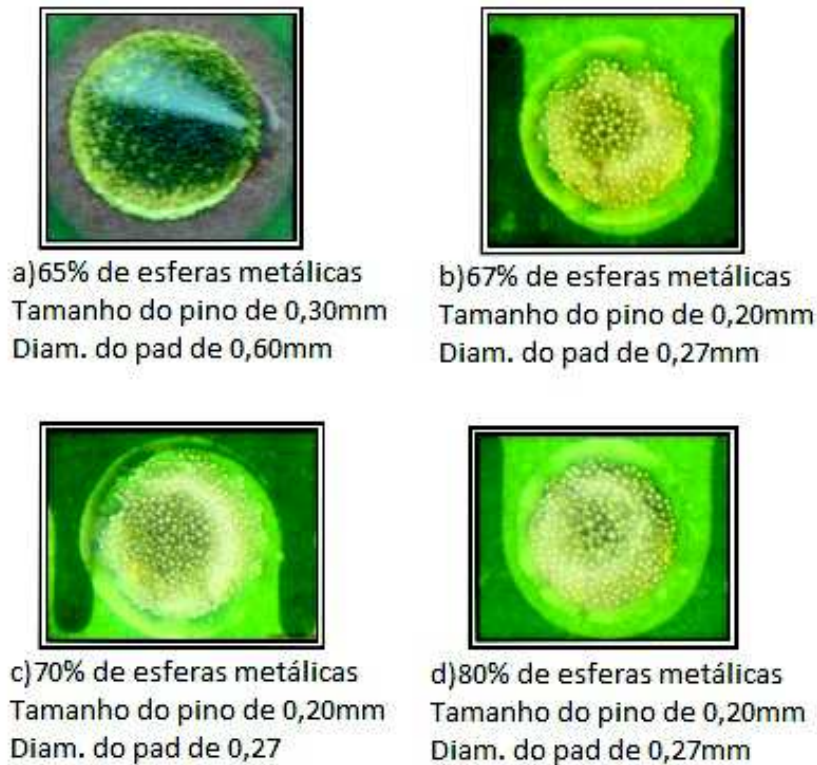
Sy, Hsu e Jimarez (2007) citam que a aplicação de fluxo de solda em um processo de soldagem de esferas no início dos anos 90 era feita através da utilização de uma impressora de telas, do inglês *Screen Printer* em tiras de substratos ou unidades já individualizadas, para após serem adicionadas as esferas de solda manualmente com o auxílio de finas máscaras feitas em aço inoxidável com o mesmo desenho padrão de esferas do componente BGA a ser soldado. Esta técnica é conhecida como colocação manual de esferas.

Soluções para modernizar este processo fazendo uso de equipamentos automáticos para aplicação em alto volume foram testadas, no entanto a baixa precisão de alinhamento e baixa tolerância dos substratos ocasionaram perdas em excesso tornando-as inviáveis para tal escala de produção. Resultantes da evolução constante da tecnologia dos equipamentos foram criados processos de deposição de esferas e aplicação de fluxo através de pinos que não trouxeram os benefícios esperados de forma categórica, assim novas pesquisas em diferentes tipos de acabamentos de superfície em substratos reduziram o custo e aumentaram a confiabilidade do encapsulamento.

Os acabamentos largamente usados são: cobre com preservativo para soldabilidade orgânica (Cu-OSP), do inglês *Cooper with organic solderability perservative* que foi um dos materiais utilizados no trabalho de Sy, Hsu e Jimarez (2007); imersão em estanho (Imm Sn), do inglês *tin immersion*; níquel imerso em ouro por reação de redução (ENIG), do inglês *electroless nickel immersion gold* e solda em ilha (SoP BGA), do inglês *Solder on pad BGA*.

Em seu estudo, Sy, Hsu e Jimarez (2007), desenvolveram um tipo de pasta de solda para o equipamento de transferência através de pinos para substituir a utilização de fluxo devido a históricos de modos de falha como pontes na aplicação da mesma. Utilizou-se uma pasta de solda solúvel em água onde os pinos podem ser mergulhados para posterior transferência. Os tipos de acabamentos mais comuns no mercado foram testados e alguns deles com preservação duvidosa para verificar se a solução teria também alguma vantagem aos processos tradicionais. Na fase de desenvolvimento foram elaboradas pastas de solda com diferentes quantidades de sólidos variando entre 65% de uso comercial até 80% experimental, sendo assim foi possível avaliar seu desempenho após uma série de impressões em um *pad* de 0,6mm de diâmetro e com acabamento ENIG mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Resultado da aplicação com diferentes percentuais de metal e mesma formulação de fluxo.

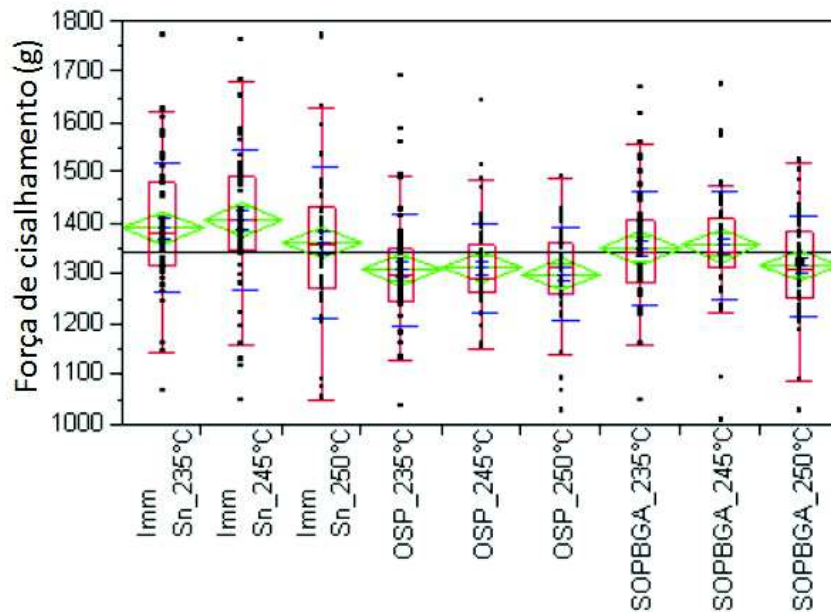


Adaptado de: Sy, Hsu e Jimarez (2007).

Como resultado Sy, Hsu e Jimarez (2007), não obteve nenhuma ponte entre os pinos ou *pads* após cinquenta impressões consecutivas em 50 pcb's diferentes com a formulação de 80% de metal. Esta formulação foi utilizada para novos testes de soldagem e cisalhamento, foram realizadas variações de tamanho de encapsulamentos, acabamento de superfície dos *pads*, liga metálica das esferas dentro da pasta de solda e seu tamanho, temperaturas de pico, tempo na zona líquida e aplicando técnicas gráficas e estatísticas foi possível comparar o desempenho nos testes destrutivos.

Na Figura 4 foi observado que no teste de cisalhamento das esferas, do inglês *Ball shear test* foi possível medir a força média entre 50 amostras com resultado de aproximadamente 1350g entre todos os tipos de acabamento de *PCBs*, visto que o critério para aprovação de um *pad* com 0,5mm definido por máscara de solda, do inglês *solder mask defined* é de 700g.

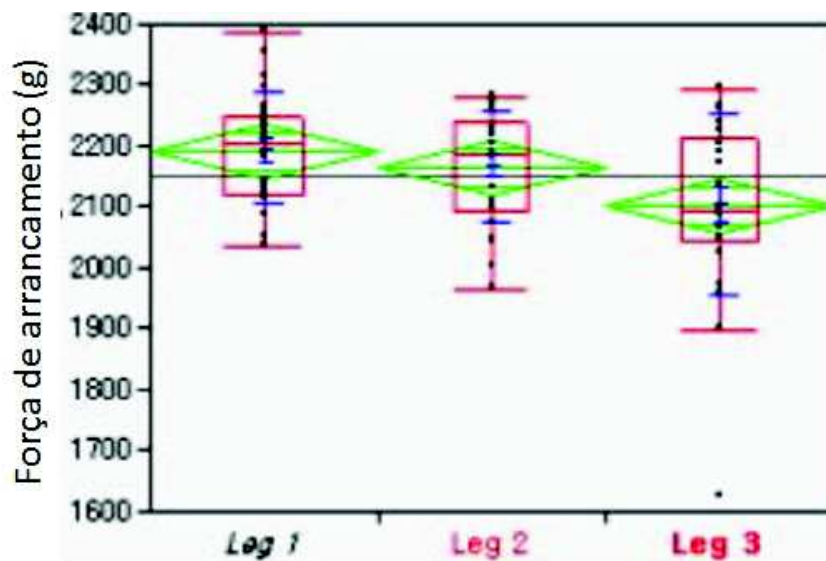
Figura 4 – Resultados da força de cisalhamento.



Fonte: Sy, Hsu e Jimarez (2007).

Na Figura 5 foi observado que nos testes de arrancamento de esferas, do inglês *Ball pull test* foi possível medir a força média entre 25 amostras com resultado de aproximadamente 2150g com PCB utilizando *pads* em *Cu-OSP*, visto que o critério para aprovação de um *pad* com 0,5mm, definido por máscara de solda, é de 910g.

Figura 5 – Resultado da força de arrancamento das esferas em amostras de CuOSP.



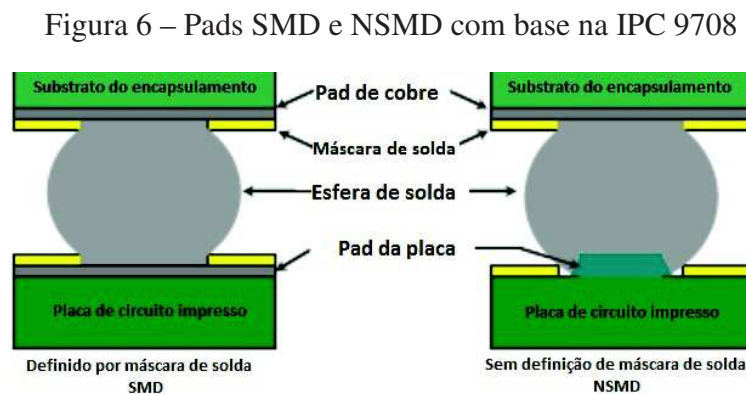
Adaptado de: Sy, Hsu e Jimarez (2007).

Ryu et al. (2008) confirmam os estudos de Sy, Hsu e Jimarez (2007) ao evidenciar que a aplicação de pasta de solda através de transferência de pinos oferece a viscosidade necessária e

que as pequenas partículas sólidas em micro-esferas inibem o movimento das esferas de solda, e reduzem a ocorrência de falhas de curto ou aglomerado de esferas. Como diferença em relação a solução apresentada por Sy, Hsu e Jimarez (2007) tem-se o fato de que a ferramenta para aplicação de fluxo através de pinos precisa ser limpa preventivamente após pequeno intervalo de tempo para prevenir tais defeitos, o que leva a uma perda de tempo de ciclo e tempo de manutenção do inglês *downtime*.

Ryu et al. (2008) afirma que a aplicação de pasta de solda supera estes problemas de processo em *pads* com acabamentos *SoP*, *Imm Sn* e *OSP* este apresentando o menor custo e também citado por Sy, Hsu e Jimarez (2007).

A aplicação de pasta de solda demonstrou-se eficiente na redução de defeitos para componentes com espaçamento entre esferas reduzida do inglês *fine pitch* e empilhamento de encapsulamentos do inglês *package-on-package (PoP)* habilitando aos projetistas a utilização de *pads* sem definição de máscara de solda do inglês *non-solder mask defined (NSMD)*, visto que as partículas sólidas presentes na pasta fazem o papel das paredes antes definidas pela própria máscara de solda em um padrão como apresentada na Figura 6 construído com base na norma IPC-9708 (2010).



Adaptado de: Tulkoff e Diego (2013).

2.3 Resultados em trabalhos semelhantes

Em seu artigo Hussain et al. (2015) publicou em seu artigo testes com quatro tipos de fluxos de solda solúveis em água, em ambiente com ar sintético para fornos de refusão com diferentes características como viscosidade, índice de acidez, pH e perda de massa. Durante o aquecimento comparou seu desempenho no quesito ação de promover a fluidez, capacidade de realinhar as esferas de solda e eliminar a ocorrência de defeitos. Foram observadas as diferenças entre fluxos químicos para aspersão no processo de solda onda, fluxo em pasta como veículo para as esferas na composição de pastas de solda e fluxos viscosos utilizados no processo de soldagem de esferas em um processo de encapsulamento. Foi considerado que a ação de remoção de óxidos e a sua eficácia é determinada por sua acidez, sua capacidade de remoção se limita ao

metal fundido ou líquido enquanto que materiais inertes como tinta, laca, detritos carbonizados e qualquer forma de sujeira não serão removidas.

Durante seus experimentos Hussain et al. (2015) adotou e selecionou as seguintes características para análise: seleção do fluxo viscoso por suas propriedades físicas, desempenho no forno de refusão, balanço de dispersão para medição das forças, solubilidade, limpeza bem como teste de cisalhamento das esferas conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades básicas dos fluxos viscosos

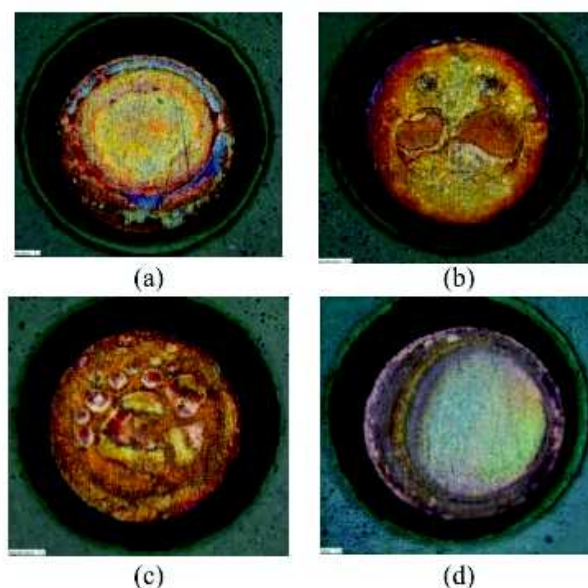
Propriedades	A	B	C	D
Número de Acidez (mgKOH/g)	40	39	41	32
pH	3.5	7.3	6.8	4.7
Viscosidade (Malcom - POise)	1740	3950	4510	3390
Solubilidade em água DI	High	High	Low	High

Fonte: Hussain et al. (2015)

Cada uma das propriedades foi analisada com intuito de entender a performance dos quatro tipos de fluxos viscosos selecionados possibilitando uma melhor seleção para cada tipo de acabamento de PCB, processo de refusão ou capacidade de promover a limpeza e posicionamento.

Segundo Hussain et al. (2015) a habilidade do fluxo de proteger o cobre após a remoção da camada de proteção de soldabilidade orgânica depende da taxa de oxigênio da atmosfera que consegue atravessar o fluxo e da taxa de degradação térmica do fluxo. A Figura 7 mostra o estado de conservação dos *pads* utilizando proteção do tipo OSP após a refusão em ar com os 4 tipos de fluxos selecionados.

Figura 7 – Amostras dos fluxos em *pad* OSP após a refusão.

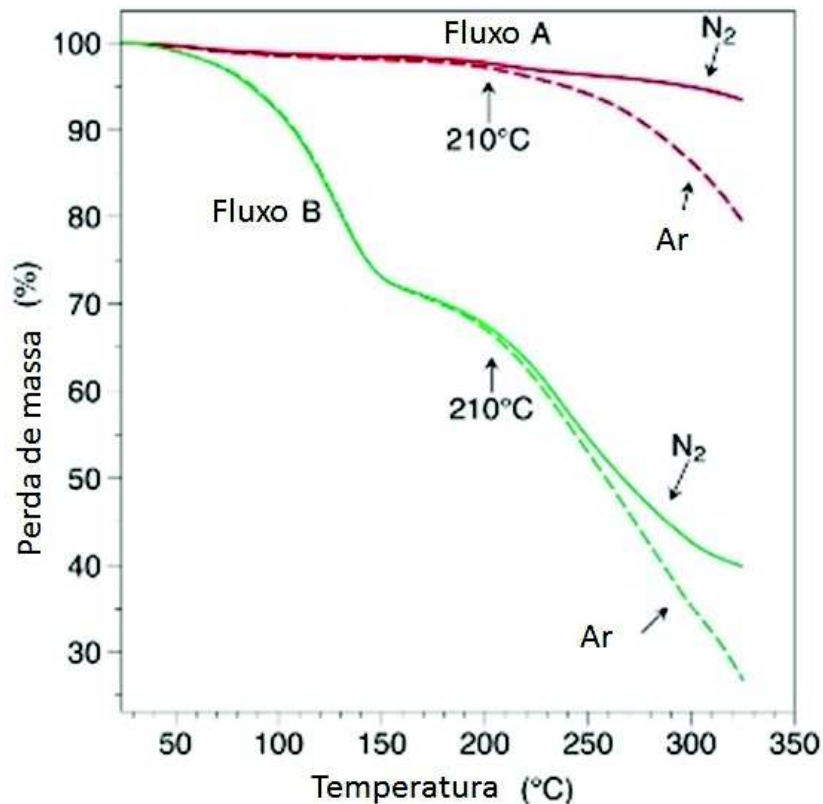


Fonte: Hussain et al. (2015).

Os *pads* A e C apresentaram manchas com aspecto de corrosão, enquanto o *pad* D apresentou apenas uma leve descoloração. A presença de manchas indicam que o fluxo foi efetivo para remoção da proteção em OSP expondo o cobre mas ineficiente contra a prevenção de permeação do oxigênio. Hussain et al. (2015) concluíram que permeação do oxigênio é dependente da temperatura, da estrutura do fluxo e de qual taxa se degrada sob temperatura. Por estas observações o Fluxo D demonstrou a melhor combinação entre estabilidade térmica e atividade de fluxo.

Hussain et al. (2015) verificaram através das análises de perda de massa mostradas na figura 8, observou a diferença entre os processos de refusão em atmosfera com ar e gás inerte nitrogênio. O fluxo A apresentou uma perda de aproximadamente 5% de massa na faixa de 325°C exposto ao ar comparado com a atmosfera em nitrogênio. As curvas características das diferentes atmosferas tiveram um descolamento a partir dos 210°C. Em ambiente de nitrogênio a perda de massa se manteve estável enquanto que em ar ocorreram perdas. O fluxo B apresentou duas transições térmicas, a primeira até aproximadamente 150°C e a segunda entre 150 e 320°C. Com relação ao índice de acidez e pH, o fluxo A foi o mais ácido encontrado seguido do fluxo D. A acidez das opções B e C foram parecidas sendo B o menor.

Figura 8 – Perda de massa entre Fluxo A e B.

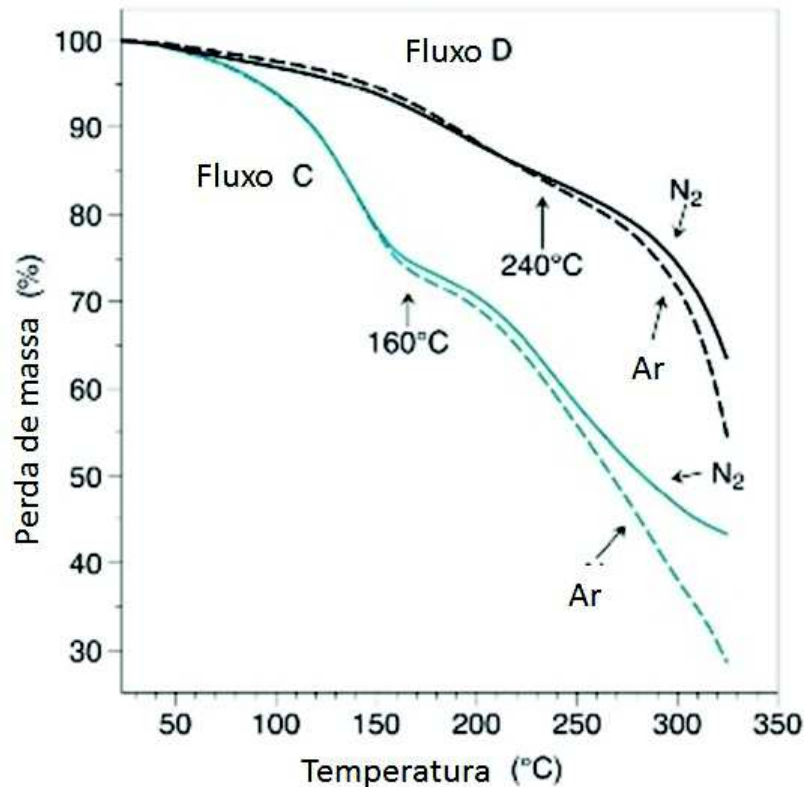


Fonte: Traduzido de Hussain et al. (2015).

Hussain et al. (2015) também realizaram análises de perda de massa entre as opções C

e D conforme mostrado na Figura 9, pode-se verificar que o fluxo D obteve um descolamento das curvas em atmosfera em ar e nitrogênio em aproximadamente 240°C com pequena variação sendo o nitrogênio o que apresentou menor perda. Este mesmo descolamento ocorreu no fluxo C em 160°C, a análise em atmosfera de nitrogênio apresentou 45% de resíduos próximo a 350°C enquanto a amostra em atmosfera em ar sintético menos de 30%.

Figura 9 – Perda de massa entre Fluxo C e D.



Fonte: Traduzido de Hussain et al. (2015).

Hussain et al. (2015) também avaliaram a capacidade de cada fluxo de reposicionar esferas de solda oxidadas e desalinhadas propositalmente durante o processo de forno de refusão com atmosfera em ar e nitrogênio. Nas figuras 10 a 13 seguintes, foram avaliados os resultados antes e depois da refusão com esferas limpas.

Na figura 10, Hussain et al. (2015) observou que a esfera de solda embora desalinhada no posicionamento, se centralizou com ação do fluxo de solda após a passagem pelo forno de refusão.

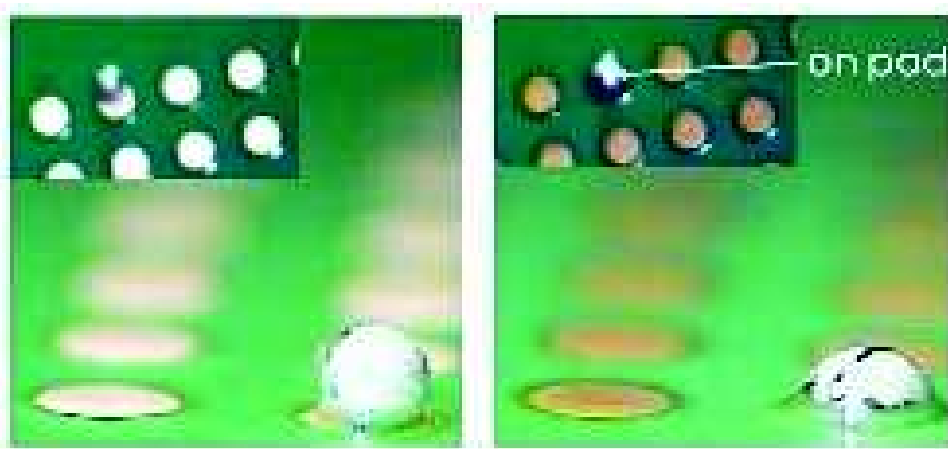
Figura 10 – Fluxo A antes e depois da refusão.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Na figura 11, Hussain et al. (2015) também observou que a esfera de solda embora desalinhada no posicionamento, se centralizou com ação do fluxo de solda após a passagem pelo forno de refusão.

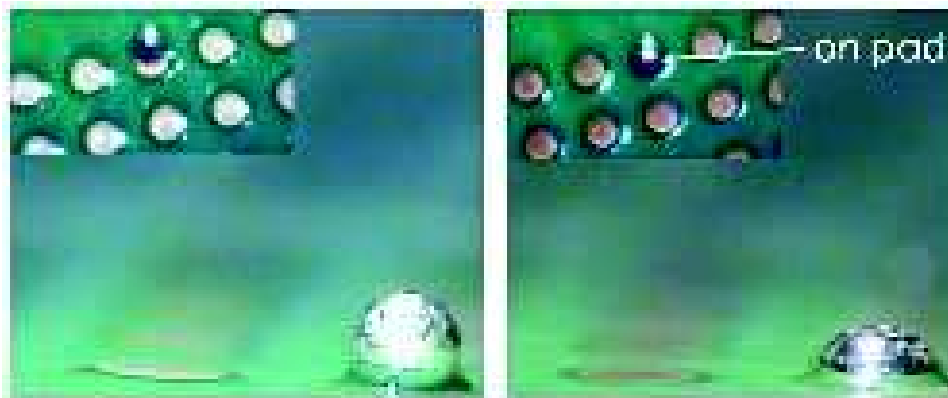
Figura 11 – Fluxo B antes e depois da refusão.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Na figura 12, Hussain et al. (2015) observou que a esfera se centralizou com ação do fluxo de solda após a passagem pelo forno de refusão.

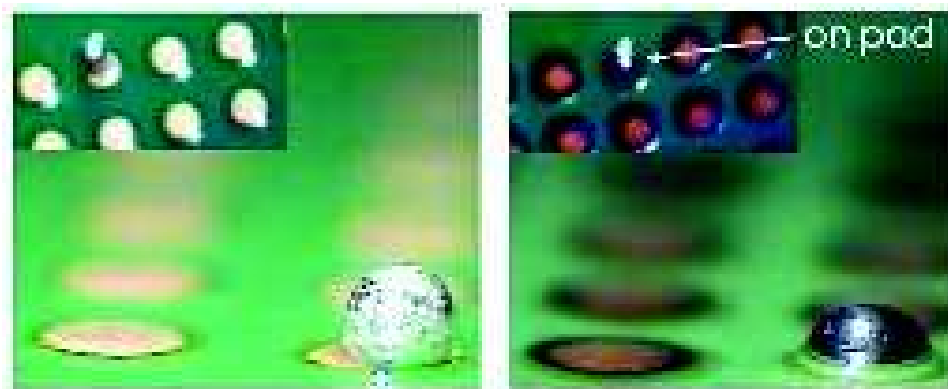
Figura 12 – Fluxo C antes e depois da refusão.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Na figura 13, Hussain et al. (2015) também observou que a esfera foi centralizada com ação do fluxo de solda após a passagem pelo forno de refusão.

Figura 13 – Fluxo D antes e depois da refusão.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Foi observado que com os 4 tipos de fluxo utilizados em esferas limpas o desalinhamento proposital foi corrigido satisfatoriamente após a passagem pelo forno de refusão as esferas foram soldadas na posição correta do *pad* conforme mostrado nas figuras 10, 11,12 e 13.

Por outro lado nos testes com esferas oxidadas nas amostras com fluxo A e B representadas nas figuras 14 e 15 não ocorreu o reposicionamento, e assim as esferas foram soldadas fora do *pad* o que é considerado falha de esferas desalinhadas. A ação do fluxo de solda não foi suficiente para promover o realinhamento.

Figura 14 – Fluxo A com esferas oxidadas antes e depois do reflow.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Figura 15 – Fluxo B com esferas oxidadas antes e depois do reflow.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Segundo Hussain et al. (2015) as amostras C e D mesmo com esferas oxidadas e desalinhadas foi possível corrigir o posicionamento durante a passagem pelo forno de refusão, o aspecto oxidado tornou-se limpo e brilhante na superfície da esfera devido a ação do fluxo de solda como mostrado das Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Fluxo C com esferas oxidadas antes e depois do reflow.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Figura 17 – Fluxo D com esferas oxidadas antes e depois do reflow.



Fonte: Hussain et al. (2015).

Em seu trabalho Hussain et al. (2015) também comparou as forças de cisalhamento da soldagem de esferas utilizando o equipamento de ensaios mecânicos com cartuchos de 100g. Neste teste as esferas são submetidas a uma força cisalhante com intuito de medir a força necessária para o arrancamento da esfera do seu *pad* tendo assim um parâmetro sobre a soldabilidade.

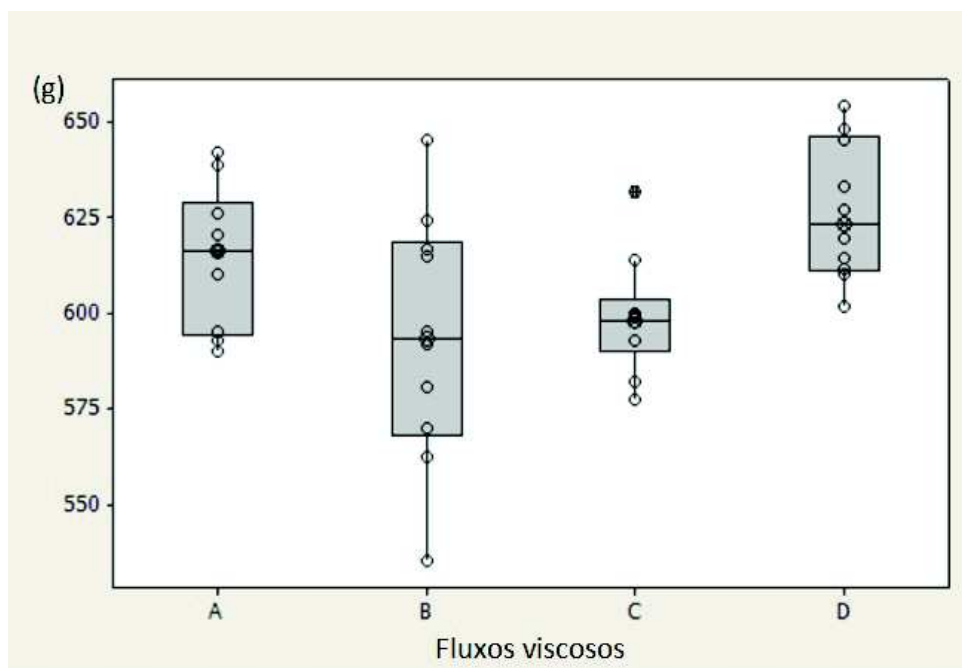
Com base nos resultados do teste cisalhamento (HUSSAIN et al., 2015) pôde elaborar um resumo pode ser visto na tabela 5 e uma comparação gráfica com a ferramenta *boxplot* na figura 18.

Tabela 5 – Média das forças de arrancamento e variação entre diferentes fluxos

Fluxo	Média da força de cisalhamento (grama força)	Variação
A	614,71	18,23
B	593,55	32,93
C	598,59	15,32
D	626,46	18,06

Fonte: Hussain et al. (2015)

Figura 18 – Média e variação da força de cisalhamento em forma gráfica.



Fonte: Traduzido de Hussain et al. (2015).

Hussain et al. (2015) analisou os gráficos e concluiu que a média das forças de cisalhamento foi em ordem decrescente do fluxo D, A, C e B; Os fluxos A e D apresentaram uma variação total e um interquartil similar enquanto o fluxo B obteve o maior interquartil comparativo e fluxo C o menor dentre eles. Este estudo sobre fluxos solúveis em água de Hussain et al. (2015) demonstrou que para atingir uma excelente soldabilidade tanto em ar quanto em ambiente com nitrogênio requer que o comportamento térmico do fluxo não seja afetado pela exposição ao ar e é melhor determinado pela análise de perda de massa através de TGA. Um alto número de acidez continua sendo necessário e desejado mas não é garantia do desempenho e outros fatores como composição química e temperatura de dissociação dos ativadores salinos, estabilidade térmica, permeabilidade de oxigênio e uma fácil limpeza com água deionizada são igualmente importantes.

Esta combinação de análises e testes servirá como base para este trabalho, será de grande valia e ótima base para fins de metodologia e comparação dos resultados visto que serão aplicados

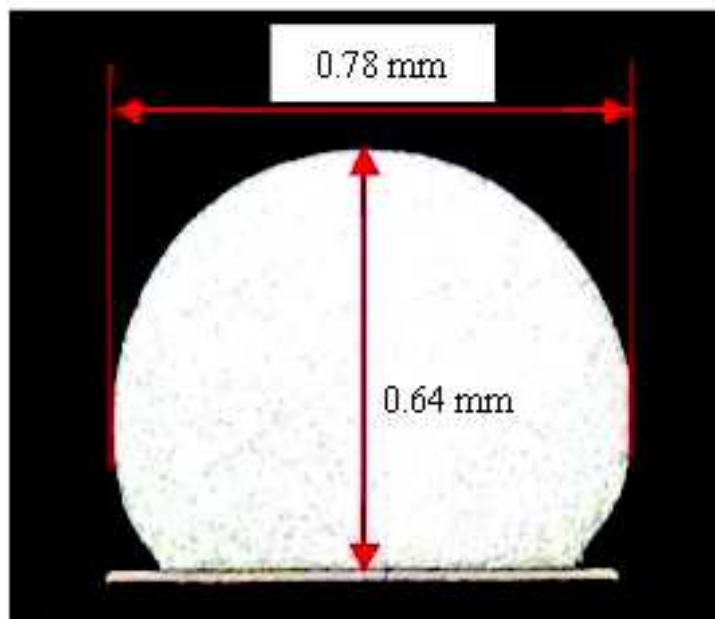
no mesmo processo com diferentes materiais com fins de melhoria na redução de defeitos.

Outra vertente de análise possível para forças de testes de cisalhamento, pode ser verificada pelo trabalho de Huang et al. (2001) onde foram realizadas análises e caracterizações das condições de teste de cisalhamento utilizando uma investigação experimental e computacional do teste em questão.

Foram aplicados para encapsulamentos do tipo *BGA* com modelos de métodos finitos conforme figura 20, relacionando a altura do choque entre a esfera e a ponta de prova com a velocidade do cisalhamento. As esferas dos componentes de montagem em superfície não exercem apenas a função de conexão elétrica para sinais, potência e aterramento mas também como suporte mecânico para manter a posição em uma placa de circuito impresso.

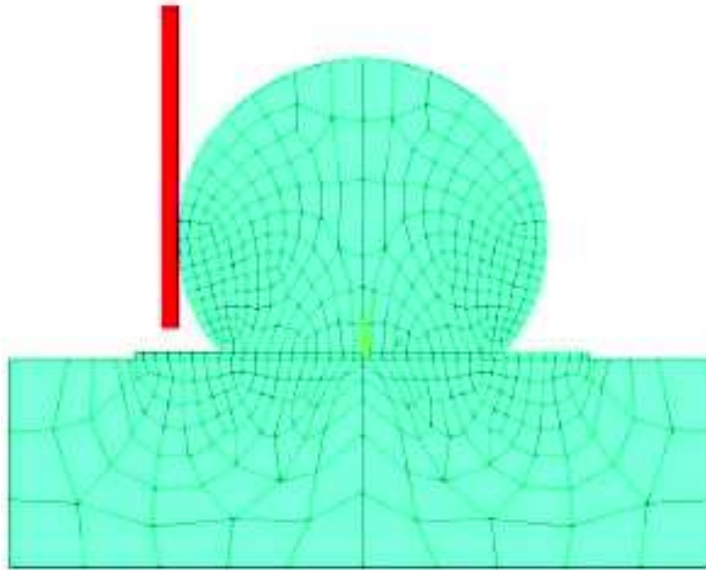
Segundo (HUANG et al., 2001) a razão entre a altura da esfera e sua largura como pode ser visto na seção transversal da esfera de solda na Figura 19 é um exemplo do suporte mecânico que contribui significativamente para que a confiabilidade da solda seja a principal preocupação.

Figura 19 – Seção transversal da esfera de solda.



Fonte: Huang et al. (2001).

Figura 20 – Modelo do ensaio utilizando elementos finitos com 8 nós.



Fonte: Huang et al. (2001).

Para o modelamento Huang et al. (2001) utilizaram amostras padronizadas com características conhecidas e fixas como altura e largura da esfera, tipo de *pad* onde foi realizada a solda e o material de acabamento de superfície e perfil do forno de refusão. Foram elaboradas as condições de teste bloqueando uma das variáveis e variando as restantes e desta forma cobrindo as possíveis configurações de ajuste do equipamento conforme Tabela 6 e 7.

Tabela 6 – Configurações com altura do choque bloqueada e variação da velocidade

Altura	Velocidade do cisalhamento (cm/s)				
64 (10%)	20	50	100	200	500

Fonte: Huang et al. (2001)

Tabela 7 – Configurações com velocidade fixa e variação da altura do choque

Velocidade do cisalhamento (cm/s)	Altura				
100	32 (5%)	64 (10%)	128 (20%)	160 (25%)	192 (30%)

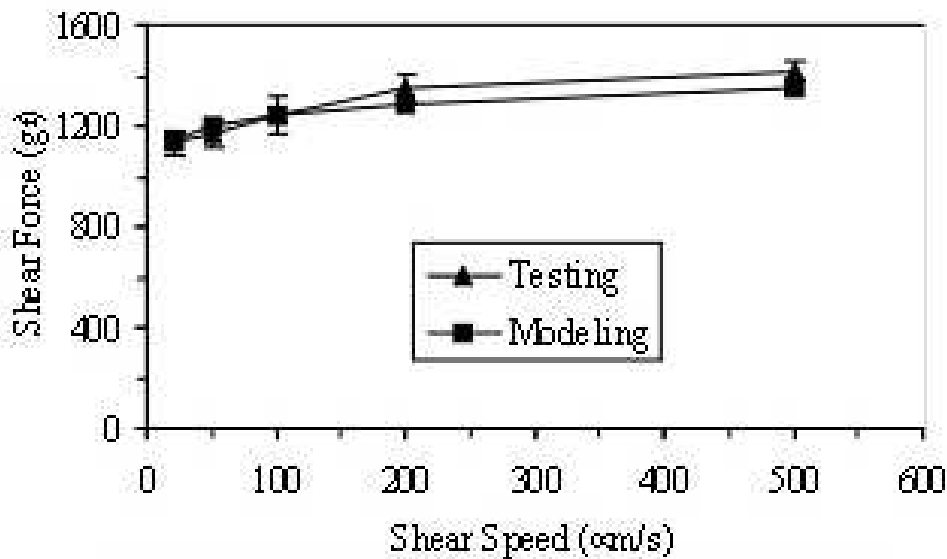
Fonte: Huang et al. (2001)

Foram inseridas na simulação as propriedades elásticas da liga metálica da solda com 63%Sn37%Pb, *pad* em cobre e substrato da *PCB* em resina epóxi para o modelamento em ambiente de *AnSYS v5.6* considerando que o ponto de contato entre a ponta de prova e a esfera é rígido.

Através da comparação entre os resultados obtidos com ensaios reais e os simulados o pesquisador concluiu que o seu modelo representou com alto índice de fidelidade os resultados

experimentais, isso ficou evidenciado com o Figura 21 onde a altura do choque foi constante e a velocidade de cisalhamento variou conforme planejado na Tabela 6, demonstrando que o comportamento da força de cisalhamento entre os ensaios e a simulação foram satisfatórios. De forma análoga a figura 22 onde a velocidade de cisalhamento foi constante e variando a altura do choque conforme exemplificado na tabela 7.

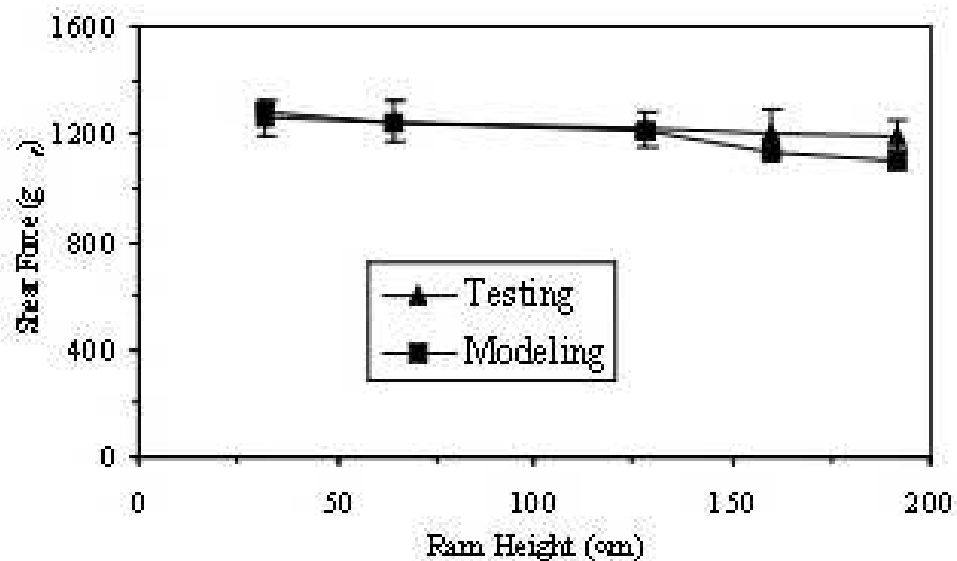
Figura 21 – Efeito da variação da velocidade na força de cisalhamento.



Fonte: Huang et al. (2001).

Huang et al. (2001) concluiu que seu modelo de simulação replicou satisfatoriamente os resultados obtidos com os ensaios destrutivos.

Figura 22 – Efeito da variação da altura de choque na força de cisalhamento.



Fonte: Huang et al. (2001).

Em aspectos físicos Huang et al. (2001) observaram que quanto maior a velocidade a curva de força de cisalhamento sofre um deslocamento positivo enquanto que com a variação da altura de choque e com velocidade fixa a curva resultante de forças sofre um deslocamento negativo, entendendo-se que mecanicamente o ponto de apoio está mais longe da base assim justificando uma diminuição da força.

Ainda relacionados com a aplicação do fluxo em si, Erickson (2003) descreveu em seu artigo que o controle da deposição de fluxo de solda é crítica para o encapsulamento de semicondutores. Para superar este problema, alguns novos métodos de aplicação sem contato mecânico estão sendo desenvolvidos em substituição aos tradicionais imersão e transferências por pinos.

Segundo (ERICKSON, 2003) o controle de resíduos resultantes da aplicação de fluxo de solda especialmente os tipos sem limpeza do inglês *no-clean* contribui para evitar a ocorrência de falhas de confiabilidade assim como delaminações e bolhas de ar em adesivos fazendo com que sua utilização apenas no volume e posições corretas facilitem a solda. O uso de escovas ou limpeza por imersão não controlam de forma adequada os excessos de deposição além do fato de serem lentos, embaraçosos e geralmente não suportam a produção em alto volume considerando que o tamanho dos componentes são menores a cada dia juntamente com o *pitch* entre os terminais ou esferas.

Em sua publicação Erickson (2003) também propõe a utilização de um processo automatizado que elimine o processo de limpeza após a soldagem e por excesso de fluxo. Um método baseado em uma ferramenta de aplicação de fluxo em forma de *spray* por ultrassom e controle de movimento tridimensional quebra o líquido em gotículas e forma um padrão retangular sem contato com a ferramenta sendo aplicada com um fluxo de ar focado com até 1 mm de largura. O sistema consiste em uma cabeça de ultrassom com sistema aplicador integrado, sistema de aplicação de precisão e uma plataforma com controle de movimento em 3 eixos. Um controle preciso da taxa de vazão do líquido, acionamento de liberação e fechamento do fluxo é crítico para atingir o resultado esperado e por isso são desenhados conforme as especificações de deposição como área, altura desejada e volume. Uma cabeça de aplicação com uso de ultrassom combinado com sistema de alimentação de líquido em micro volumes pode ser uma excelente alternativa para os componentes *fine pitch* e montagens eletrônicas que necessitam menor geração de resíduos e maior confiabilidade.

3 Materiais, ferramentas e métodos

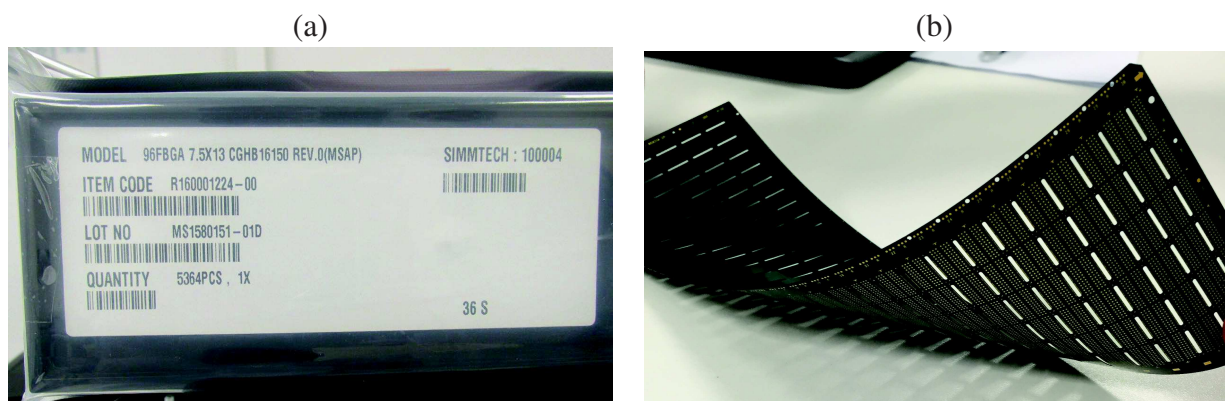
3.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizados amostras de materiais gentilmente cedidas pelos fabricantes e por uma empresa da área de encapsulamentos. Além disso, essa empresa, ofereceu também tempo de máquinas e inspeções que contribuíram para o resultado desta dissertação. Para fabricação dos componentes foi utilizado um lote de amostras de *PCB's* com trinta e seis substratos cada um com cento e cinquenta posições de *DRAM* do tipo *BGA*. Estas posições possuem noventa e seis *pads* para soldagem de esferas após a deposição do fluxo de solda. Assim foi possível a realização de testes com quatro diferentes tipos de fluxo de solda e mais de quatorze mil soldagens por placa agregando embasamento estatístico ao trabalho.

3.1.1 PCB - Substrato

O substrato utilizado para análise foi o *PN R160001224-00* do fornecedor *Simmtech* de origem coreana, conforme identificação da etiqueta do fabricante na Figura 31 (a). Este *PCB* possui estrutura baseada em fibra de vidro e resina fenólica, *pads* com acabamento tipo *Enig* apresentando uma espessura de 0,250mm com tolerância de 0,030mm conferindo ao substrato uma característica de flexibilidade como pode-se observar na Figura 31 (b).

Figura 23 – Identificação e flexibilidade do PCB



Fonte: Registrado pelo autor e cedido pela empresa

3.1.2 Esferas de solda

As especificações das esferas de solda utilizadas foram as mesmas constantes na lista de material original de produtos de uma empresa do ramo de encapsulamento de forma a evitar variações no resultado. Não foi utilizado um lote específico e sim o que estava disponível na máquina de aplicação de esferas *Duksan Hi-Metal* conforme Figura 24.

Figura 24 – Apresentação das esferas de solda.



Fonte: Cedido pela empresa.

A composição química das esferas apresenta 96,5% de Estanho (Sn), 3,0% de Prata (Ag) e 0,5% de Cobre (Cu), esta liga metálica é largamente utilizada no processo de manufatura eletrônica e é denominada SAC305. O diâmetro nominal da esfera é de 0,45mm com tolerância de 0,01mm, cada pote como o da Figura 24 possui 1.000.000 de esferas;

3.1.3 Fluxo de Solda

O fluxo de solda pode ser encontrado na forma líquida, sólida ou gasosa e quando aquecido é capaz de promover ou acelerar a molhagem da solda funcionando como agente de limpeza química tanto do *pad* quanto da própria esfera. Os fluxos preservam a integridade das superfícies da ação de agentes oxidantes, facilitando a soldagem na zona líquida e promovendo a formação de ligas.

Quando aplicado aos *PADs* do substrato de um BGA o fluxo de solda assume outra função, a de manter as esferas posicionadas durante o processo de soldagem no forno de refusão. Os fluxos de solda podem ser classificados com relação a sua composição química em resina natural, resina de origem sintética, orgânicos e inorgânicos de acordo com a norma J-STD-004 (2011).

Dois dos fluxos analisados são solúveis em água e outros dois parcialmente solúveis em água, todos na forma viscosa para aplicação em processo automatizado de transferência por pinos, que consiste na imersão de uma ferramenta em uma fina camada de fluxo de solda. Este dispositivo com pinos metálicos posicionados com a mesma disposição dos *pads* do *pcb* é levantado e cada pino traz consigo uma pequena quantidade de fluxo. Esta ferramenta se movimenta para a posição de aplicação, transferindo o material para a *pcb* como uma forma de carimbo.

3.1.4 Relatório de fornecedores de semicondutores

Para identificação dos fornecedores, foi utilizado o relatório anual de Tracy e Vardaman (2013) da associação global da indústria de semicondutores do ano de 2013 *Semi.org*. Nele foi possível verificar o grande número de empresas atuantes neste mercado em todas as etapas do encapsulamento em específico no processo de soldagem de esferas que nos interessa para este trabalho. Foi feito levantamento de todos fornecedores de esferas de solda que também fabricam fluxo de solda, sua nacionalidade e se os mesmos também fornecem fluxos na forma líquida, pastosa ou viscosa. Esta tabela foi base para o primeiro objetivo específico.

3.2 Ferramentas

3.2.1 Instrumentos de laboratório

Para a realização das análises físico químicas foi utilizado a infra-estrutura do Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros em São Leopoldo e o Laboratório de Polímeros da Unisinos. As ferramentas utilizadas foram vidrarias de laboratório em geral como tubos de ensaio, *Becker*, *Erlenmeyer*, bastão de vidro, proveta graduada e equipamentos de medição como medidor de pH, reômetro e analisador térmico TGA para análises termogravimétricas seguindo a norma ASTM-D6370 (1999) conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – TGA para análise de perda de massa.



Fonte: Cedido pelo Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros.

3.2.2 Máquina de aplicação de fluxo e esferas

A aplicação de fluxo e esferas foi realizada através da máquina *Koses* modelo *KAM 750S* que automaticamente movimentava o substrato fixado por vácuo através de esteiras se alinhando ao ponto de aplicação de fluxo por um sistema de reconhecimento de padrões.

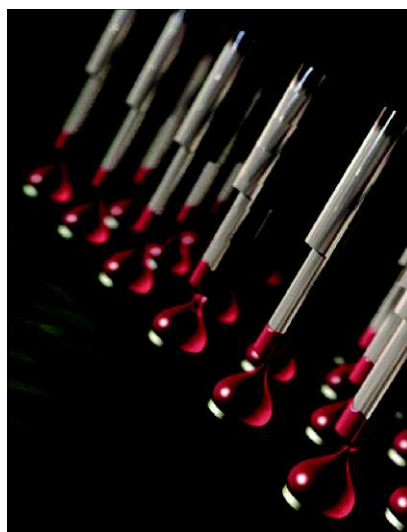
Figura 26 – Máquina de aplicação de fluxo e esferas.



Fonte: Cedido pela Empresa

A máquina mostrada na figura 26 trabalha com duas esteiras simultâneas uma para aplicação de fluxo e outra para esferas de 0,30mm até 0,76mm de diâmetro. A ferramenta de transferência de fluxo por pinos deposita uma quantidade determinada nos *pads* do substrato conforme mostrada na figura 27. Esta quantidade varia com o diâmetro do pino, profundidade em que a ferramenta desce dentro da bandeja de disposição de fluxo, viscosidade do fluxo, velocidade entre outros.

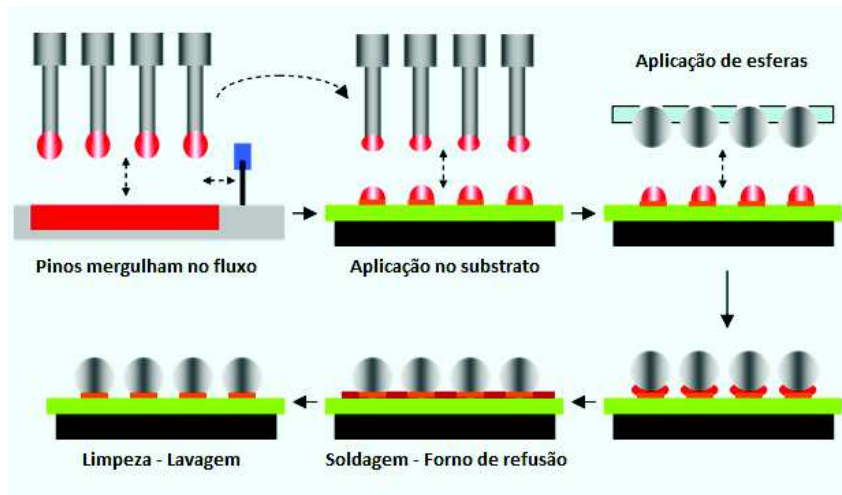
Figura 27 – Ilustração da ferramenta de pinos.



Fonte: Adaptado de Indium Corporation

Finalizando o processo é realizada uma inspeção por câmera simples para ausência ou não de esferas. O processo de aplicação de fluxo pode ser simplificado como mostra a figura 28, a ferramenta de aplicação de fluxo mergulha os pinos na mesa de abastecimento de fluxo após isso se movimenta para a posição acima do substrato e deposita o material como um carimbo. As esferas de solda são sugadas por vácuo para a ferramenta de aplicação de esferas e são aplicadas sob o fluxo seguindo para o forno de refusão e posterior lavagem.

Figura 28 – Passos da aplicação de fluxo.



Fonte: Adaptado de Indium Corporation

3.2.3 Forno de refusão

Utilizou-se para soldagem das *PCB's* após a aplicação de fluxo e esferas o forno de refusão mostrado na figura 29. Este forno fabricado pela empresa Vitronix é dividido em zonas de aproximadamente 40cm de comprimento, Possui 10 zonas, sendo 7 de aquecimento e 3 zonas de resfriamento, possui esteira e guias para suporte das placas.

As zonas são posicionadas ao longo do forno tanto na parte superior quanto inferior, possuem conjuntos de resistências e rotores para forçar o fluxo de ar em cada zona. São inseridas 3 *pcbs* paralelamente, o perfil de temperatura utilizado foi o mesmo do processo produtivo da empresa como considerado nas delimitações do trabalho. A temperatura de entrada é de 100 °C e o pico próximo de 250 °C.

Figura 29 – Forno de refusão para soldagem dos substratos.

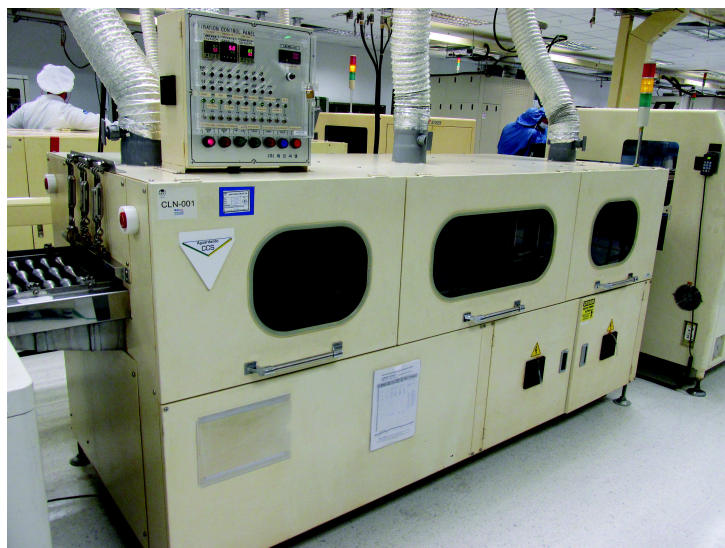


Fonte: Cedido pela empresa

3.2.4 Lavadora de placas

Tendo como função principal a limpeza de algum resíduo deixado após a refusão ou do processo de marcação a laser, as *PCBs* são lavadas com água deionizada aquecida a 40 °C sem adição de produtos químicos, em uma máquina chamada de lavadora. São utilizados 3 estágios de limpeza em sequência sendo o primeiro a lavagem, o segundo enxague e o terceiro secagem com ar como mostrado na figura 30.

Figura 30 – Lavadora de substratos.

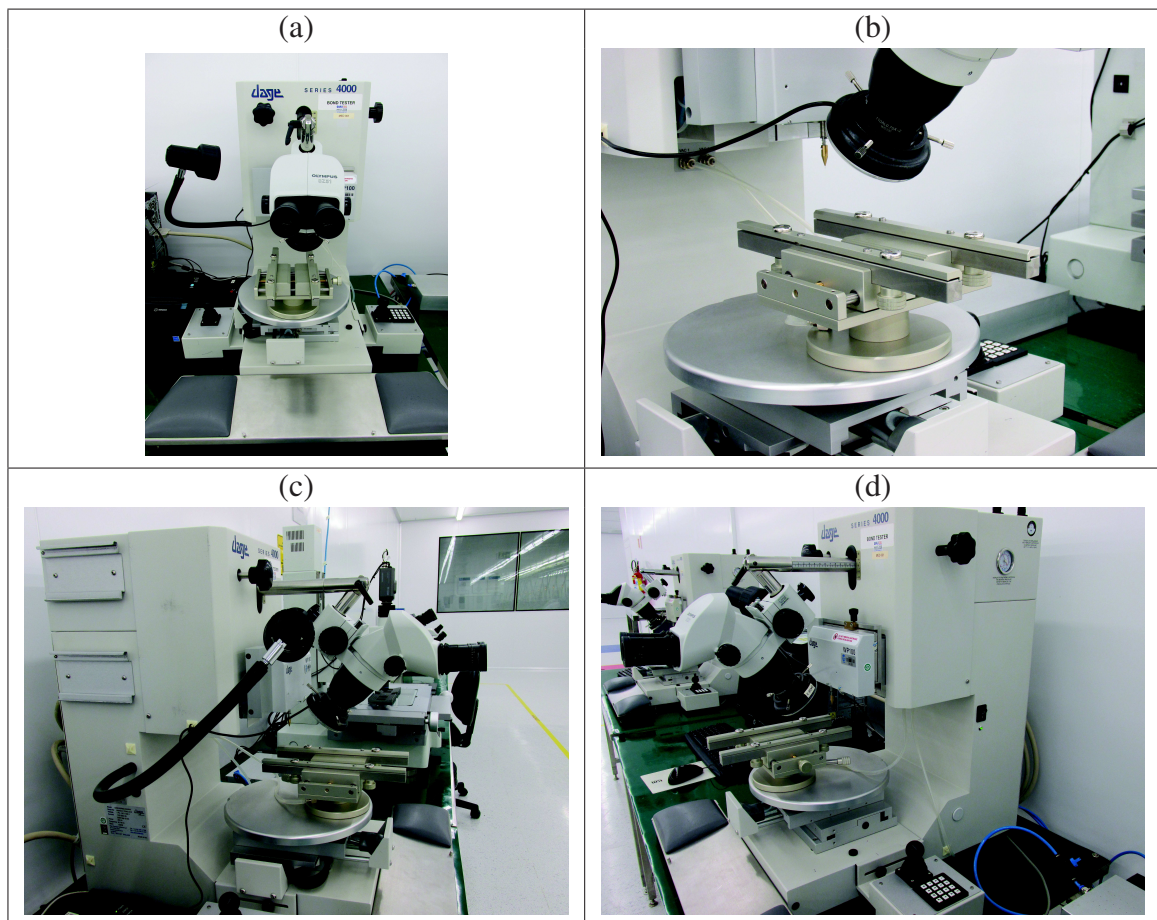


Fonte: Cedido pela empresa

3.2.5 Máquina de ensaios mecânicos

Para realização de ensaios de tração e cisalhamento foi utilizado uma máquina de ensaios mecânicos, de acordo com as normas JESD22-B117A (2000) a posição da ferramenta durante o teste é crítica para que o resultado do teste seja preciso e com repetibilidade. Para solucionar este problema a máquina marca Nordson Dage modelo 4000HS conforme mostrado na Figura 31(a), vista frontal, identifica a superfície de teste utilizando um cartucho de testes com sistema *touchdown* patenteado que controla a carga aplicada proporcionando 0,25 microns de precisão.

Figura 31 – Nordson Dage Serie 4000 para ensaios mecânicos



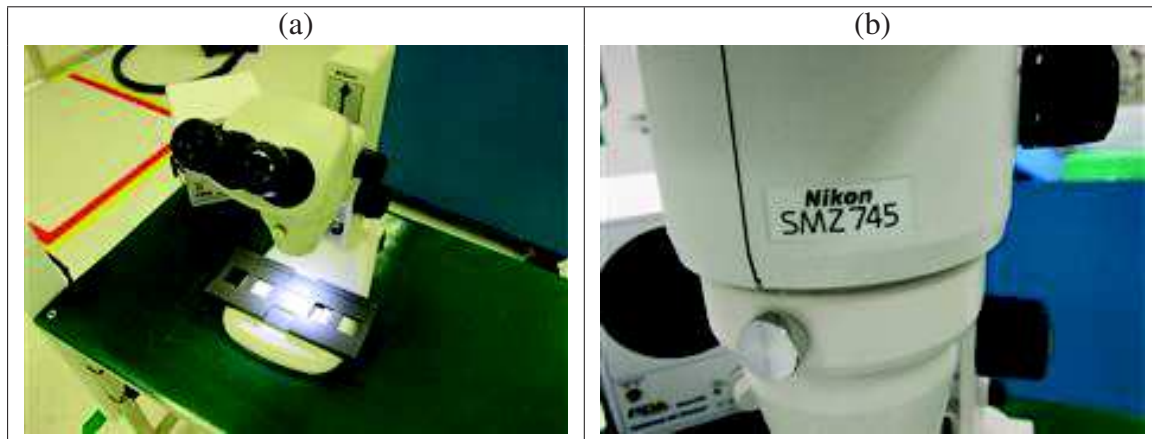
Fonte: Cedido pela empresa

No detalhe Figura 31(b) observa-se o dispositivo utilizado para fixação das *PCB's* durante os ensaios e o ajuste do microscópio para observação do ensaio. O posicionamento da ferramenta de teste pode ser verificada nos detalhes (c) e (d) da Figura 31. Com este equipamento é possível realizar uma série de testes destrutivos, para cada um é necessário um dispositivo chamado cartucho apropriado que possui uma célula de carga para a faixa de força a ser medida. Para o ensaio de cisalhamento de esferas foi utilizado o cartucho modelo "BS250" que possui uma ponta dimensionada para esferas de solda e se enquadra na especificação utilizada pela empresa para este ensaio.

3.2.6 Microscópio óptico binocular para inspeção

Foi utilizado para inspeção visual um microscópio binocular com iluminação *led* conforme mostrado na Figura 32(a) da marca *Nikon* e modelo *SMZ 745* no detalhe Figura 32(b). Possui *zoom* de 7,5 vezes e uma distância de trabalho longa de 115mm, ampliação total de 3,35 vezes até 300 vezes.

Figura 32 – Microscópio Binocular Óptico para inspeção visual



Fonte: Registrado pelo autor e cedido pela empresa

3.2.7 Software Estatístico

Foi utilizado como ferramenta de análise o *software* estatístico "Mintab" na sua versão 16, este programa foi criado por professores universidade estadual da Pensilvânia nos Estados Unidos em 1974 com intuito de realizar os cálculos e permitir que os alunos se concentrassem em aprender os conceitos e o que eles poderiam revelar.

O *Minitab* foi utilizado neste trabalho para criação de gráficos do tipo *boxplot*, histograma e dispersões, assim como cálculos variados de médias, variações. Os métodos de cálculo utilizados pelo *software* não foram objeto de estudo e sim a interpretação dos resultados das análises.

3.3 Métodos

3.3.1 Seleção de fluxos

Foi selecionado para comparação o fluxo de solda que consta na lista de materiais do produto *DRAM DDR3 4Gbitx8*, utilizado por uma empresa de encapsulamento local, aqui chamado de **Fluxo A**. Foram contatados outras empresas do mercado através do relatório anual de fornecedores de semicondutores citados em Tracy e Vardaman (2013), dentre eles foi possível incluir uma segunda marca aqui chamada de **Fluxo B** atuante no mercado nacional.

Para complementar as análises e aprofundar as investigações e discussões comparativas, outras 2 formulações de fluxo foram produzidas utilizando materiais obtidos junto a um distribuidor local. O terceiro e quarto fluxo de solda aqui chamado de **Fluxo C** e **Fluxo D** se originaram de uma mistura customizada com consistência suficiente para evitar o gotejamento durante a aplicação.

3.3.1.1 Preparação dos Fluxos C e D

O objetivo foi de se obter um fluxo viscoso de baixo custo com fornecedores regionais utilizando como base um fluxo pastoso já utilizado em eletrônica sem aplicação em semicondutores código HF200 do fabricante Henkel e adicionando como diluente um fluxo líquido código 5305 do fabricante Alpha-Best para encontrar a consistência similar mais apropriada. As proporções foram definidas através experimentos considerando as proporções de fluxo líquido e pastoso para obter uma mistura que pudesse ser utilizada no equipamento de aplicação de fluxo no modo automático. Na Tabela 8 apresenta-se um resumo das proporções utilizadas para customização dos fluxos e, a seguir, descrevemos o método de preparação.

- O fluxo denominado "C1" foi obtido através da mistura de 2 partes iguais de fluxo pastoso e líquido. Foram homogenizados 50% fluxo pastoso (11,83g) e 50% fluxo líquido (11,83g) em becker utilizando um bastão de vidro. O resultado apresentou uma substância com aspecto líquidas o que impossibilita sua utilização no processo automatizado pois durante a transferência dos pinos para PCB ocorreriam gotejamento assim o fluxo "C1" foi descartado da análise.
- Com base do fluxo "C1", adicionou-se mais uma parte de fluxo pastoso onde obteve-se o fluxo denominado "D1" com 66,6% de fluxo pastoso e 33,3% de fluxo líquido, utilizando um bastão de vidro o material resultante foi homogenizado em um becker. O mesmo apresentou-se predominantemente líquido. A mistura D1 também foi descartada da análise.
- O Fluxo denominado "C" foi obtido através da mistura de 28,00 g de fluxo pastoso e 11,00 g de fluxo líquido. Esses materiais foram homogeneizados em becker utilizando um bastão de vidro. A mistura obtida caracterizou-se por não apresentar gotejamento, este fluxo foi selecionado para análise.
- O Fluxo denominado "D" foi obtido através da junção de 27,64g de fluxo pastoso e 12,39 g de fluxo líquido. Esses materiais foram homogeneizados em becker utilizando um bastão de vidro. Este fluxo apresentou uma consistência similar aos fluxos A e C, não apresentou gotejamento. Portanto este fluxo também foi selecionado para análise.

Tabela 8 – Proporções de fluxo pastoso e fluxo líquido

Fluxo	Massa de Fluxo Pastoso (g)	Massa de Fluxo Líquido (g)	Percentual em Massa
C1	11,83	11,83	50 / 50
D1	23,66	11,83	66,6 / 33,3
C	28,00	11,00	71,8 / 28,2
D	27,64	12,39	69 / 31

Este processo de elaboração foi feito no laboratório de polímeros da Unisinos conforme registrado na figura 33.

Figura 33 – Registros da elaboração das misturas



Fonte: Registrado pelo autor

3.3.2 Análise das características técnicas

3.3.2.1 Medição do pH

A Medição do pH foi realizada com base na norma ABNT-NBR-7353 (2014), o equipamento utilizado foi o modelo DM-22 da marca Digimed mostrado na Figura 4.3.1 que possui um eletrodo DME-CV1 do tipo escoamento com sensibilidade de 98,1% para aplicações em meios aquosos em geral, com corpo de vidro, haste de 108mm e junção líquida através de cerâmica pontual.

Figura 34 – pHmetro Digimed DM-22



Fonte: Cedido pelo Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros

O sistema de referência é protegido por barreira iônica, evitando a contaminação da referência e introduzindo maior rapidez de resposta nas variações de temperatura. As amostras foram diluídas em 10 vezes em água ultra pura e os resultados serão apresentados em uma tabela com o tipo de fluxo de solda e o respectivo pH medido.

3.3.2.2 Viscosidade

A medição da viscosidade foi realizada através de um teste de reometria de placas paralelas com uma metodologia interna do Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros. Neste teste foi realizado um monitoramento da viscosidade em função da taxa de cisalhamento que variou de 1 a 100 1/s com.

A temperatura de teste foi 25 °C utilizando o equipamento da marca Anton Paar modelo MCR 102 conforme mostrado na Figura 35, os resultados foram registrados em gráficos comparativos sobrepondo os diferentes tipos de fluxo de solda.

Figura 35 – Reômetro Anton Paar - MCR 102



Fonte: Cedido pelo Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros

3.3.2.3 Número de acidez

O número de acidez corresponde à quantidade (em mg) de base (KOH ou NaOH) necessária para neutralizar 1g do fluxo, foi determinado com base na norma ASTM-D7253-06 (2011) por titulometria. Neste ensaio foi utilizado como solução titulante a concentração de KOH em metanol com 0,6498 mol/l. A amostra foi solubilizada 100 mL de isopropanol e como indicador foi utilizada a fenolftaleína. Os resultados foram apresentados em uma tabela com o tipo de fluxo de solda e o respectivo número de acidez medido.

3.3.2.4 Termogravimetria

As análises termogravimétricas foram realizadas com base na norma ASTM-D6370 (1999) utilizando nitrogênio como atmosfera inerte para simular um processo minimizando o contato de agentes oxidantes com as esferas e fluxo de solda, esta atmosfera é utilizada em produtos onde o processo de soldagem é crítico como os semicondutores. Em contraposto também foi utilizado ar sintético na proporção de 79% de N_2 e 21% de O_2 como atmosfera oxidante o que seria um processo convencional de soldagem simulando as condições fabris. Foi aplicada uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até o pico de 600°C com um fluxo de gás de $90\text{mL}/\text{min}$. Através deste ensaio foi possível prever o comportamento do material dentro do forno de refusão bem como analisar o percentual de resíduos após a soldagem. Os resultados foram registrados em gráficos mostrando a taxa de perda de massa com temperatura como variável para cada tipo de fluxo e atmosferas testadas.

3.3.3 Comparação de custo

Foram comparados entre os 4 tipos de fluxo de solda o custo de aquisição do material por quilograma, o custo logístico incluindo despesas aduaneiras, seguro e ambos de forma simplificada. Para materiais importados e refrigerados, o custo logístico torna-se maior que o custo do próprio material, assim este item torna-se imprescindível para o significado da comparação. Foi considerado como custo de material o valor da matéria prima em quilograma fornecido através de cotação do fornecedor com valor em dólar. O custo logístico por sua vez considerou os valores de frete do país fornecedor do material, o seguro da carga e as despesas aduaneiras para desembarço da mercadoria no Brasil, também em dólares.

3.3.4 Testes de produção

3.3.4.1 Aplicação de Fluxo

Os diferentes tipos de fluxo foram dispostos na mesa de fluxo da máquina e, após regularização automática através de rodos, a ferramenta de pinos foi mergulhada na camada de fluxo e se movimentou para posição de aplicação depositando uma micro gota de fluxo em cada *pad* da *PCB*. Cada *PCB* foi inspecionado visualmente e verificado se ocorreu a transferência de fluxo e se foi de forma suficiente para cobrir os *pads* uniformemente. Os resultados foram registrados em uma tabela indicando o fluxo utilizado, presença de fluxo e cobertura utilizando os indicadores de classificação aprovado e reprovado.

3.3.4.2 Refusão e lavagem

As *PCB's* com esferas posicionadas centralizadas nos *pads* com cada tipo dos fluxos de solda passaram pelo forno de refusão e lavagem com água DI, foram verificadas através de inspeção visual a soldagem das esferas com relação a posicionamento, aparência cristalina e formação de resíduos não solúveis em água. Os resultados foram registrados em uma tabela indicando o fluxo, a aparência e presença de resíduos.

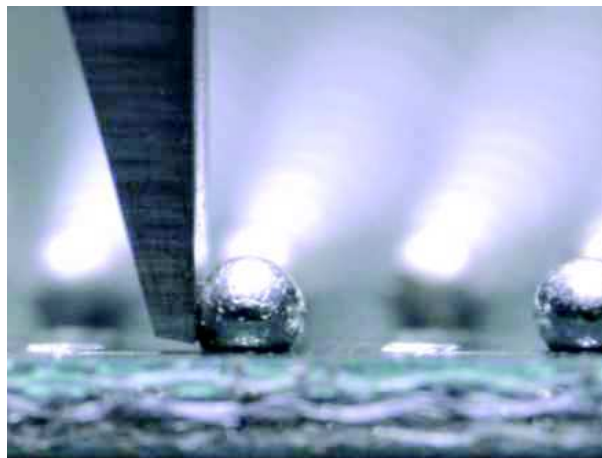
3.3.4.3 Avaliação do desempenho do fluxo para o deslocamento no posicionamento das esferas de solda

Foram aplicadas esferas com 50% de deslocamento em relação ao centro do *pad*, com cada tipo de fluxo de solda e em duas *PCB's* completas, totalizando 28.800 esferas. Este ensaio tem como objetivo verificar a capacidade de realinhar esferas mal posicionadas durante o processo produtivo. As esferas foram colocadas na borda do *pad* e, após a refusão e lavagem, inspecionadas visualmente com auxílio do microscópio para se contabilizar qual percentual de esferas foram soldadas de forma correta. Os resultados foram apresentados em uma tabela indicando o tipo de fluxo e o percentual de esferas realinhadas.

3.3.4.4 Avaliação do teste de cisalhamento

Foram realizados testes de cisalhamento em uma amostra de cada PCB seguindo a norma MIL-STD-105E (1989) atribuindo nível II de rigor médio, código "M" e AQL 0,65 considerando a amostra com 2 PCB's totalizando 28800 esferas. A amostragem tabelada foi de 160 esferas por PCB e por modelo de fluxo. O teste de cisalhamento seguiu o processo utilizado na indústria de encapsulamento e de acordo com instruções do fabricante da máquina. O resultado foi mostrado através de um gráfico tipo *boxplot* excluindo os pontos atípicos ou inconsistentes considerando uma vez e meia o valor interquartil, limites superiores e inferiores da coleta de dados.

Figura 36 – Exemplo de posicionamento da ferramenta de testes



Fonte: Adaptado de nordson.com

Foram arquivados os registros de máquina para posterior análise se necessário em outro trabalho sugerido, segue também um exemplo na figura 36 do posicionamento da ferramenta de cisalhamento em uma esferas de um componente *BGA* similar.

4 Resultados

Neste capítulo foram apresentados os resultados das análises das características técnicas das diferentes amostras de fluxo e os resultados dos testes de produção através de ferramentas estatísticas. Para ambos os resultados foram mostrados gráficos comparativos e ferramentas estatísticas do *software* Minitab.

4.1 Levantamento dos fornecedores

Por adequação ao processo de fabricação e especificações, os fabricantes de esferas de solda comumente fornecem uma opção de fluxo de solda apropriado, assim a tabela 9, indica quais fornecedores possuem em seu portfólio esferas, pasta de solda e fluxo (líquido ou viscoso).

Tabela 9 – Fabricantes de Esferas e Fluxo de Solda

Fabricante	Fábrica	Esferas	Pasta	líquido	Viscoso	Presente no Brasil
Accurus	Taiwan	Sim	Não	Não	Não	Não
Bow Electronics	EUA	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Duksan Hi-metal	Coreia	Sim	Sim	Não	Não	Não
Easy Sphere	EUA	Sim	Não	Não	Não	Não
Fukuda Metal	Japão	Sim	Não	Não	Não	Não
How Tsen	Taiwan	Sim	Não	Não	Não	Não
Indium Corp.	EUA	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
IPS	França	Sim	Não	Não	Não	Não
MK Electron	Coreia	Sim	Não	Não	Não	Não
Mitsubishi Mat.	Japão	Sim	Não	Não	Não	Não
Neomax(Hitachi)	Japão	Sim	Não	Não	Não	Não
NS Solder	Japão	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Nippon Micrometal	Japão	Sim	Não	Não	Não	Não
PFARR	Alemanha	Sim	Não	Não	Não	Não
PMTC	Taiwan	Sim	Não	Não	Não	Não
Qualitek	EUA	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Sekisui Chemical	Japão	Sim	Não	Não	Não	Sim
Senju Metal	Japão	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Shenmao Technology	Taiwan	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
SphereTek	EUA	Sim	Não	Não	Não	Não
Amtech Solder	EUA	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Yeh-Chiang	Taiwan	Sim	Sim	Sim	Sim	Não

Fonte: Adaptação do relatório anual da associação global de semicondutores da *Semi.org* e consulta aos sites do fabricantes

Foi possível verificar que o mercado de encapsulamento tem uma taxa de crescimento anual (CAGR) de aproximadamente 10%. Foi registrado se a operação dos fornecedores no Brasil, seja diretamente ou através de distribuidores. Dentre estes fabricantes foi realizado contato com os quais possuem operação no Brasil e fluxo viscoso para obtenção de amostras e documentação técnica conforme mostra a tabela 10.

Tabela 10 – Fabricantes escolhidos para realização dos testes

Fabricante	Fábrica	Esferas	Viscoso	Presente no Brasil
Indium Corp.	EUA	Sim	<u>Sim</u>	<u>Sim</u>
Senju Metal	Japão	Sim	<u>Sim</u>	<u>Sim</u>
Amtech Solder	EUA	Sim	<u>Sim</u>	<u>Sim</u>

Fonte: Criado pelo autor

Apenas 2 fabricantes forneceram amostras que iremos chamar a diante de "Fluxo A" e "Fluxo B" para preservar as informações da empresa analisada. As amostras C e D foram compostas de um fornecedor local não específico para soldagem de esferas em semicondutores conforme descrito no item 3.3.1.1 para fins de comparação;

4.2 Comparação de custo simplificada

Conforme proposto no seção 3.3.3 foi construída a tabela 11. Com esta tabela foi possível separar o custo total em custo do material e as despesas adicionais, agrupadas como custo logístico sendo frete, seguro e desembaraço aduaneiro. Identificou-se que a opção com menor custo total foi o fluxo D, seguido do fluxo C ambos nacionais. Os fluxos A e B são importados e de acordo com o levantamento apresentaram o custo total mais elevado. Observou-se também que o fluxo B apesar de importado apresentou custo logístico 50 vezes menor que o fluxo A visto que o fornecedor é um distribuidor nacional que aparentemente já embutiu os custos de importação no custo do material. Os valores foram calculados pelo departamento de controladoria da empresa tendo como base os extratos da declaração de importação, *invoice final*, ordem de compra, *packing final* e nota fiscal de recebimento da empresa analisada.

Tabela 11 – Comparação de custo simplificada

Fluxo	Custo material/kg (US\$)	Custo logístico (US\$)	Sub-total (US\$)
A	366.67	366.59	733.26
B	956.00	7.21	963.21
C	550.00	20.00	570.00
D	537.00	20.00	557.00

Valores convertidos em dólar (US\$) PTAX do BCB no dia 30/08/2016 sendo este R\$ 3,2519

Fonte: Cedido pelo dept. de controladoria da empresa

O Custo de C e D incentivaram uma análise mais aprofundada e aprimoramento das suas características pois observou-se que seria possível obter uma redução de custo se os aspectos técnicos fossem atingidos conforme será discutido a frente.

4.3 Análises das características dos materiais

4.3.1 Medição do pH

Durante a preparação das amostras para realização das medições de pH observou-se que as amostras A e B são solúveis em água e, portanto, foram diluídas em 10 vezes em água ultrapura. Entretanto, também observou-se que as amostras C e D são parcialmente solúveis em água, trazendo um indício que a limpeza após a refusão pode ser um problema. Também é preciso verificar a limpeza de ferramentas que entram em contato com o fluxo durante o processo ou até mesmo em uma limpeza periódica de todo sistema.

Com os resultados verificamos que a amostra A apresentou um valor de pH 4,20, ou seja, um caráter ácido. Já o fluxo B apresentou características básicas com valor de pH de 8,23. Vale observar que tanto A como B são amostras comerciais para uma mesma aplicação industrial e com resultados bem diferentes. Finalizando, os fluxos C e D apresentaram resultados de pH similares de 6,39 e 6,08, respectivamente, praticamente neutros. Essa pequena diferença entre o fluxo C e D se deve apenas pelo fato de possuírem pequenas diferenças na quantidade de fluxo em pasta.

Tabela 12 – Resultados da análise de pH

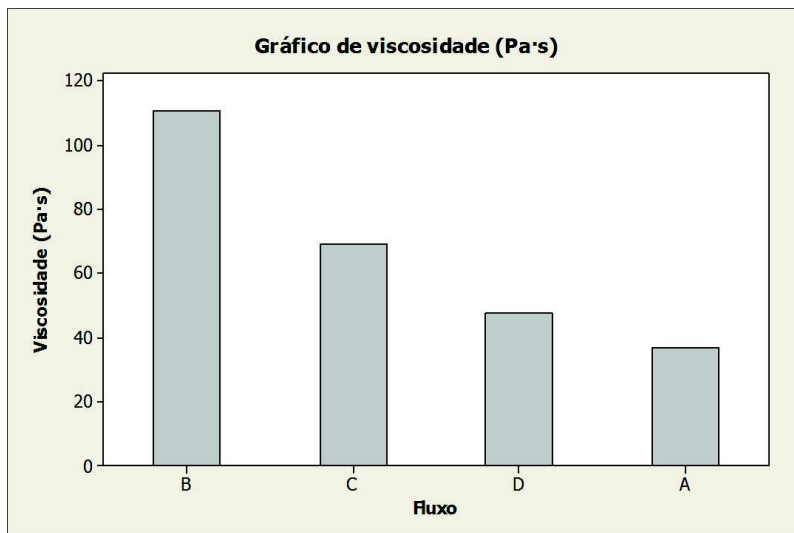
Fluxo	pH
A	4,20
B	8,23
C	6,39
D	6,08

Como citou-se na seção 2, revisão bibliográfica, uma característica importante para um fluxo de solda é seu comportamento ácido, assim nesta avaliação foi evidenciado que o fluxo A segue este padrão que foi possível verificar nas análises seguintes nos testes práticos.

4.3.2 Viscosidade

Foram obtidos como resultados do ensaio de reometria de placas paralelas a tensão de cisalhamento, viscosidade e torque em função da taxa de cisalhamento. Foram extraídas das tabelas de dados presentes no relatório de ensaio 899/16 do Centro Tecnológico de Polímeros Senai, onde foram realizados os ensaios, apenas a informação de viscosidade. Os demais dados foram armazenados e podem servir como fonte para pesquisa futura. Os resultados da viscosidade são apresentados graficamente na Figura 37 e resumidos na Tabela 13.

Figura 37 – Comparativo da viscosidade em forma gráfica



Fonte: Adaptado pelo autor com base no relatório de ensaio 899/16

Observou-se que as características de pH e viscosidade para os fluxos analisados apresentaram uma relação direta onde o fluxo B, mais viscoso, obteve o maior valor de pH e na sequência os fluxos C, D e A seguiram o mesmo comportamento. Analisando apenas o fluxo B na Figura 37, foi possível afirmar que foi o mais viscoso, ofereceu mais resistência ao cisalhamento, essa característica foi levada em consideração pois durante o abastecimento da máquina o fluxo é inserido em uma bandeja e nivelado através de rodos metálicos a cada aplicação.

Tabela 13 – Comparativo de viscosidades

Fluxo	Viscosidade (Pa·s)
B	110,42
C	69,08
D	47,64
A	36,92

Na sequência foi observado que os fluxos C e D obtiveram valores inferiores demonstrando mais facilidade para o nivelamento e finalizando com o fluxo A o menos viscoso dos 4 comparados. Esta facilidade de abastecimento e nivelamento atribuída aos fluxos menos viscosos pode contribuir negativamente durante o processo de aplicação de esferas.

O aspecto viscosidade pode ser ajustado no processo de acordo com as condições de cada fluxo, dessa maneira este fator não seria determinante, contudo um fluxo mais viscoso como o fluxo B oferece menos riscos na ocorrência de ponte entre esferas e *big balls* sendo a melhor opção para este quesito.

4.3.3 Número de acidez

O número de acidez ou índice de acidez foi obtido por titulometria com solução titulante de hidróxido de potássio (KOH) em metanol e os resultados são apresentados na Tabela 14. O número de acidez corresponde à quantidade (em mg) de base (KOH ou NaOH) necessária para neutralizar 1 g de fluxo. A amostra de fluxo B indicada na Tabela 14 com *, devido a sua cor vermelho acentuada, não foi possível concluir o ensaio utilizando indicador de fenolftaleína que indica o momento da neutralização com uma coloração rósea. Assim para fins de comparação foi utilizado o número de referência na documentação técnica do fabricante do fluxo B.

Tabela 14 – Comparativo do número de acidez

Fluxo	Número de acidez em mgKOH/g
A	60,8
B	70,0*
C	80,4
D	76,3

* Com base em análise do fabricante

Os fluxos A, C e D foram analisados pelo Instituto SENAI de inovação em engenharia de polímeros pela norma (ASTM-D7253-06, 2011) com indicador de fenolftaleína indicando a mudança de pH pela coloração vermelha. O fluxo B já apresenta coloração vermelho escuro não

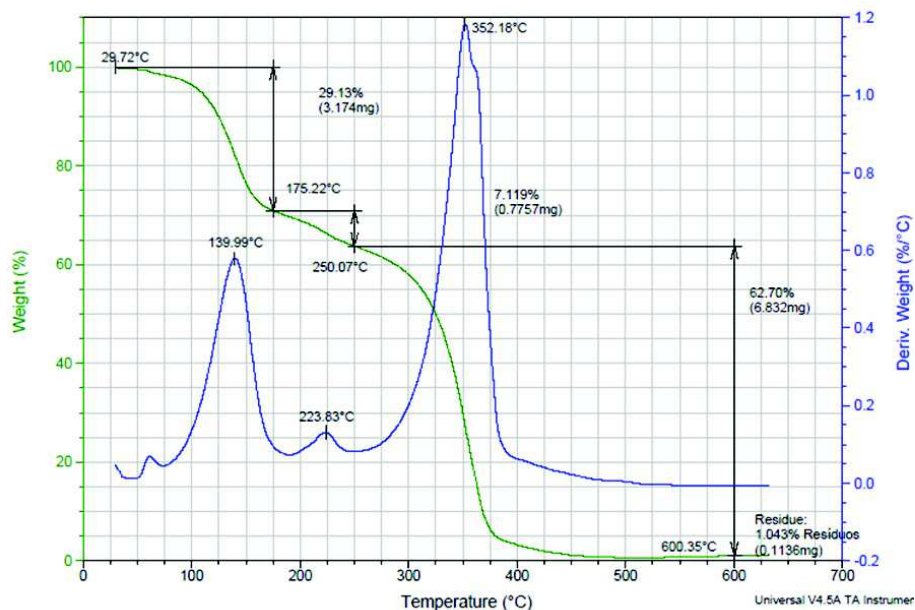
possibilitando a utilização do mesmo indicador. Neste caso foi utilizado o resultado dos testes do fabricante do fluxo B fornecidos via análise.

Com base nos resultados desta análise os fluxos C e D obtiveram o melhor resultado necessitando de maior quantidade de hidróxido de potássio para chegar a neutralização ao contrário do que foi previsto, pois o fluxo A obteve menor pH, assim foi avaliado que em sua composição C e D possuem uma substância que age como tampão impedindo a neutralização que foi sugerida a identificação em análises futuras.

4.3.4 Termogravimetria

Foram feitas análises termogravimétricas das 4 amostras de fluxo e confirmadas em duplicata, foram utilizadas em atmosfera de ar sintético e de nitrogênio. Como efeito da atmosfera em nitrogênio espera-se que no momento de soldagem os efeitos dos agentes oxidativos seja reduzido. Iniciando pelo fluxo A em atmosfera de ar sintético, conforme a figura 38, pode-se observar que na fase inicial até 100°C o fluxo apresentou baixa perda de massa próximo de 3,7%.

Figura 38 – Termogravimetria Fluxo A em atmosfera de ar sintético



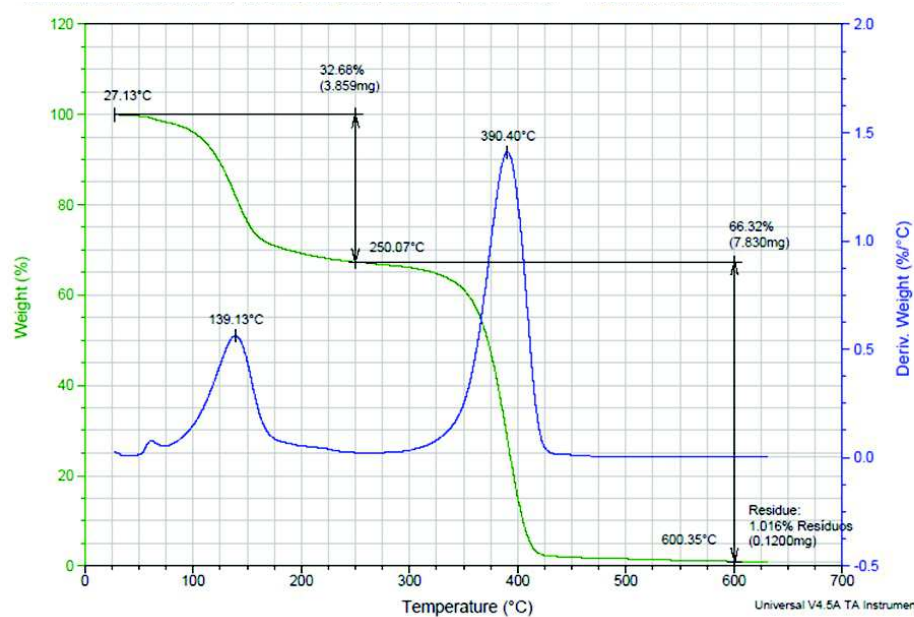
Fonte: Relatório de ensaio 867-16

Após a faixa de 100 °C houve uma queda de 23% até aproximadamente 150 °C. Entre 150 e 300 °C ocorreu uma diminuição da taxa de perda de massa que pode ser benéfica ao processo uma vez que o ponto de fusão da solda é próximo de 217 °C, neste ponto obteve-se como resultado 32,75% de perda.

Após 300 °C observou-se uma curva com taxa acentuada da perda de massa culminando em aproximadamente 3,2% de resíduos próximo aos 400 °C.

Repetindo a análise, porém em atmosfera de nitrogênio, conforme gráfico 39, pode-se observar que na fase inicial até 100 °C o fluxo A apresentou 3,76% de perda de massa. Após a faixa de 100 °C houve uma queda de 23% de massa até aproximadamente 150 °C. Entre 150 e 300 °C ocorreu uma aparente estabilização da percentual de perda de massa, se comparado com a análise anterior, de ar sintético, o descolamento ocorreu em aproximadamente 180 °C onde ambos já haviam perdido cerca de 30% da massa total.

Figura 39 – Termogravimetria Fluxo A em atmosfera de nitrogênio.

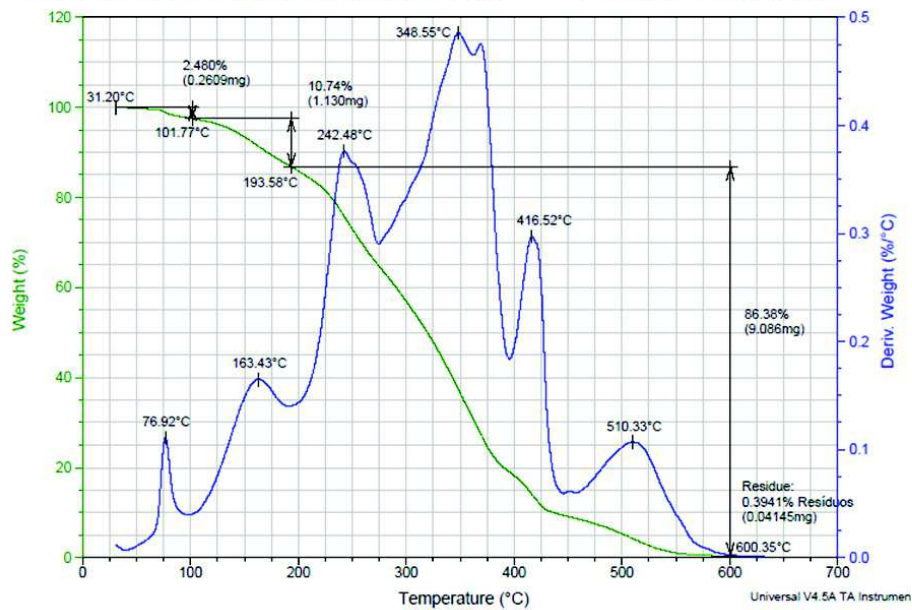


Fonte: Relatório de ensaio 867-16

Em 217 °C que é o ponto de fusão da liga metálica da esfera de solda o fluxo em atmosfera em nitrogênio possuía 1,25% mais massa que o anterior em ar. Essa estabilização pode permitir uma ação mais prolongada da proteção do fluxo aos agentes oxidantes. Após 350 °C observou-se uma curva com taxa acentuada de perda de massa culminando em aproximadamente 17% de resíduos próximo aos 400 °C.

Analisando a curva de perda de massa do fluxo B em atmosfera de ar sintético, conforme Figura 40, pode-se observar que na fase inicial até 100 °C. O fluxo apresentou baixa perda de massa próximo de 4,5%, lembrando que está temperatura está próximo ao início da curva de aquecimento do forno de refusão.

Figura 40 – Termogravimetria Fluxo B em atmosfera de ar sintético.

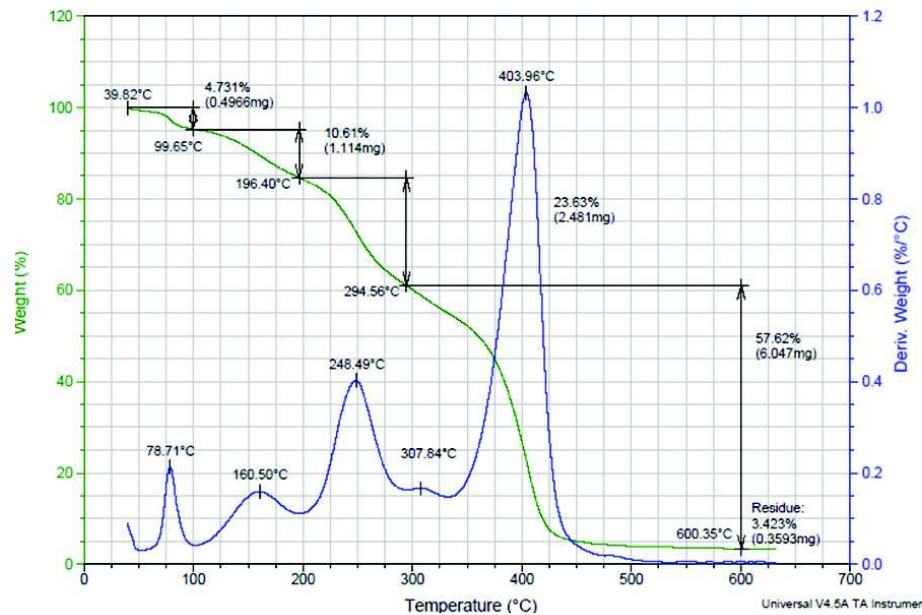


Fonte: Relatório de ensaio 867-16

Após a faixa de 100 °C houve uma queda de 8,65 % até aproximadamente 150 °C. Entre 150 e 300 °C a taxa de perda manteve-se praticamente constante, aos 217 °C já havia se perdido 18,3 % da massa inicial de fluxo. Após 300 °C queda acentuou-se e a perda chegou a 82,7 % próximo aos 400 °C.

Analisando o ensaio do Fluxo B, porém em atmosfera de nitrogênio, conforme Figura 41, podemos observar que na fase inicial até 100 °C o fluxo B apresentou 5,2% de perda de massa. Após a faixa de 100 °C houve uma queda de 10,55% de massa até aproximadamente 150 °C.

Figura 41 – Termogravimetria Fluxo B em atmosfera de nitrogênio.

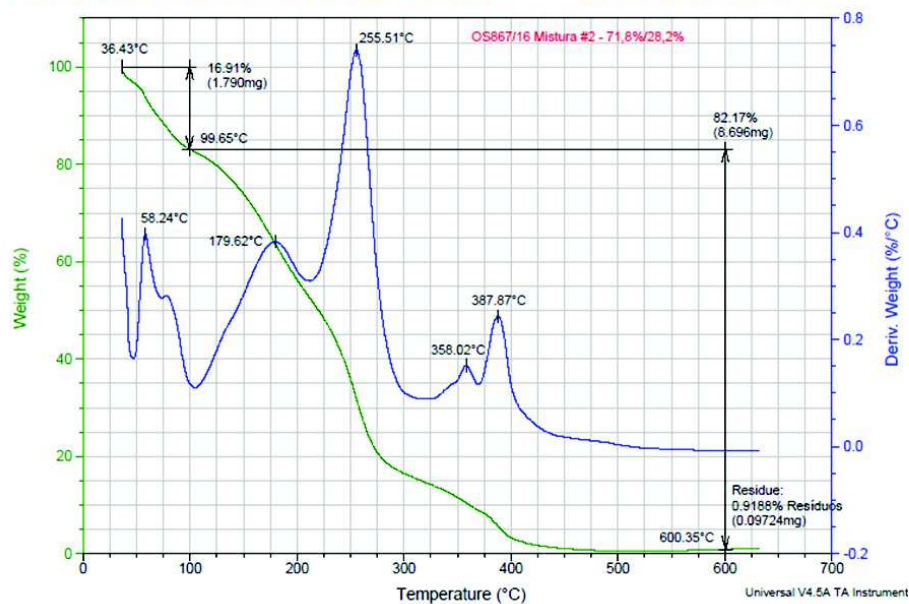


Fonte: Relatório de Ensaio 867-16

Entre 150 e 300 °C a taxa de perda manteve-se e comparado com a análise anterior em ar sintético o descolamento ocorreu em aproximadamente 275 °C onde ambos já haviam perdido cerca de 27,5% da massa total. Em 217 °C que é o ponto de fusão da liga metálica da esfera de solda, o fluxo em atmosfera em nitrogênio apresenta-se 1,67% a menos de massa que o anterior em ar, praticamente idênticos. Após 350 °C a perda acumulada para atmosfera em nitrogênio chegou a 50% , 15% a mais que o mesmo material em ar sintético. Restaram 16% de resíduos próximo aos 400 °C.

O resultado da análise do fluxo C em atmosfera de ar sintético, apresentado na Figura 42, nos mostrou que na fase inicial até 100 °C o fluxo apresentou perda de 17,9% de massa, devido a sua baixa complexidade era de se esperar que inicialmente grande parte do material fosse perdido no processo de refusão aqui simulado. Após a faixa de 100 °C houve uma queda de 28,6% de massa até aproximadamente 150 °C, praticamente o mesmo valor dos outros modelos testados, entre 150 e 300 °C a maior parte da massa foi perdida em torno de 84,3%.

Figura 42 – Termogravimetria Fluxo C em atmosfera de ar sintético.



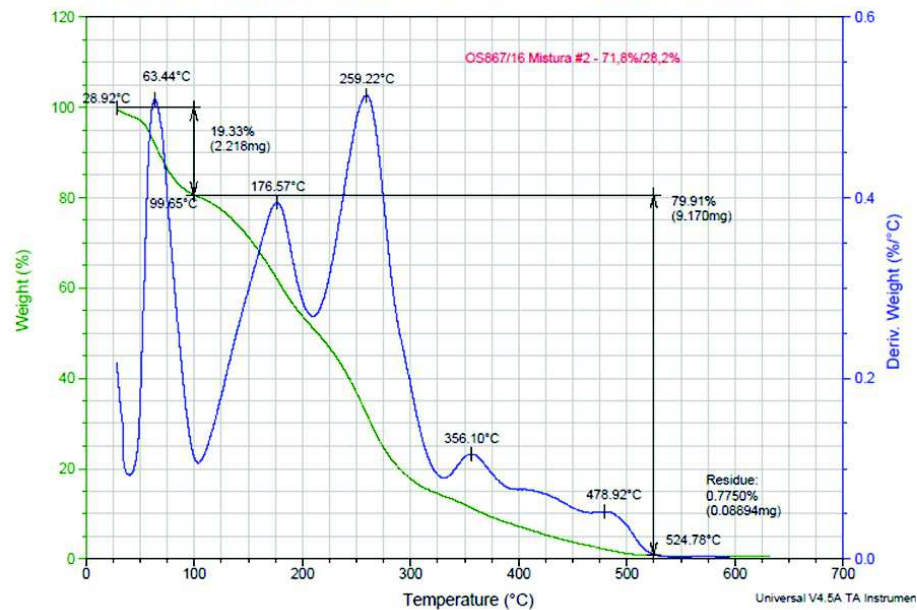
Fonte: Relatório de ensaio 867-16

No ponto de fusão da solda próximo de 217 °C já havia sido perdido 51,8%, duas vezes mais que o fluxo B e uma vez e meia mais perda que o fluxo A. Após 300 °C a curva da perda tornou-se mais estável e aos 400 °C ainda restavam 2,6 % de material como resíduos.

A análise do ensaio do Fluxo C, em atmosfera de nitrogênio, apresentada na Figura 43, constatou-se que na fase inicial até 100 °C o fluxo C apresentou 19,6% de perda de massa. Após a faixa de 100 °C houve uma queda de 28,3% de massa até aproximadamente 150 °C. Entre 150 e 300 °C a taxa de perda manteve-se e comparado com a análise anterior em ar sintético o descolamento ocorreu em aproximadamente 196 °C onde ambos já haviam perdido cerca de 44,0% da massa total.

Em 217 °C o fluxo em atmosfera em nitrogênio apresentou 1,5% mais massa que o anterior em ar, praticamente idênticos. Após 350 °C a perda acumulada para atmosfera em nitrogênio chegou a 90,3 % , e restaram 4,4 % de resíduos próximo aos 400 °C.

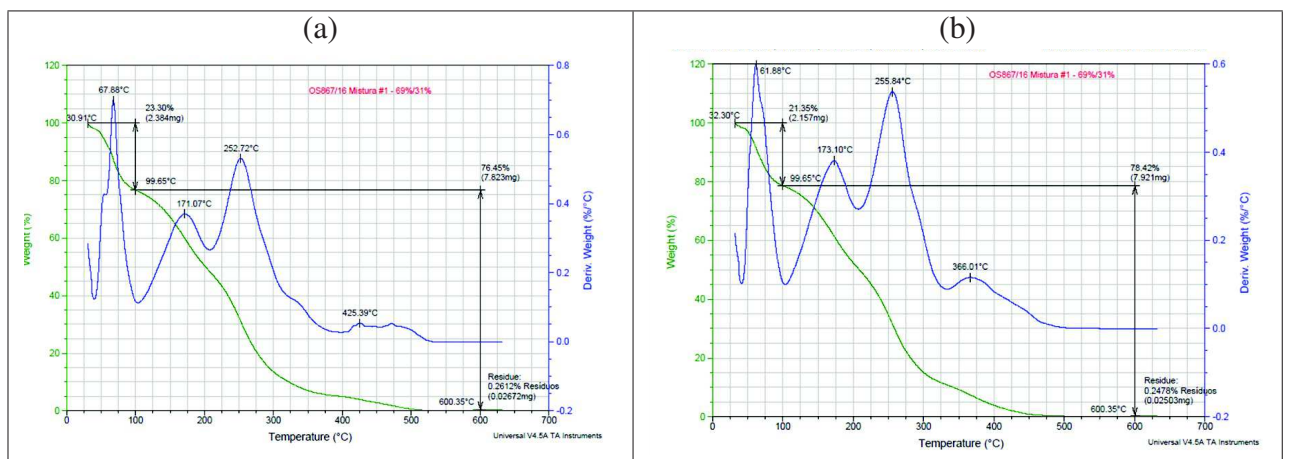
Figura 43 – Termogravimetria Fluxo C em atmosfera de nitrogênio.



Fonte: Relatório de ensaio 867-16

O fluxo D em atmosfera de ar sintético foi analisado e teve seu comportamento de acordo com o gráfico da Figura 44 (a), paralelamente a amostra em atmosfera de nitrogênio apresentou resultados muito similares conforme pode-se verificar no gráfico mostrado na Figura 44 (b).

Figura 44 – Termogravimetria Fluxo D em atmosfera (a) de ar sintético e (b) de Nitrogênio



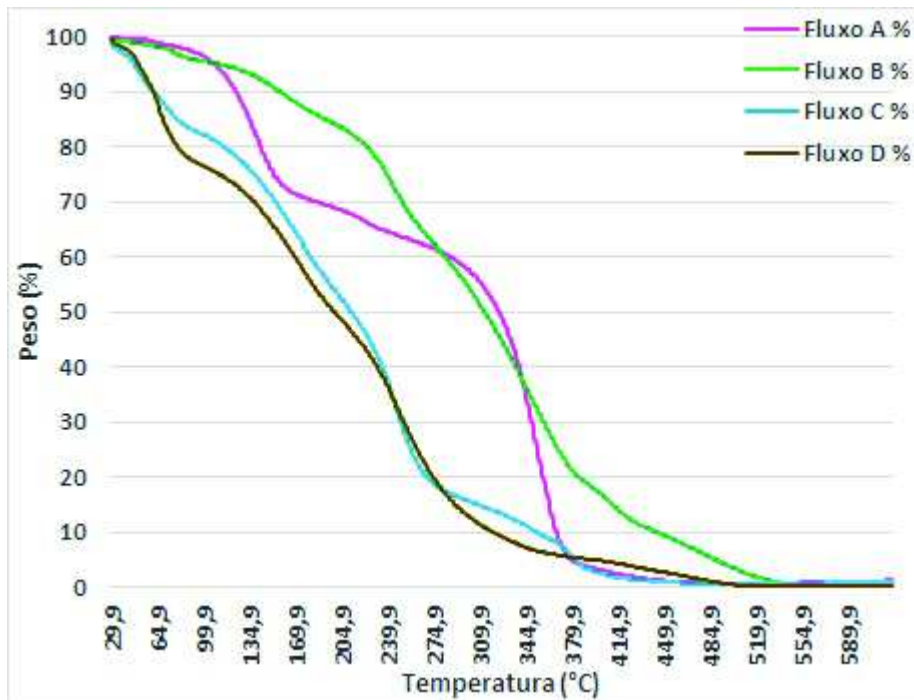
Fonte: Relatório de ensaio 867-16

Até os 100 °C o fluxo apresentou perda de 23,3 % de massa, lembrando que esta amostra possui menos fluxo em pasta na sua composição e a parte líquida sendo mais volátil foi o fato principal para este resultado. Após a faixa de 100 °C houve uma queda de 32,6 % de massa até aproximadamente 150 °C, o maior encontrado até agora entre as amostras. Entre 150 e 300 °C a maior parte da massa foi perdida em torno de 86,4 %. No ponto de fusão da solda próximo de

217 °C já havia sido perdido 54,1%. Após 300 °C a curva da perda tornou-se mais estável e aos 400 °C ainda restavam 4,9 % de material como resíduos.

Foram comparados os ensaios em atmosfera de ar sintético, através do gráfico mostrado na Figura 45 que sobrepõe as curvas de perda de massa dos fluxos A, B, C e D. Com este artifício foi possível observar as características do perfil de perda de massa de cada material.

Figura 45 – Sobreposição TGA em atmosfera ar sintético.



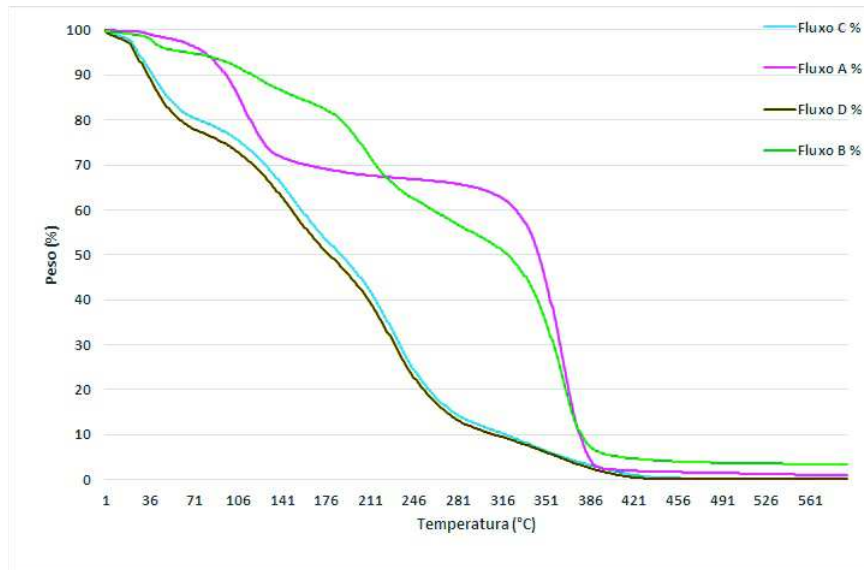
Fonte: Relatório de Ensaio 867-16

Pode-se salientar a redução na taxa de perda apresentada pelo fluxo A entre 150 e 400 °C. Os fluxos C e D apresentaram uma perda brusca até 100 °C entre 18 e 23 %. O fluxo B apresentou maior percentual de resíduos a 400 °C, salientando que o comportamento da taxa de perda de massa do fluxo B foi o mais linear.

Na presença de ar sintético já foi possível identificar a formação de um patamar pelo fluxo A na faixa de temperatura onde a perda de massa foi mais estável. Na zona líquida das esferas de solda o fluxo B foi o que estava presente em maior quantidade com 81,67% contra o fluxo A com 67% seguidos de C e D entre 45 e 50%.

Como forma de comparação para os ensaios em atmosfera de nitrogênio, foi criado o gráfico mostrado na Figura 46 que sobrepõe as curvas de perda de massa dos fluxos A, B, C e D. Desta maneira é possível identificar as diferenças de comportamento com a variação da temperatura de cada material.

Figura 46 – Sobreposição TGA em atmosfera de nitrogênio.



Fonte: Relatório de Ensaio 867-16

Pode-se salientar o patamar apresentado pelo fluxo A entre 150 e 400 °C. Os fluxos C e D foram os que apresentaram maior perda de massa até 100 °C com 23 %. Os fluxos A e B apresentaram maior percentual de resíduos a 400 °C, salientando que o comportamento da taxa de perda de massa do fluxo B foi o mais linear.

A inclusão do nitrogênio foi representativa para os fluxos A e B aumentando a faixa de temperatura onde a perda de massa foi mais estável que chamamos de patamar conforme mostrado na tabela 15 principalmente na faixa entre 150 °C e 300 °C.

Tabela 15 – Tabela de perdas de massa nos TGA's

Ensaio	Até 100°C	100°C a 150°C	217°C	150°C a 300°C	Até 400°C
Fluxo A em Ar	3,70%	19,76%	32,75%	18,68%	96,74%
Fluxo A em N2	3,62%	19,08%	31,50%	11,15%	82,29%
FLuxo B em Ar	4,50%	4,12%	18,33%	36,22%	82,65%
Fluxo B em N2	4,72%	4,12%	17,84%	30,98%	72,93%
Fluxo C em Ar	17,00%	9,19%	49,14%	57,35%	96,73%
Fluxo C em N2	19,64%	8,93%	50,30%	55,29%	95,61%
Fluxo D em Ar	23,32%	9,30%	54,13%	53,79%	95,07%
Fluxo D em N2	22,13%	8,88%	52,91%	54,03%	96,12%

Fonte: Elaborado pelo autor

Como avaliação geral de todas análises termogravimétricas realizadas foi verificado como característica desejável a ocorrência de um patamar de estabilização de perda de massa durante a

zona líquida da solda conforme resultados do fluxo A que apresentou melhor desempenho nesta análise.

4.4 Resultado dos testes de produção

4.4.1 Refusão - Inspeção visual

Para realização dos testes produtivos, os fluxos foram abastecidos na máquina de aplicação de fluxo e esferas, o fluxo A e B são apropriados para o uso nas máquinas de aplicação de fluxo e esferas e não foi encontrado nenhum problema durante o processo de aplicação, no posicionamento de esferas, bem como a limpeza do sistema. Os fluxos C e D por sua vez foram uma tentativa de customização de um fluxo comercial nacional, porém foram observados problemas para fabricação das amostras. Neste processo outra característica dos fluxos C e D contribuiu negativamente, o fato de serem parcialmente solúveis em água, no processo de limpeza tradicional é utilizado apenas água DI e panos de limpeza, e neste caso foi necessário a utilização de água quente a 40 °C, sabão neutro e álcool para finalização da limpeza. Mesmo com estas dificuldades as amostras com fluxo D foram finalizadas, porém não foi dada continuidade aos testes com o fluxo C para evitar danos e potencial contaminação da máquina impactando na produtividade e qualidade dos produtos.

O primeiro substrato com fluxo D e esferas alinhadas foi fabricado sem problemas tanto na aplicação de fluxo como de esferas, entretanto no teste com esferas desalinhadas, a ferramenta de aplicação de esferas foi contaminada e por esse motivo rejeitada pela inspeção da máquina por trazer mais esferas que o necessário e nas posições incorretas. Por causa disso, foi necessário desmontar o ferramental do equipamento e limpar as partes em contato com fluxo.

Após a refusão e lavagem foi realizada inspeção visual nas amostras A, B e D com auxílio do microscópio óptico e utilizando o seguinte critério com relação a aparência da solda, as esferas consideradas "Boas" apresentam aspecto cristalino sem deformações. No aspecto resíduos o resultado "Bom" foi não apresentar nenhum resíduo na superfície da PCB, a classificação "médio" para ocorrência de resíduos apenas ao redor das esferas e "ruim" para resíduos em outras áreas da PCB conforme resultados são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Avaliação da refusão

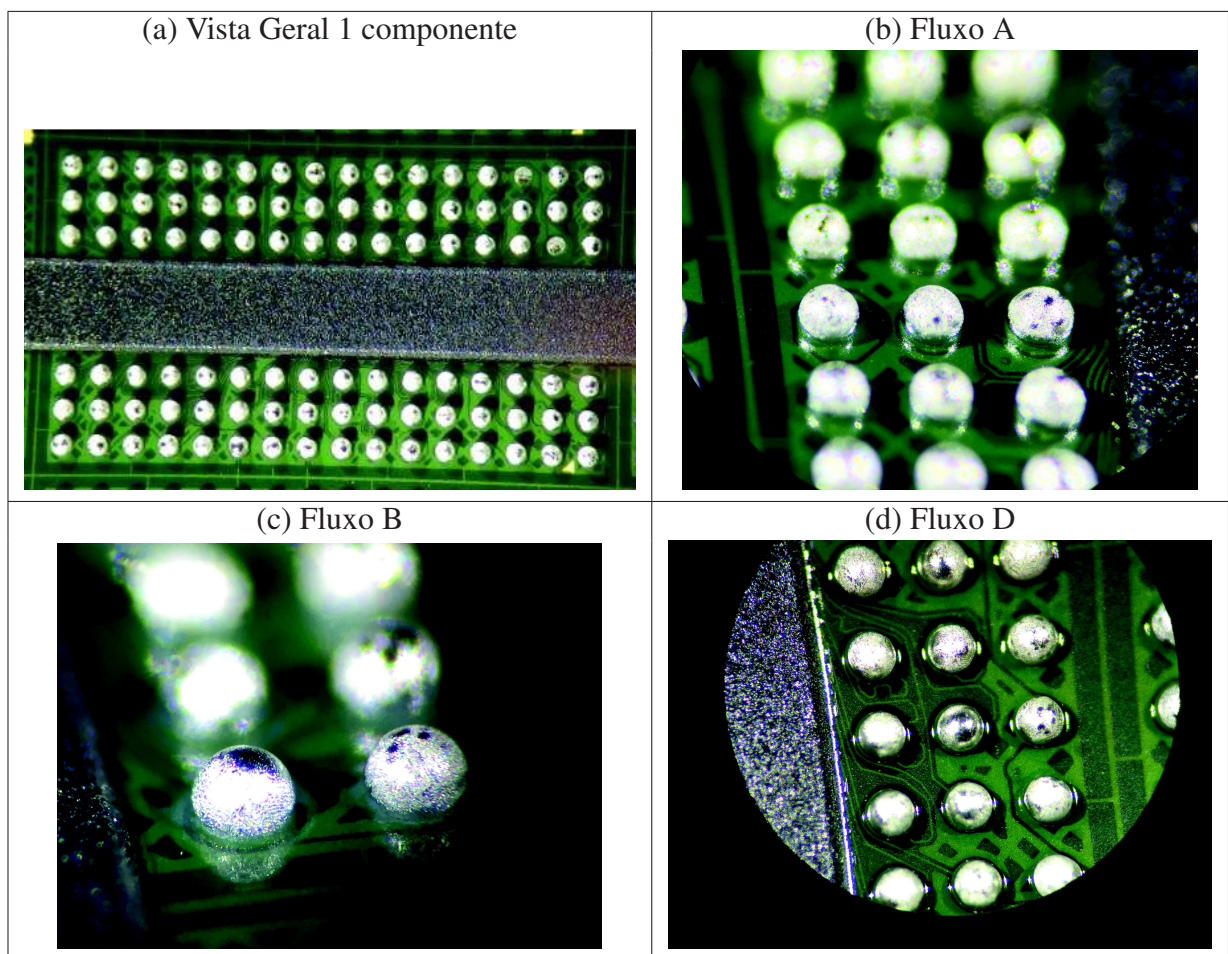
Fluxo	Aparência	Resíduos
A	Boa	Bom
B	Boa	Médio
D	Boa	Ruim

Critério: Bom, Médio e Ruim

Na Figura 47 (a) foi apresentado uma visão geral de 1 componente com 96 esferas posicionadas de forma e tamanho correto para referência, no item (b) uma amostra da solda do fluxo A que apresentou boa molhagem e poucos resíduos, já o item (c) apresentou-se o fluxo B também com boa aparência e soldabilidade mas com resíduo ao redor das esferas. O fluxo D representado no item (d) apresentou bom aspecto visual e resíduos fora da área das esferas.

Avaliando a refusão observou-se o fluxo A com melhor desempenho em aparência da solda e resíduos após a lavagem.

Figura 47 – Aspecto visual das esferas de solda posicionadas corretamente



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.4.2 Performance para realinhamento das esferas

Finalizadas as análises com processo padrão de fabricação, aplicando o fluxo normalmente e com as esferas alinhadas, foi dada sequência nos testes para verificação da performance para realinhamento de esferas. Para tal foi ajustado na máquina as coordenadas de posicionamento das esferas para 50% de deslocamento colocando-as na extremidade do *pad* assim após a refusão, lavagem e inspeção visual foi possível resumir os dados conforme as tabelas 18 e 17.

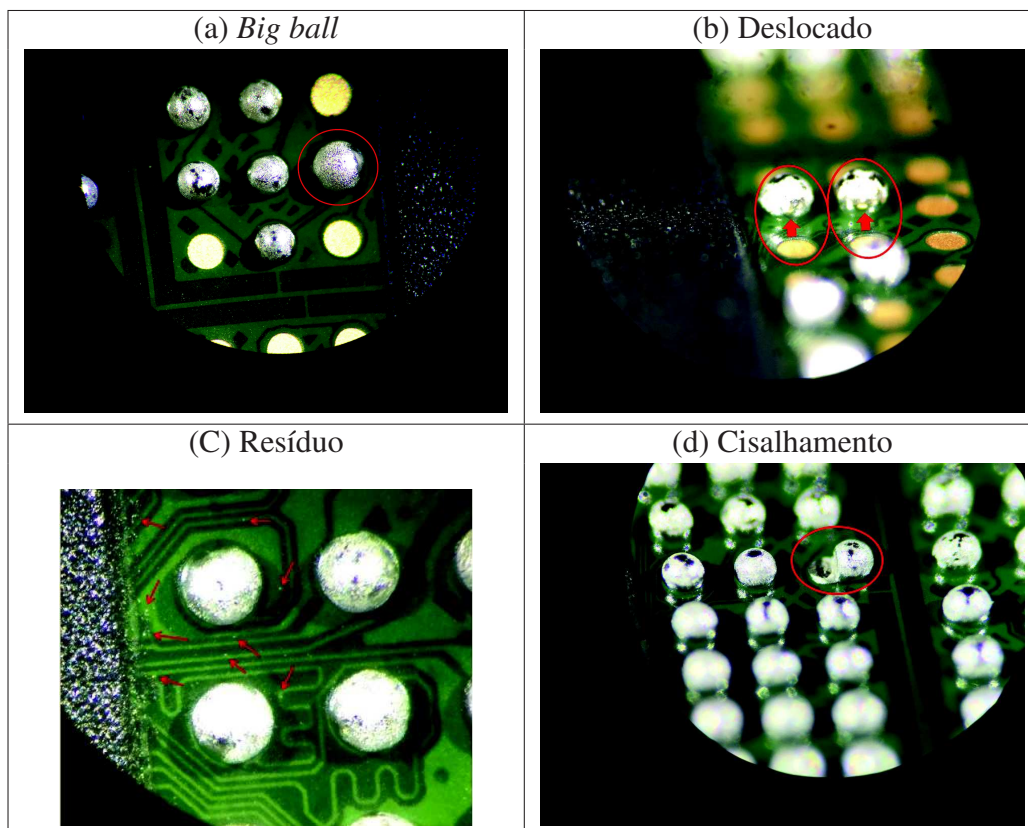
Na tabela 17 foi possível verificar o percentual de defeitos encontrados dos modos de falha *big ball*, deslocadas e sem esferas. O fluxo A apresentou desempenho no quesito *big ball* com 10,23%, em compensação obteve o maior resultado com relação ao deslocamento de esferas. O fluxo B conseguiu o menor percentual de falhas do tipo *big ball* com 4,40% e o maior percentual de *pads* sem esferas.

Tabela 17 – Resultado da soldagem de PCB's com esferas desalinhadas

Fluxo	Big Ball(%)	Deslocadas(%)	Sem esferas(%)
A	10,23	0,71	80,02
B	4,40	0,90	94,03
D	17,41	27,55	51,15

Esse resultado mostra que o fluxo B dentre os 3 comparados falhou em uma função básica de qualquer fluxo de solda que seria de manter as esferas no lugar em condições de desalinhamento deliberado por parte da máquina. Seguindo o comparativo, observou-se que com 51,15% de *pads* sem esferas o fluxo D se sobressaiu dos demais.

Figura 48 – Evidências encontradas com Fluxo A

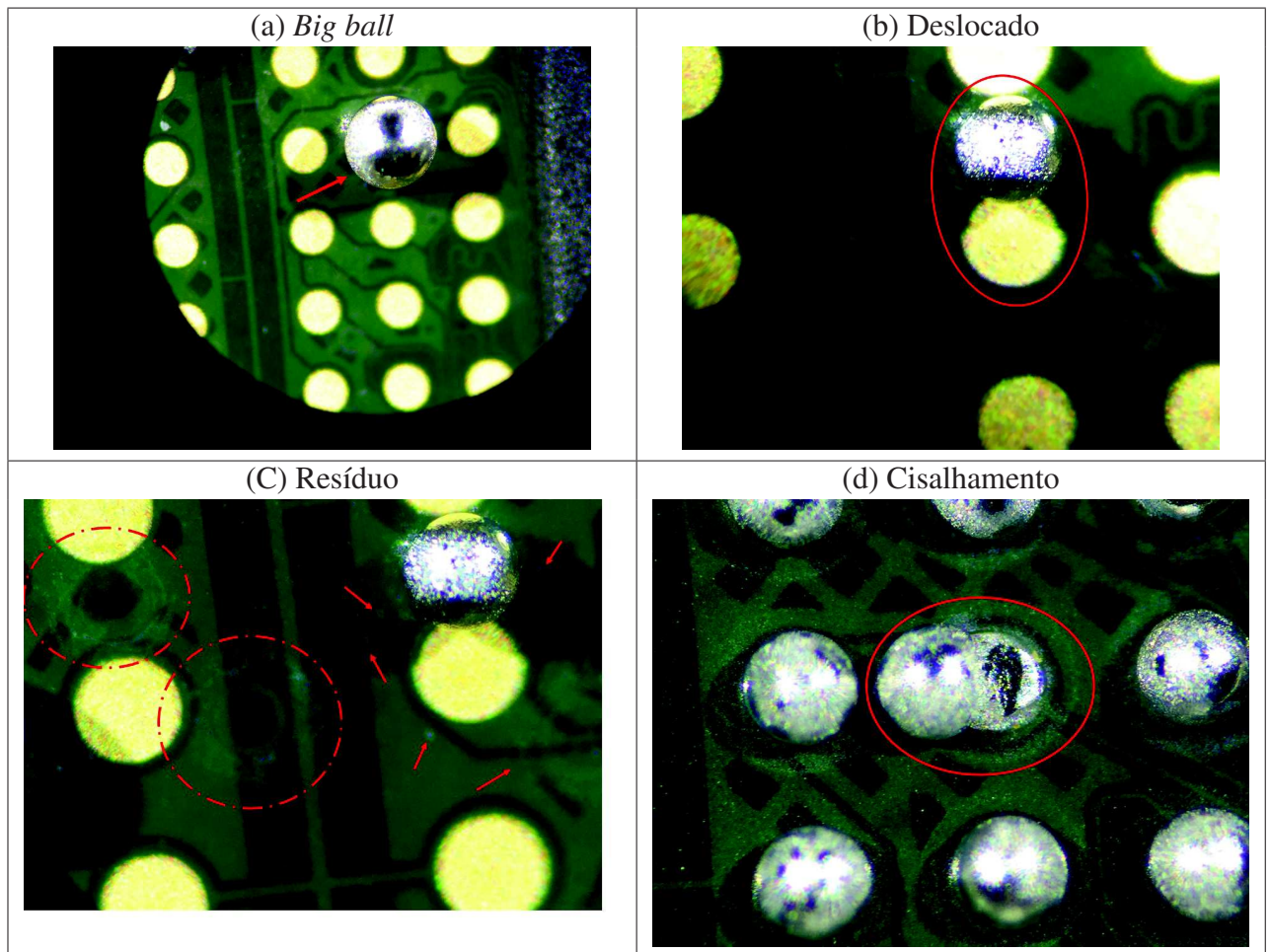


Fonte: Elaborado pelo Autor

Nos substratos com o fluxo A fabricados com as esferas deslocadas pode-se observar

os exemplos de defeitos mostrados no Figura 48, no item (a) identificou-se um exemplo de *big ball* onde duas ou mais esferas adjacentes se conectaram quando uma delas na fase líquida da solda migrou em sua direção. Também pode-se identificar no item (b) esferas deslocadas pois mantiveram sua posição inicial após a soldagem, no item (c) fica demonstrado que o fluxo A não apresentou resíduos após a lavagem.

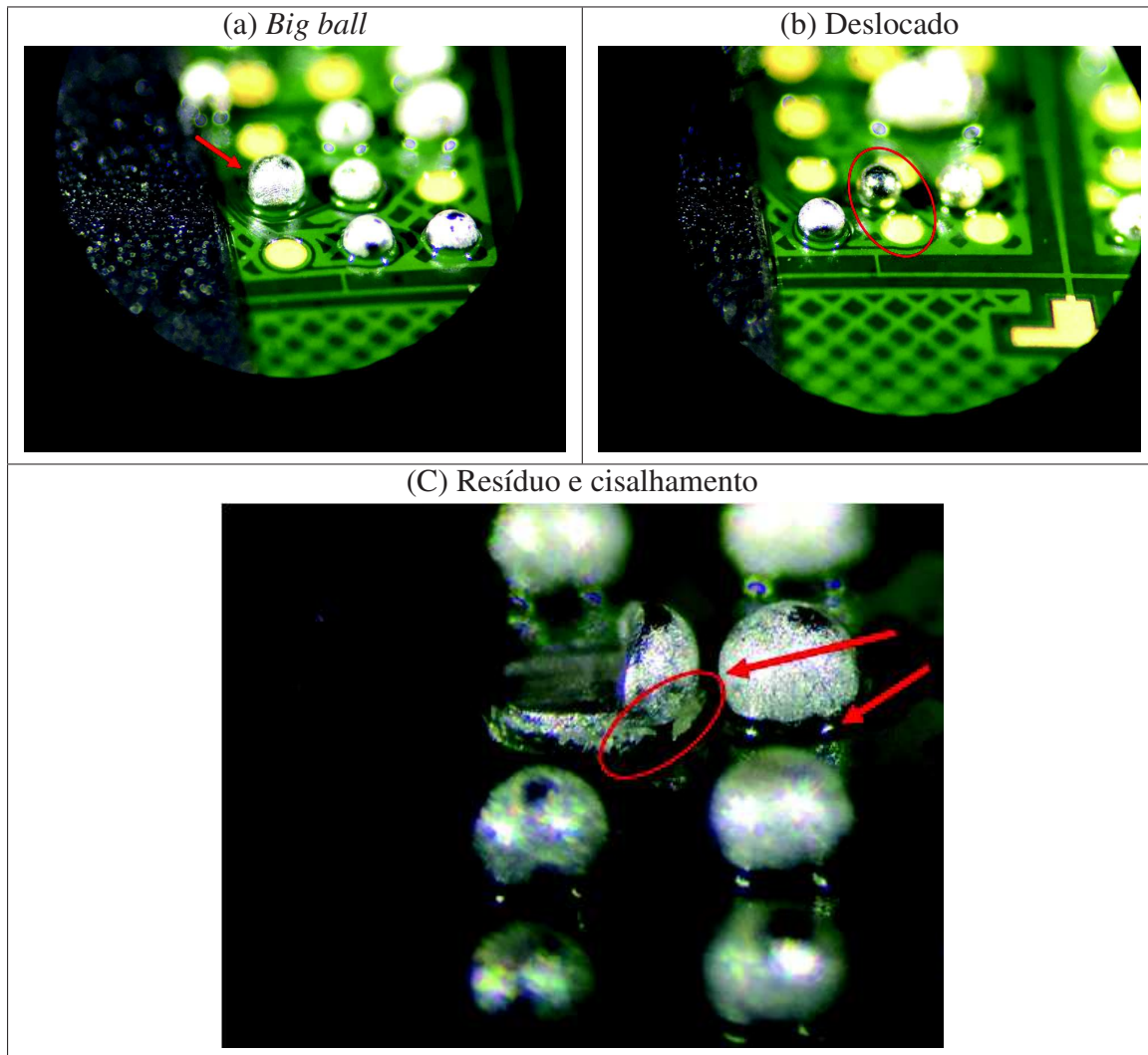
Figura 49 – Evidências encontradas com Fluxo B



Fonte: Elaborado pelo Autor

Interpretando-se os resultados da figura 49 observou-se um *big ball* no item (a), uma esfera deslocada no item (b), resíduos após a lavagem a esquerda no item (c) e finalmente um exemplo de esfera submetida ao teste de cisalhamento no item (d) apresentando padrão regular de fratura e vale ressaltar o resíduo circular esbranquiçado ao redor do mesmo *pad.*

Figura 50 – Evidências encontradas com Fluxo D



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com a interpretação da Figura 50 foi possível identificar no item (a) um *big ball* e alguns *pad open*, no item (b) 2 esferas deslocadas em foco e no item (c) na indicação da flecha vermelha a direita observa-se uma esfera com resíduo de fluxo na base e na esquerda circulado de vermelho o mesmo resíduo mas após o teste destrutivo, é possível perceber que o material se despenhou da esfera durante o teste destrutivo evidenciando a classificação ruim no quesito resíduos obtida pelo fluxo D.

Tabela 18 – Percentual de realinhamento

Fluxo	Percentual de esferas realinhadas (%)
A	9,58%
B	0,67%
D	3,89%

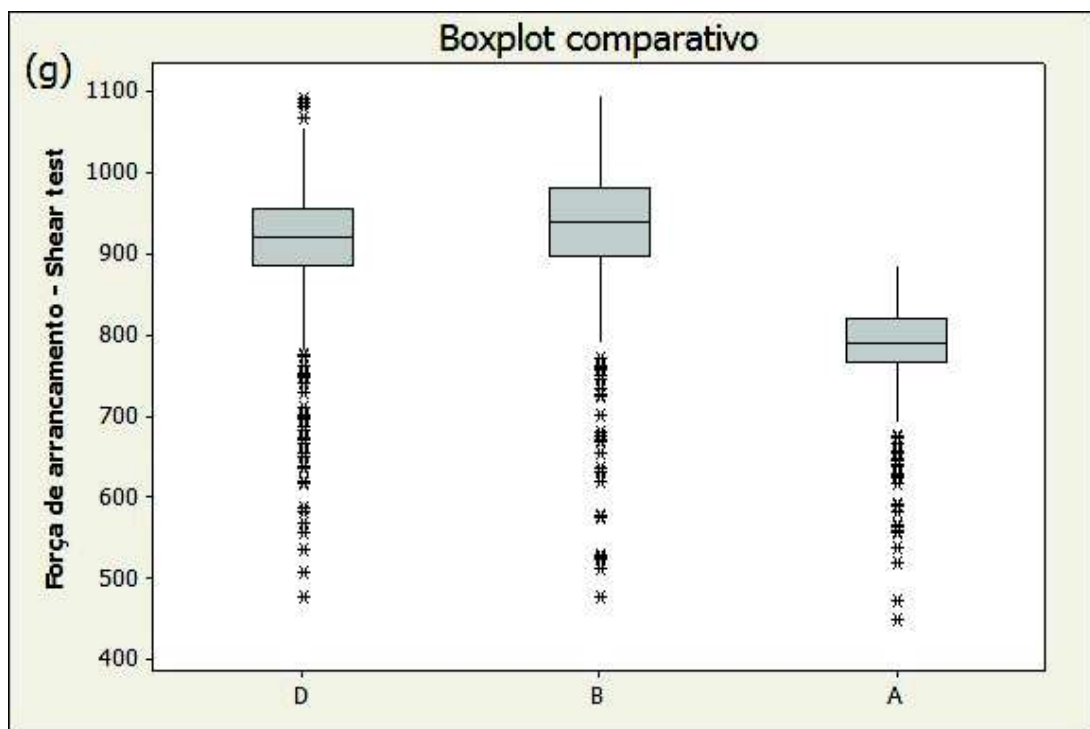
Concluindo um dos objetivos específicos deste trabalho, a tabela 18 apresenta o resultado da inspeção visual de aproximadamente 50 mil esferas após a refusão e lavagem dos substratos. O fluxo A conseguiu o maior percentual de realinhamento com 9,58% sendo o mais indicado para redução da ocorrência de defeitos, seguido pelo fluxo D com 3,89% e com o menor percentual de alinhamento o fluxo B com 0,67%.

4.4.3 Teste de cisalhamento

Os substratos soldados com esferas na posição correta e alinhada foram submetidos ao teste de arrancamento, *Ball shear test* através da máquina de ensaios mecânicos *Dage*. Como resultado após tratamento dos dados no programa estatístico Minitab versão 16 obtive-se o *Boxplot* mostrado na Figura 51.

A maior média de força de arrancamento foi do fluxo B com 948g, desconsiderando os valores atípicos, também apresentou a maior variação de 307g, identificou-se uma evidência do teste na figura 49 item (d), por outro lado o fluxo A apresentou média de 797 g com variação de 194 g onde observou-se um exemplo de esferas arrancadas na figura 48 item (d). O Fluxo D foi o único que apresentou *outliers* na parte superior com valores acima de 1055 g com média de 928 g. Para finalizar a análise dos testes de arrancamento foi recomendado como trabalhos futuros a realização de cortes em seção das esferas para análise da espessura de inter metálico.

Figura 51 – Boxplot comparativo da força de arrancamento ente A, B e D

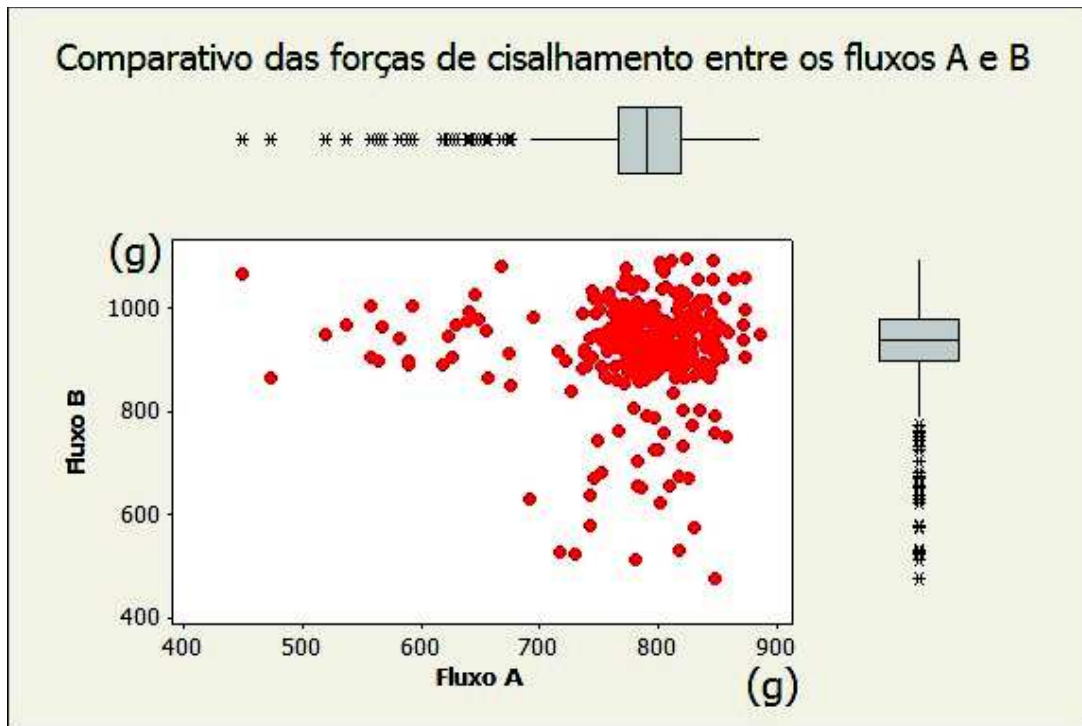


Fonte: Elaborado pelo autor

Um Comparativo entre os fluxo A e B com um gráfico de caixa e dispersão combinados

na figura 52 **observamos**, pela dispersão dos pontos observou-se a concentração nos valores acima de 700g de arrancamento sinalizados pelos pontos vermelhos. Foi utilizado 200g como valor de especificação mínimo para este teste em uma empresa de encapsulamento considerando o mesmo diâmetro da esfera e material do substrato.

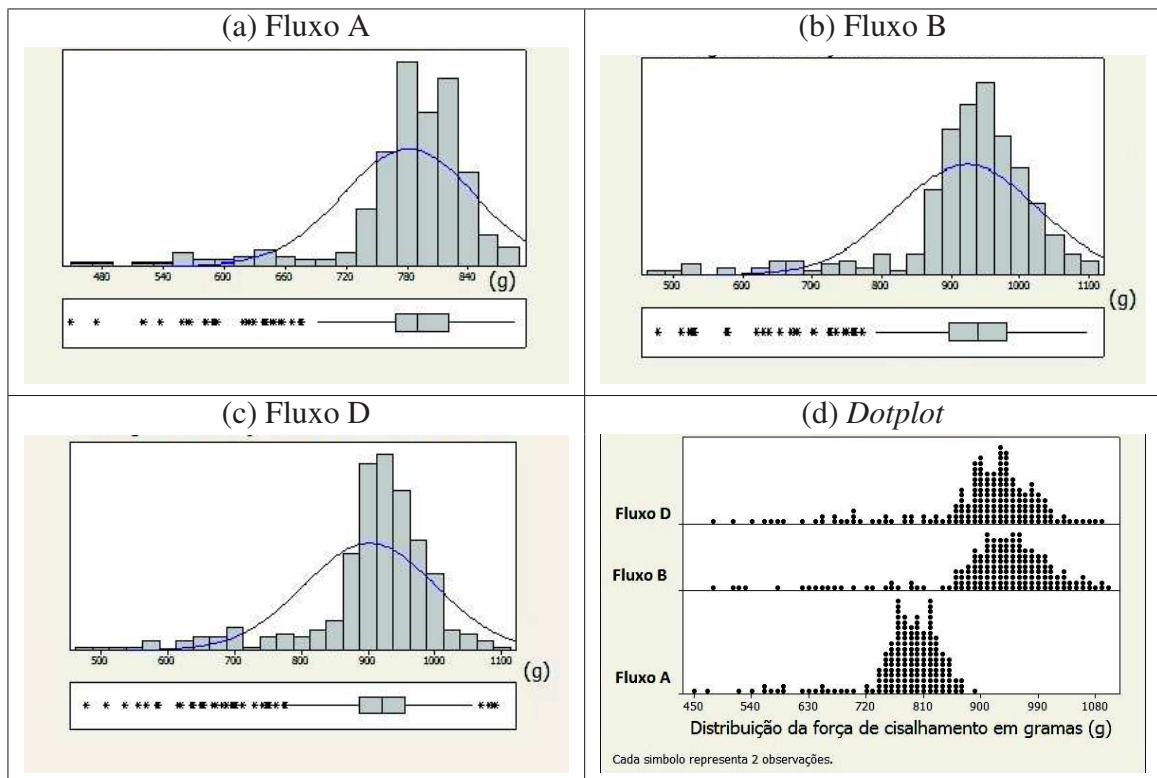
Figura 52 – Boxplot e dispersão da força de arrancamento entre A e B



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando individualmente através de histograma a distribuição dos valores da força de arrancamento nos testes de cada fluxo de acordo com os gráficos da figura 53, pode-se confirmar no histograma os valores a esquerda das distribuições (a), (b) e (c) e uma sobreposição em (d) com gráfico de pontos com fluxo A mais agrupado entre 800g e 900g.

Todos os modelos de fluxo obtiveram bom resultado de forças de arrancamento acima do valor tradicional para uma fábrica de encapsulamentos, este item pode ser analisado futuramente para verificar se uma maior força de arrancamento possui maior intermetálico ou não. De acordo com as fotos dos testes de cisalhamento, não houve quebra da solda e as marcas deixadas nos *pads* indicam uma liga metálica macia minimizando possíveis fraturas.

Figura 53 – Histograma combinado com *boxplot*

Fonte: Elaborado pelo Autor

Um resumo das avaliações das características pode ser visto na tabela 19 considerando qual fluxo obteve melhor desempenho indicando a melhor opção para uma empresa de encapsulamentos.

Tabela 19 – Resumo das avaliações

Fluxo	Local	Custo	pH	Visc.	Acidez	TGA	Visual	Alinh.	Cisalh.
A			X			X	X	X	X
B				X					
D	X	X			X				

Local(seção 4.1), Custo(seção 4.2), pH(seção 4.3.1), Visc(seção 4.3.2), Acidez(seção 4.3.3), TGA (seção 4.3.4), Visual(seção 4.4.1), Alinh.(seção 4.4.2), Cisalh.(seção 4.4.3);

Fonte: Elaborado pelo Autor

Desta forma o fluxo A com base nas análises foi considerado a melhor opção para uma empresa de encapsulamentos pois foi melhor em 5 quesitos analisados. Outras análises complementares estão sugeridas em trabalhos futuros como cortes metalográficos e medições de camada inter metálica.

5 Conclusão

Neste trabalho foram identificadas propostas de melhoria com novos materiais disponíveis no mercado e após avaliação técnica durante o processo e estatística foi possível verificar se são compatíveis com a situação atual podendo constituir uma alternativa viável para o processo de soldagem de esferas cumprindo o objetivo geral desta dissertação de mestrado profissionalizante. Foi possível identificar os fornecedores atuantes no Brasil e, adicionando o aspecto financeiro ao trabalho, foram analisados o custo do material e seu custo logístico que inclui frete, seguro e despesas aduaneiras para uma comparação do material utilizado pela empresa de encapsulamentos e as possíveis opções levantadas dentro do trabalho.

Através de análises das características técnicas em laboratório foi possível caracterizar os fluxos antes da realização de testes funcionais cumprindo assim os objetivos específicos *a* e *b*. Finalizando estas análises propostas foi possível avançar para construção de uma metodologia padronizada de testes produtivos para comparação dos materiais aplicados ao processo de encapsulamento o que cumpre com os objetivos específicos *c* e *d*;

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Repetição das análises de perda de massa com auxílio de FT-IR para identificação da composição dos componentes principais dos fluxos de solda simulando um perfil de forno de refusão para solda SAC 305;
- Realização de corte metalográfico nas amostras deste trabalho para verificar a correlação de força de cisalhamento com espessura de intermetálico entre substrato e esferas;
- Estudo de variação do volume de fluxo aplicado com intuito de minimizar falhas de *big ball*;
- Avaliação do fator empenamento e a relação com os defeitos de processo.
- Ajuste dos equipamentos do processo para melhor desempenho com cada material proposto e realização de testes de confiabilidade para validação.

Referências Bibliográficas

ABNT-NBR-7353. *Soluções aquosas – Determinação do pH com eletrodos de vidro*. São Paulo, SP: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. Citado na página 56.

ASTM-D6370. *Standard Test Method for Rubber—Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA)*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 58.

ASTM-D7253-06. *Standard Test Method for Polyurethane Raw Materials: Determination of Acidity as Acid Number for Polyether Polyols*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 65.

BARBER, C. L. Soft Solder Fluxes - Practice and Theory. *The Journal of Physical Chemistry*, ACS Publications, Chicago, Ill, v. 29, n. 10, p. 1114–1117, 1937. ISSN 0022-3654. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

CUNNINGHAM, J. A. The Use and Evaluation of Yield Models in Integrated Circuit Manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, v. 3, n. 2, p. 60–71, 1990. ISSN 15582345. Citado na página 24.

DYKE, S. V.; CHOU, G. Editorial Contacts : The World Semiconductor Trade Statistics (WSTS) has published the final semiconductor market figures for 2014 WSTS Forecast Summary. p. 2015–2016, 2016. Citado na página 23.

ERICKSON, S. Precision flux deposition techniques for semiconductor applications. *IEEE/CPMT/SEMI 28th International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 2003. IEMT 2003.*, p. 1–3, 2003. ISSN 1089-8190. Citado na página 46.

HISERT, J.; MACKIE, A. The Evolution Revolution in FLux. *Advanced Packaging*, v. 16, n. 5, p. 28–32, 2007. Citado na página 27.

HUANG, X. H. X. et al. Characterization and analysis on the solder ball shear testing conditions. *2001 Proceedings. 51st Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.01CH37220)*, 2001. ISSN 0569-5503. Citado 4 vezes nas páginas 43, 44, 45 e 46.

HUSSAIN, J. Z. et al. Solder Ball Attach With Water Soluble Air Reflowable Tacky Fluxes. v. 5, n. 5, p. 697–703, 2015. Citado 9 vezes nas páginas 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 e 42.

IPC-9708. *Test Methods for Characterization of Printed Board Assembly Pad Cratering*. Bannockburn, Illinois: IPC, 2010. Citado na página 34.

J-STD-004. *Requirements for Soldering Fluxes*. Bannockburn, Illinois: IPC, 2011. Citado na página 48.

JESD22-B117A. *Solder Ball Shear*. Arlington, VA: Jedec Solid State Technology Association 2006, 2000. Citado na página 53.

MIL-STD-105E. *Sampling procedures and tables for inspection by attributes*. Washington, DC: Department of defense, 1989. Citado na página 60.

RYU, C. R. C. et al. Novel Approaches to Current BGA Packaging Challenges. *2008 10th Electronics Packaging Technology Conference*, p. 1–6, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 24, 33 e 34.

SY, H. G.; HSU, J.; JIMAREZ, M. New robust process improvement for BGA solder ball attach first pass yield. *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference, EPTC*, n. 65, p. 797–804, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 24, 31, 32, 33 e 34.

TRACY, D. P.; VARDAMAN, E. J. Global Semiconductor Packaging Materials Outlook. n. December, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 54.

TULKOFF, C.; DIEGO, S. Pad Cratering : Prevention , Mitigation and Detection Strategies. *IPC Apex Expo*, 2013. Citado na página 34.

VARDAMAN, E. J.; CROWLEY, R.; GOODMAN, T. The market for ball grid array packages. *Proceedings of 1995 Japan International Electronic Manufacturing Technology Symposium*, p. 205–207, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

WEIN, L. M. On the Relationship Between Yield and Cycle Time in Semiconductor Wafer Fabrication. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, v. 5, n. 2, p. 156–158, 1992. ISSN 15582345. Citado na página 24.

Índice

- AnSys v5.6, 44
- Ball Grid Array, 23
- Ball pull test, 33
- Ball shear test, 32
- Ball size, 25
- Becker, 49
- BGA, Ball grid array, 11
- Big ball, 76
- Boxplot, 41
- CAGR, 62
- Cooper with organic solderability preservative, 31
- Cu-OSP, 31
- Cycle Time, 24
- Dage, 79
- Downtime, 34
- DRAM, 47
- DRAM DDR3 4Gbitx8, 54
- Duksan Hi-Metal, 47
- Electroless nickel immersion gold, 31
- Enig, 31
- Erlenmeyer, 49
- Fine Pitch, 24
- Fluxo de solda, 11
- Imm Sn, 31
- Input/Output, I/O, 23
- Lead frame, 23
- Led, 54
- No-clean, 46
- Non-solder mask defined, 34
- NSMD, 34
- OSP, 34
- Package-On-Package (PoP), 34
- Pad, 24
- Pad open, 78
- PCBs, 32
- Pitch, 26
- PN, 47
- Printed Circuit Board, 24
- SAC305, 48
- SB003, 25
- Screen Printer, 31
- Semi.org, 49
- Simmtech, 47
- Solder Ball Attach, 23
- Solder Mask Defined, 32
- Solder on pad BGA, 31
- SoP, 34
- Spot Work, 30
- substrato, 47
- Surface mounted technology, 24
- TGA, 11, 42
- Tin immersion, 31
- Touchdown, 53
- World Semiconductor Trade Statistics, 23
- Yield, 24
- Zoom, 54

ENTREGA DA VERSÃO FINAL DE DISSERTAÇÃO

Eu, PROF. DR. WILLYAN HASENKAMP, autorizo o aluno(a) TIAGO DE FREITAS MACHADO a entregar a versão final da dissertação de mestrado, à secretaria do PPGEE, que foi por mim analisada e está de acordo com os apontamentos feitos pelos membros da banca de apresentação do referido aluno.

Prof. Dr. Willyan Hasenkamp
Orientador

São Leopoldo, RS, 14 de Novembro de 2016.