

**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**

JOÃO PEDRO GONÇALVES TREVIZAN

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
DA SUBSTITUIÇÃO DE FIOS DE OURO POR FIOS DE COBRE
EM MEMÓRIAS DRAM**

São Leopoldo

2016

João Pedro Gonçalves Trevizan

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
DA SUBSTITUIÇÃO DE FIOS DE OURO POR FIOS DE COBRE
EM MEMÓRIAS DRAM**

Trabalho de qualificação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Dr. José Vicente Canto
Coorientadora: Dra. Tatiane da Rocha

São Leopoldo
2016

T814e	<p>Trevizan, João Pedro Gonçalves</p> <p>Estudo da viabilidade técnica e econômica da substituição de fios de ouro por fios de cobre em memórias DRAM / por João Pedro Gonçalves Trevizan. – 2016.</p> <p>105 f.: il.; 30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Leopoldo, RS, 2016.</p> <p>“Orientação: Dr. José Vicente Canto; <u>coorientação</u>: Dra. Tatiane da Rocha”.</p> <p>1. <u>Wire Bonding</u>. 2. Fio de Cobre. 3. <u>Payback</u>. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.377.6</p>
-------	--

Catalogação na Publicação:
Bibliotecário Alessandro Dietrich - CRB 10/2338

AGRADECIMENTOS

Ficam registrados os agradecimentos ao Especialista Celso Peter, coordenador do itt CHIP UNISINOS, pelo apoio prestado para o desenvolvimento desta proposta e ao PADIS pelo apoio na forma de bolsa de estudos.

Agradecimentos especiais aos engenheiros de *wire bonding* YunBae Park e JunKwon Kim, que contribuíram muito com sua larga experiência para o desenvolvimento dos ensaios técnicos realizados na Hana Micron.

Também agradeço ao time de análise de falhas da empresa coreana, pelos tempo e esforços dedicados para realizar os ensaios solicitados, com agilidade e precisão.

RESUMO

Este estudo avalia uma proposta de substituição de fio de ouro por fio de cobre no processo de *wire bonding* em memórias DRAM DDR3 encapsuladas no Brasil. A viabilidade técnica da aplicação desta tecnologia para este componente foi testada na prática em uma empresa coreana, com a produção de amostras e verificação das características de qualidade das mesmas. Após otimização de parâmetros da primeira solda por DOE, foi possível obter resultados dentro das especificações do processo e semelhantes aos obtidos com o fio de ouro. Após a confirmação da viabilidade técnica, foi verificada a viabilidade econômica deste projeto, calculando o custo de implementação e estimando o tempo para retorno do investimento através dos métodos de *payback* simples e descontado. Devido à necessidade de aquisição de máquinas soldadoras de custo elevado, o *payback* descontado resultou em seis anos e onze meses, o que representa um risco alto considerando o dinamismo do mercado de semicondutores e a eminente substituição do encapsulamento BOC pela tecnologia de *flip chip*.

Palavras-Chave: *Wire Bonding. Fio de Cobre. Payback.*

ABSTRACT

This study evaluates the proposal of gold wire for copper wire replacement in the wire bonding process used in DRAM DDR3 memory packaging in Brazil. The technical feasibility of applying this technology to the component has been verified in practice on a Korean company, with the production of samples and the examination of quality characteristics, such as bond pull force and bond shear strength, intermetallic compound and bonding pad structure. After parameters optimization of the first bond by DOE, it was possible to obtain results within process specifications and similar to those obtained with the gold wire. After confirming the technical feasibility, the economic viability of this project was verified by calculating the cost of implementation and the necessary time to recover the investment, through the simple and discounted payback methods. Because of the need of purchasing costly wire bonding machines, the discounted payback resulted in six years and eleven months, which represents a high risk investment, considering the semiconductor market dynamism and the imminent replacement of BOC package by flip chip technology.

Key-Words: *Wire Bonding. Copper Wire. Payback.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Preço do ouro e do cobre entre 2005 e 2015.....	27
Figura 2: Areas de aplicações dos componentes microeletrônicos.	29
Figura 3: Passos para realizar a solda termossônica.....	32
Figura 4: Geometria do capilar.	33
Figura 5: Diferentes acabamentos de superfície de capilar.	34
Figura 6: Desenho do eletrôdo formando a FAB	34
Figura 7: Aumento da venda de fios de cobre e esmaltados.	39
Figura 8: Imagem de uma FAB com superfície lisa e regular.....	40
Figura 9: Óxidos na superfície e formas de FAB obtidas	41
Figura 10: <i>Al Splash</i> ocorrido durante solda com fio de cobre.	45
Figura 11: Distribuição de paládio sobre FAB.....	46
Figura 12: Exemplo de fine pitch stacking packaging.	49
Figura 13: Janela de processos para 2nd bond (Cu e PdCu).	50
Figura 14: Fio de cobre corroído pela umidade.....	50
Figura 15: IMC e Kinkerdall Voids.....	51
Figura 16: Evolução do Stitch Pull Test (Cu e PdCu).....	51
Figura 17: FABs obtidas com nitrogênio como gás inerte.	67
Figura 18: Gráfico de Pareto para seleção dos fatores do DOE.	72
Figura 19: Fatores com influencia significativa sobre as variáveis de resposta.....	75
Figura 20: <i>Counter Profiler</i> para o fator tempo com valor mínimo.....	76
Figura 21: <i>Counter Profiler</i> para o fator tempo com valor máximo.	76
Figura 22: Janela de processos para os fatores.	77
Figura 23: Inspeção visual de qualidade para amostras.	79
Figura 24: Modelo de <i>loop</i> utilizado para encapsulamentos BOC.....	83
Figura 25: Espessura do intermetálico formado entre cobre e alumínio (lado esquerdo) e ouro e alumínio (lado direito).....	84
Figura 26: Área do intermetálico para o fio de ouro (lado esquerdo) e o fio de cobre (lado direito).	84
Figura 27: Comparativo do resultado dos testes de BPT.....	85
Figura 28: Comparativo do resultado dos testes de BST.....	85
Figura 29: Pareto das falhas com fio de ouro.	86
Figura 30: Pareto das falhas com fio de cobre.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Etapas para determinação da viabilidade técnica.....	55
Quadro 2: Áreas e itens para comparação entre fios de cobre e fios de ouro.....	56
Quadro 3: Fatores para cálculo do <i>payback</i>	57
Quadro 4: Passos principais da primeira solda.....	68
Quadro 5: Método para validação da qualidade das amostras.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais propriedades de diferentes modelos para fios de ouro e fios de cobre.	36
Tabela 2: Resultado da medida de dureza triangular (HT) e do percentual de <i>cratering</i>	48
Tabela 3: Condições iniciais e finais para os parâmetros otimizados.	70
Tabela 4: Variáveis de resposta e fatores para DOE da solda no <i>pad</i>	72
Tabela 5: Resultados do DOE para otimização da solda no <i>pad</i>	74
Tabela 6: Resultados obtidos para as variáveis de resposta.	80
Tabela 7: Janelas de processo da primeira solda para os fios de cobre e ouro.	81
Tabela 8: Janelas de processo da segunda solda para os fios de cobre e ouro.	82
Tabela 9: Comparativo entre os valores medidos para os principais requisitos de qualidade da solda.	89
Tabela 10: Resultados obtidos para o fio APC.	90
Tabela 11: Propriedades dos fios utilizados nos experimentos.	91
Tabela 12: Características dos capilares.	92
Tabela 13: Fluxo de caixa para o investimento.	96

LISTA DE ABREVIATURAS

APC	Gold and Palladium Coated Copper Wire
BPO	Bond Pad Opening
BPP	Bond Pad Pitch
BPT	Bond Pull Test
BST	Ball Shear Test
CD	Chanfer Diameter
CI	Cicuito Integrado
CUP	Circuit Under Pad
CV	Contact Velocity
DAF	Die Attach Film
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
EFO	Eletric Flame-Off
Elong	Elongation
eMMC	Embedded Multi Midia Card
EVA	Valor Econômico Agregado
FA	Face Angle
FAB	Free Air Ball
FC	Flip Chip
FIB	Focused Ion Beam
FOW	Filling on Wire
H	Hole
HAZ	Heat Affected Zone
I/O	Input/Output
ICA	Inner Chanfer Angle
IMC	Inter-metallic Compound
KOH	Hidróxido de Potássio
LPM	Litros por Minuto
MCP	Multi Chip Package
Min Br. Load	Minimum Break Load
OEM	Overall Equipment Manufacturer
OR	Outer Radius
PCB	Printed Circuit Board

PCC	Palladium Coated Copper Wire
QFN	Quad-Flat No Lead
RDL	Redistribution Layer
RF ID	Identificação por Rádio Frequência
S/S	Sample Size
SD	Secure Digital
SEM	Scanning Electron Microscopy
SIP	System in a Package
SRD	Surface Response Design
T	Tip Diameter
TAB	Tape Automated Bonding
TDR	Time Domain Reflectometry
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TSV	Through Silicon Vias
UPH	Units Per Hour
USG	Ultrasonic Generator
VPL	Valor Presente Líquido
W/B	Wire Bonder
WD	Wire Diameter
WLP	Wafer Level Packaging

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOC	Board on Chip
DDR3	Double Data Rate 3
DOE	Design of Experiments
DRAM	Dynamic Random Access Memory
ITT CHIP	Instituto Tecnológico em Semicondutores
MPEE	Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica
PADIS	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
$\mu \Omega \text{ cm}$	micro Ohm por centímetro
μm	Micrômetros
μs	Micro segundos
Al	Alumínio
Au	Ouro
Cpk	Índice de Capabilidade de Processo
Cu	Cobre
g	Gramas
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
gf	Gramas-força
GPa	Giga Pascal
H ₂	Hidrogênio
Hv	Vickers Hardness
mAmps	Mili Amperes por segundo
Mils	Polegada dividido por mil
mm	Milímetros
mN	mili Newtons
ms	Milisegundos
N ₂	Nitrogênio
Ni	Níquel
Pd	Paládio
W/m.K	Watts por mili Kelvin

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Problema enfocado	26
1.2 Motivação	28
1.3 Objetivo	28
2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Processo de <i>Wire bonding</i>	29
2.2 Vantagens e Desvantagens do <i>Wire Bonding</i>	30
2.3 Etapas do processo	31
2.4 Materiais do processo	32
2.4.1 Capilar	32
2.4.2 Eletrodo	34
2.4.3 Fio de solda.....	35
2.4.4 Clamp	36
2.5 Substituição de fio de ouro por fio de cobre	36
2.5.1 Sistema EFO-FAB	39
2.5.1.1 <i>Gás de Proteção</i>	42
2.5.1.2 <i>Parâmetros de EFO</i>	43
2.5.2 Dureza do Fio de Cobre.....	44
2.5.3 Fios Esmaltados	46
2.5.4 Solda no <i>Pad</i>	47
2.5.5 Loop.....	48
2.5.6 Solda no <i>Lead</i>	49
2.5.7 Confiabilidade	50
2.6 O Método do Payback	52
2.6.1 Payback descontado.....	52
3 METODOLOGIA	54
4 DESENVOLVIMENTO	58
4.1 Estudo da Viabilidade Técnica	58
4.1.1 Educação Técnica	58
4.1.2 Substratos	59
4.1.3 Fios de solda	59
4.1.4 Capilar	60
4.1.5 Critérios de qualidade.....	61
4.1.6 Técnicas de análise de falhas.....	62
4.1.7 Equipamento Kns Icoon Power Series	63
4.1.7.1 <i>Ferramentas de processo</i>	64
4.1.7.2 <i>Parâmetros</i>	64
4.1.7.3 <i>Operação</i>	65
4.1.8 Planejamento do experimento	65
4.2 Geração da receita de solda e seleção dos materiais	66
4.3 Rodada experimental	67
4.4 Identificação dos fatores críticos	71
4.5 Otimização por DOE	73
4.6 Caracterização da solda	77
4.7 Comparação entre fio de ouro e fio de cobre	80
4.7.1 Parâmetros de processo	81
4.7.1.1 <i>Solda no pad</i>	81

4.7.1.2 Solda no lead.....	81
4.7.1.3 Spark	82
4.7.1.4 Forming gas	82
4.7.1.5 Temperatura.....	82
4.7.1.6 Loop	83
4.7.2 Performance	83
4.7.2.1 Intermetálico	83
4.7.2.2 Testes BPT e BST.....	84
4.7.2.3 Modos de falha comuns.....	86
4.7.2.4 Produtividade.....	87
4.7.2.5 Rendimento do processo	87
4.7.2.6 Qualidade da solda	88
4.7.3 Materiais.....	89
4.7.3.1 Fios esmaltados.....	89
4.7.3.2 Propriedades dos fios.....	90
4.7.3.3 Metalizações dos pads e leads	91
4.7.3.4 Capilares.....	92
4.7.3.5 Torch tip e Wire Clamp.....	92
4.7.3.6 Forming Gas	92
4.7.4 Limitações	92
4.7.4.1 Tipo de adesivo	92
4.7.4.2 Espessura dos materiais.....	93
4.7.4.3 Pad Pitch.....	93
4.7.4.4 Empilhamento de die.....	93
4.7.4.5 Comprimento do fio	94
4.7.4.6 Temperatura.....	94
4.8 Payback.....	94
5 CONCLUSÕES	99
REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

O encapsulamento de semicondutores se torna cada vez mais importante para a indústria microeletrônica, sendo o principal responsável pela performance térmica e elétrica dos componentes. Atualmente a indústria de semicondutores voltou suas atenções para as interconexões dos componentes, pois as limitações de performance estão justamente nas ligações entre o circuito integrado e o substrato. Por este motivo, diversas abordagens estão sendo desenvolvidas para o encapsulamento, incluindo a redistribuição de *layers* (RDL), *Through Silicon Vias* (TSV), Pilar de Cobre, *Wafer Level Packaging* (WLP) e solda com fio de cobre (SOLID STATE OF TECHNOLOGY, 2014a).

Além disto, existe uma demanda crescente para elevar a confiabilidade dos componentes e reduzir custos dos materiais (TAN; TOH; HA, 2004). Embora as tecnologias de *Wafer Level Package* (WLP), *Tape Automated Bonding* (TAB) e *Flip Chip* (FC) estejam sendo cada vez mais empregadas, *wire bonding* ainda é a tecnologia de encapsulamento mais empregada no mundo (ZHONG, 2011). Em 1999, *wire bonding* representou mais de 90% de todos os encapsulamentos de chips (TUMMALA, 2001). Onze anos depois, em 2010 *wire bonding* ainda dominava mais de 90% do Mercado de encapsulamento (ZHONG, 2011). Segundo Chauhan et al. (2014), em 2013, mais de 90% dos encapsulamentos de semicondutores foram feitos com *wire bonding*.

Wire bonding é uma forma de fazer a interconexão entre o circuito integrado e o substrato no encapsulamento de semicondutores. Este processo geralmente é feito utilizando-se um fio de ouro. Segundo Chauhan (2014), a solda com fio de ouro foi utilizada na indústria eletrônica por mais de 50 anos por causa da sua alta resistência à tração e condutividade elétrica, alta confiabilidade e facilidade de solda. O processo de solda com fio de ouro foi refinado diversas vezes para reter o controle da tecnologia de interconexão devido a facilidade de se trabalhar com este material e à anos de dados de confiabilidade (BERND et al., 2011).

Contudo, devido ao custo elevado do ouro no mercado, foram considerados materiais alternativos para realização do *wire bonding*, como a prata e o cobre (CHAUHAN et al., 2014). O aumento contínuo dos custos de matéria prima nos últimos anos fez com que o fio de ouro fosse o material mais caro na indústria de encapsulamento, depois dos substratos (BERND et al., 2011). A solda com fio de cobre já é praticada por mais de 20 anos, com fios grossos de até 2 mils, para aplicações de energia e na indústria automotiva (BERND et al., 2011). Porém, para soldar com fio de cobre de diâmetro inferior à 25 μ m, é necessário entender melhor as propriedades dos fios, formação de intermetálico (*Inter-Metallic Compound*, IMC), o próprio

processo de *wire bonding*, desenvolvimento de equipamentos e controle da oxidação (SOLID STATE OF TECHNOLOGY, 2010).

Wire bonding com fio de cobre oferece diversos benefícios, porém também impõe novos desafios. Para superá-los e sanar todos os problemas, e então poder usufruir das suas vantagens, pesquisas são feitas extensivamente em todo o mundo, levando a novas descobertas e soluções para os problemas (ZHONG, 2011). É preciso demonstrar que os desafios do processo de montagem e de confiabilidade de longo prazo podem ser contornados com sucesso (BERND et al., 2011).

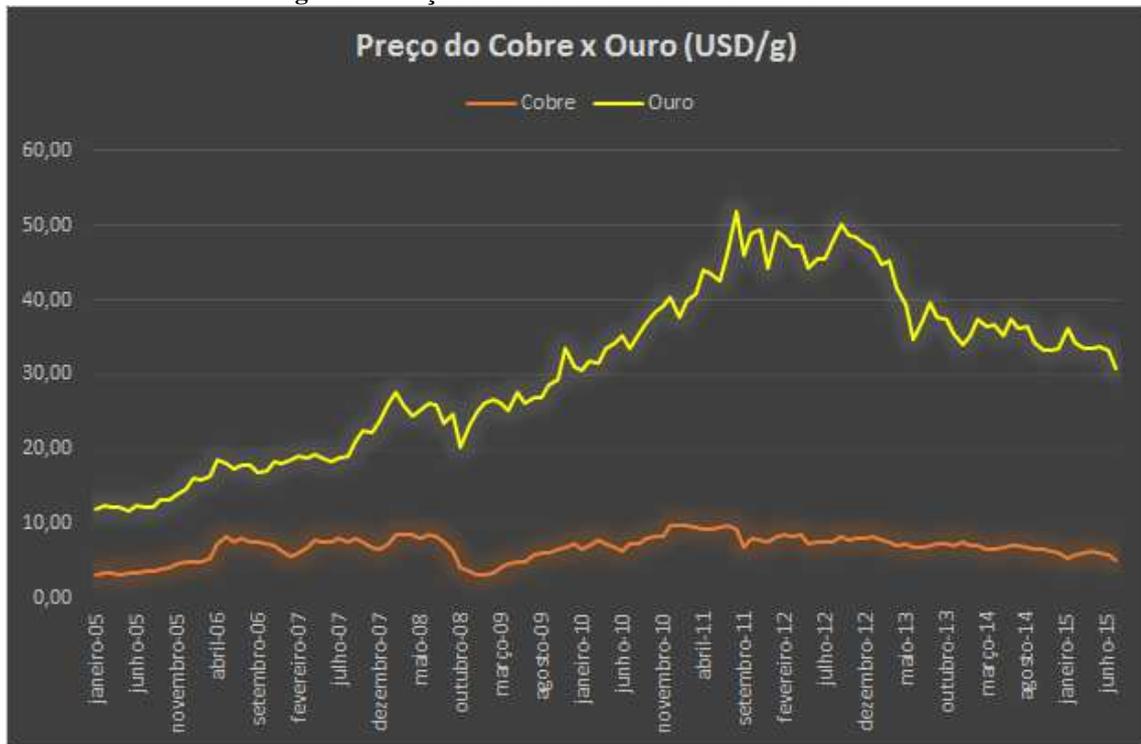
O estudo da viabilidade técnica e econômica da substituição do processo convencional de *wire bonding* por *wire bonding* com fios de cobre é o principal objetivo deste trabalho. Na pesquisa bibliográfica realizada, não foi encontrado registro de trabalho semelhante feito no Brasil. A pesquisa foi ampla e vários trabalhos realizados em outros países foram analisados. O destaque para a ausência de trabalhos no Brasil deve-se a importância deste fato no aspecto relacionado à indústria nacional de semicondutores.

1.1 Problema enfocado

Atualmente a produção de memórias DRAM DDR3 é feita utilizando-se a tecnologia de *wire bonding* com fio de ouro de 0.7mil. O ouro é a matéria prima de custo mais elevado, ficando atrás apenas do próprio *die* e do substrato. O consumo deste material é elevado, e tende a aumentar à medida que a densidade de interconexões (I/O) também aumenta. Segundo Zhong (2011), o principal condutor da substituição de cobre por ouro é justamente o custo. Sem este incentivo, os desafios e problemas para a utilização de cobre jamais teriam sido considerados.

Apesar da alta confiabilidade e dos anos de experiência que a indústria possui com o fio de ouro, o constante aumento do custo deste material e a sua baixa resistência mecânica são os principais fatores que motivam a substituição deste por cobre. A Figura 1 mostra o comparativo da evolução do preço do ouro e do cobre de Janeiro de 2005 a Julho de 2015.

Figura 1: Preço do ouro e do cobre entre 2005 e 2015.



Fonte: Adaptado de Investing (2016).

No processo de montagem dos componentes, os defeitos de fabricação mais comuns estão intrinsecamente ligados às propriedades mecânicas do ouro. O manuseio das peças por parte dos operadores causa deslocamento dos fios (*wire sagging*), o que também pode gerar curto entre eles (*wire short*). Outros modos de falhas comum neste processo são o desprendimento entre o fio e o substrato (*open Lead*) ou entre o fio e o *die* (*open Pad*). Durante o processo de moldagem, a injeção do composto arrasta os fios (*wire sweep*), também resultado em um curto circuito e consequente falha elétrica (CHAUHAN et al., 2014).

Conforme Bernd et al. (2011), o design dos *dice* ainda são guiados para solda com fio de ouro do tipo *fine pitch*. Por isto ainda existe muita hesitação para adoção do fio de cobre *fine pitch*, apesar dos incentivos econômicos. Além disto, (SOLID STATE OF TECHNOLOGY, 2010) observa que para componentes mais avançados e materiais do tipo *low k* (com baixa constante dielétrica) será necessário desenvolver fios de diâmetro menor, tanto em Au quanto em Cu, abaixo dos 18µm praticados hoje em dia.

O problema enfocado neste trabalho é a necessidade de se responder ao questionamento: é vantajosa a substituição dos fios de ouro habitualmente usados em *wire bonding* por fios de cobre? Por vantajosa entende-se aqui a existência de viabilidade técnica e econômica para uma

empresa que produza memórias DRAM DDR3 e, também, a existência de margens de contribuição para lucratividade superiores àquelas existentes no processo convencional.

1.2 Motivação

A motivação para realização deste estudo é seguir a tendência global de substituição de fio de ouro por fio de cobre no processo de *wire bonding*, aplicando-o no encapsulamento de memórias DRAM DDR3. O pioneirismo desta tecnologia no Brasil serve para reforçar o caráter inovador da empresa onde o estudo foi realizado e justificar o alto investimento feito em pesquisa e desenvolvimento.

Além da redução do custo de materiais e aumento do rendimento do processo, o fio de cobre também melhora a performance do CI. Segundo (SOLID STATE OF TECHNOLOGY, 2014b), além da qualidade, confiabilidade e benefícios econômicos, o fio de cobre oferece manufaturabilidade igual ou superior comparado ao ouro, e também provê 40% de aumento na condutividade elétrica.

Através desta pesquisa foi possível entender melhor o processo de *wire bonding*, dominar esta tecnologia, entender o estado atual do mercado e desta forma possibilitar aumento da competitividade de empresas que produzam memórias DRAM DDR3. Também é importante lembrar que o desenvolvimento da indústria de semicondutores no Brasil contribui para a melhoria de aspectos sociais, oferecendo novas oportunidades nos âmbitos profissionais e acadêmicos.

1.3 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é avaliar uma proposta de substituição de fio de ouro por fio de cobre no processo de *wire bonding* em memórias DRAM DDR3 encapsuladas no Brasil. Verificar a viabilidade técnica da aplicação desta tecnologia para este componente, bem como a viabilidade econômica, e calcular o custo de implementação do projeto e *payback*.

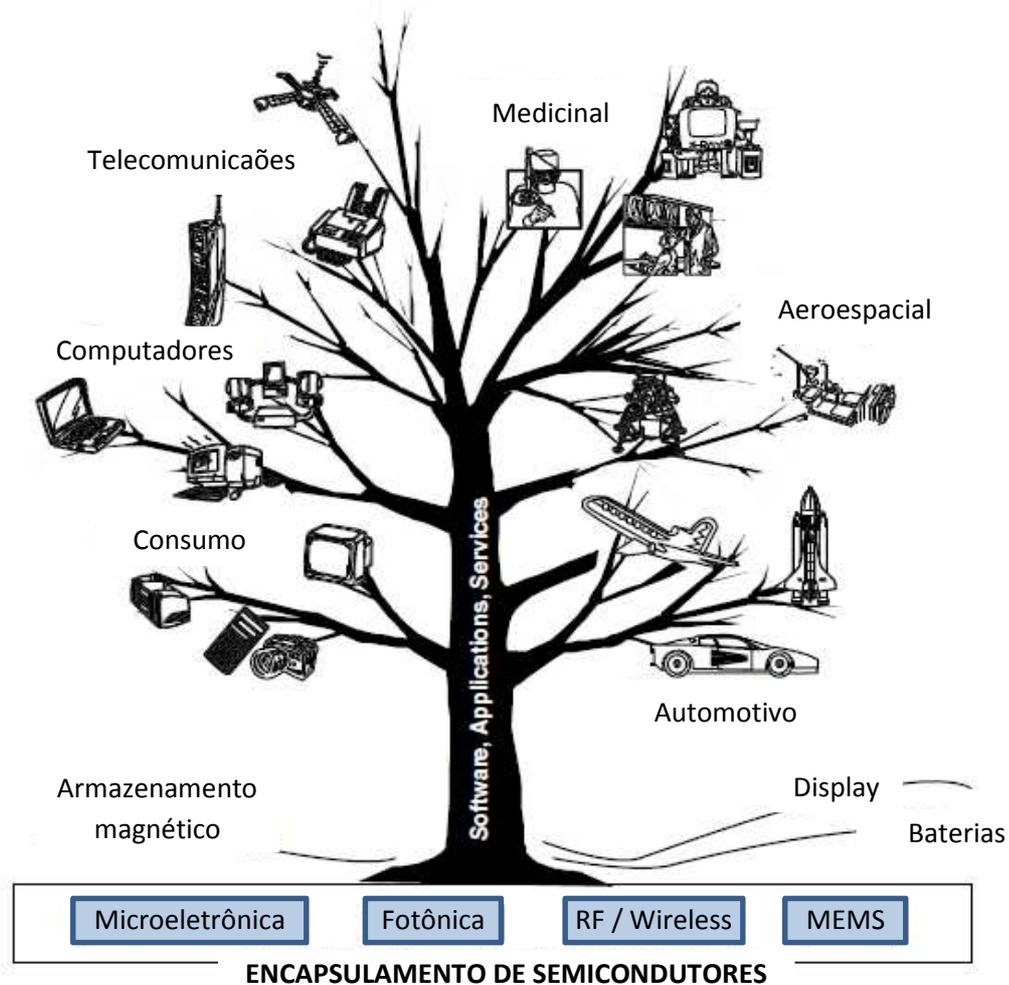
Também é objetivo pesquisar as alternativas utilizadas em outras grandes empresas na área de semicondutores e definir qual a melhor alternativa para utilização da tecnologia em questão no Brasil.

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de *Wire bonding*

De acordo com Tummala (2001), *wirebonding* é uma técnica de interconexão para conectar um chip a um substrato, onde os I/O dos *bonding pads* no chip são associados aos pinos no substrato, através de um fino fio de metal. Esta tecnologia foi originada em 1950 pela AT&T. O autor ainda destaca que as estruturas de interconexão são altamente confiáveis, e por isso utilizadas em uma ampla gama de aplicações, incluindo componentes para fins medicinais e espaciais, automotivos, e de baixo custo, como produtos eletrônicos, brinquedos, *smart cards* e aplicações RF, conforme a Figura 2.

Figura 2: Areas de aplicações dos componentes microeletrônicos.



Fonte: Adaptado de Tummala (2001).

Existem diferentes métodos para realizar a interconexão entre o fio e o substrato, cada uma delas apresentando suas vantagens e desvantagens. Segundo Chauhan et al. (2014), entre as tecnologias de *wire bonding*, a solda termossônica é a técnica mais comum utilizada no encapsulamento de semicondutores. Além disso, *ball-wedge bonding* é mais comum do que *wedge-wedge bonding*. Tummala (2001) destaca que *ball bonding* é a forma mais comum de *wire bonding* utilizada, correspondendo por 95% do total.

Para a verificação da viabilidade técnica da produção de memórias DRAM DDR3 com fio de cobre neste trabalho foi considerado o processo de *wire bonding* convencional, utilizando uma soldadora termossônica da marca **Kulicke & Soffa, modelo Icon Power Series, fabricada em 2009**. Chauhan et al. (2014), descreve o processo de solda termossônica como uma combinação de energia ultrassônica, pressão e calor, para formar uma ligação intermetálica entre os materiais. De todos os tipos existentes de conexões *chip-to-package*, Tummala (2001) realça o fato de que *wire bonding* possui a pior performance elétrica. Isto ocorre devido aos longos fios de interconexão, responsáveis por aumentar a impedância do sistema, que promove o acoplamento indutivo e reduz a velocidade de operação do circuito.

2.2 Vantagens e Desvantagens do *Wire Bonding*

Tummala (2001) resume as vantagens de se utilizar esta tecnologia como sendo:

- a) processo altamente flexível de interconexão *chip-to-package*;
- b) baixo índice de defeitos, ou alto *yield* (40- 1000 ppm);
- c) fácil de programar ou ensinar novos ciclos de solda;
- d) estrutura de interconexão altamente confiável;
- e) infraestrutura de suporte bem desenvolvida na indústria;
- f) avanços freqüentes em equipamentos, ferramentas e materiais.

Como desvantagens desta tecnologia, o autor destaca:

- a) produtividade baixa;
- b) interconexão muito longa, degradando a performance elétrica;
- c) potencial para *wire sweep* durante o processo de moldagem;
- d) maior *footprint* necessário para realizar a conexão entre chip e substrato.

2.3 Etapas do processo

A seguir são descritos os passos necessários para realizar um ponto de solda, que conecta um I/O do chip, presente no *bonding pad*, à um pino ou *lead* do substrato. A sequência descrita repete-se várias vezes durante a soldagem de um componente. No caso das memórias DRAM, um componente possui geralmente entre 70 e 120 fios.

De acordo com Tan, Toh e Ha (2004), o ciclo do processo de *wire bonding* começa com o rompimento elétrico do espaço de ar entre o fio e o eletrodo, seguido por uma descarga que derrete a cauda do fio. Esta primeira etapa é conhecida como EFO (*Electric Flame Off*). Então a tensão superficial faz com que o fio derretido se enrole, formando uma esfera, que será pressionada sobre o *bonding pad* através do capilar. Esta esfera chama-se FAB (*Free Air Ball*).

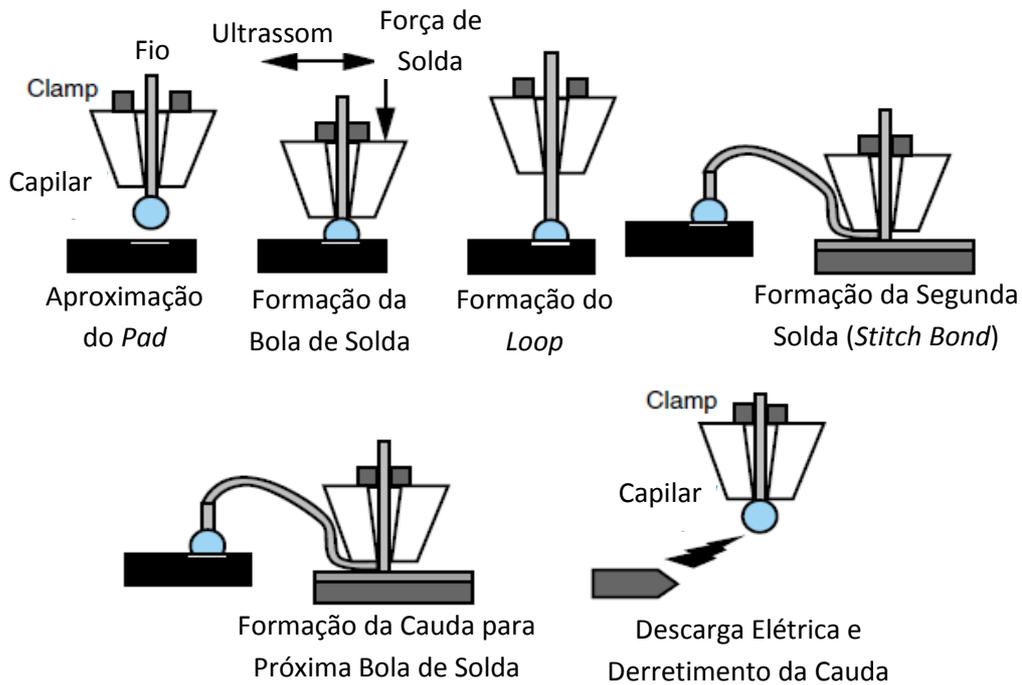
Em seguida, é feita a interconexão entre a FAB e o *bonding pad*. Segundo Tummala (2001), isto é feito através da utilização de força controlada aplicada pelo capilar, tipicamente menos de 100g, à temperaturas moderadas, entre 150°C e 200°C, combinada com excitação ultrassônica do capilar e fio, entre 60 e 120 kHz.

A interação destes três componentes (força, temperatura e ultrassom) cria uma camada de intermetálico que une o fio ao *bonding pad*. Depois disto vem a formação do *loop*. O capilar é retirado do *pad* e movimentado em x, y e z, dependendo do componente, e posiciona-se sobre o pino do substrato, onde é feita a segunda solda, ou *stitch bond*. Zhong (2011) lembra que são necessários maior potência e força de soldagem nesta etapa quando comparada à primeira solda.

Por fim o fio é cortado, ficando com uma cauda que será utilizada para o próximo ciclo. O sistema de EFO utiliza esta cauda para formar a próxima FAB que será conectada ao próximo I/O.

De acordo com Tummala (2001), um ciclo completo como o descrito acima demora tipicamente menos do que 20ms para o processo de solda termossônica. A Figura 3 ilustra os passos da solda termossônica.

Figura 3: Passos para realizar a solda termossônica.



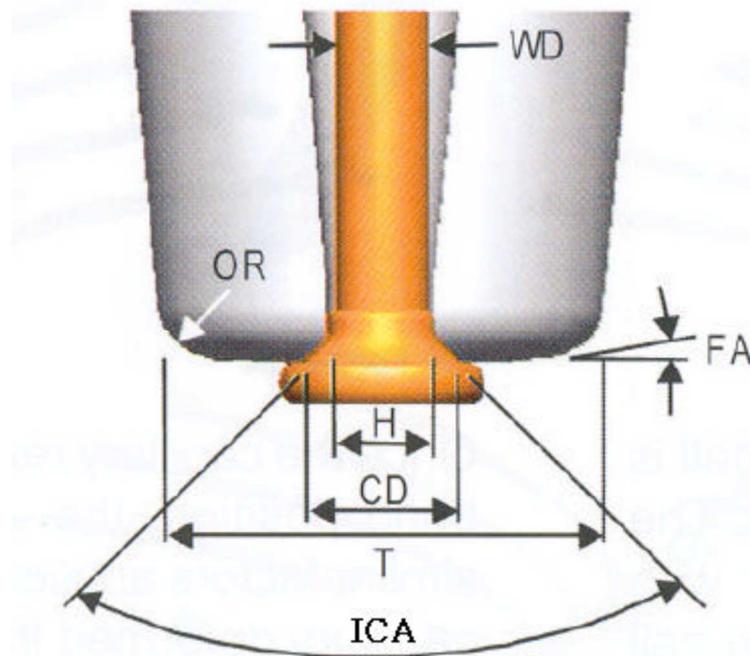
Fonte: Adaptado de Tummala (2001).

2.4 Materiais do processo

2.4.1 Capilar

O capilar é a ferramenta que guia o fio durante o processo de solda. Ele é responsável pelo formato da bola de solda, após a solda no *pad*, e também pelo formato da solda no *lead*, ou *stitch bonding*. As dimensões devem ser selecionadas de acordo com o diâmetro do fio a ser usado, e do tamanho desejado para os pontos de solda. A correta seleção do capilar é de extrema importância para obtenção de um processo estável. A Figura 4 ilustra as principais dimensões de um capilar.

Figura 4: Geometria do capilar.



Fonte: PECO (2005).

WD: *Wire Diameter*: Diâmetro do fio utilizado. Selecionado conforme tamanho dos *pads*.

OR: *Outer Radius*: Raio externo, importante para a qualidade da solda no *lead*.

H: *Hole*: Diâmetro do orifício, deve ser compatível com o WD.

FA: *Face Angle*: Ângulo da face, define a quantidade de força transferida durante a segunda solda.

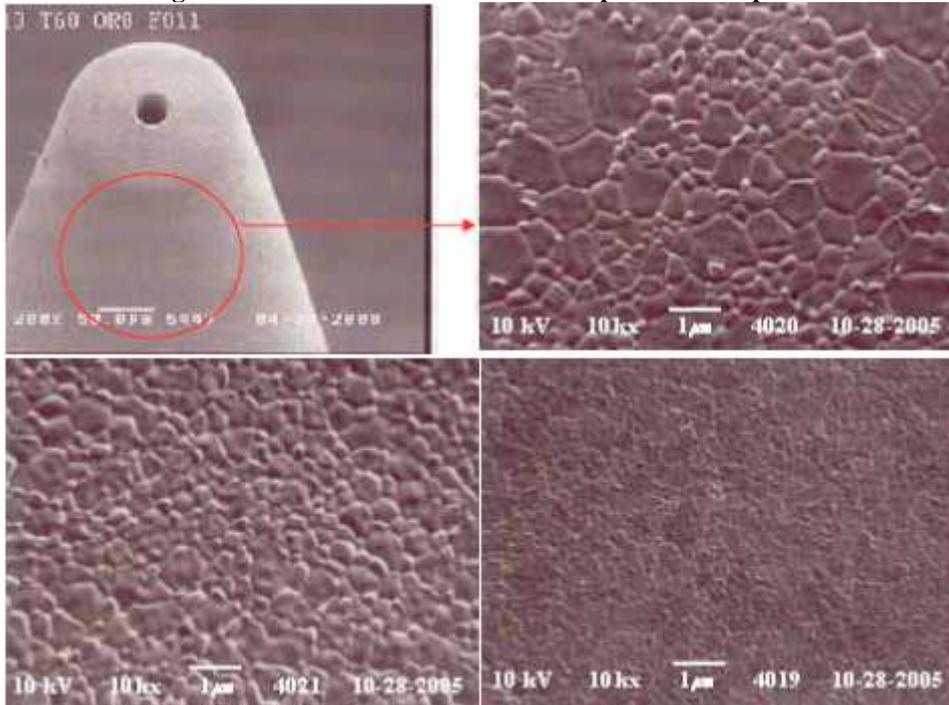
CD: *Chanfer Diameter*: Diâmetro do chanfro, responsável pelo tamanho da bola de solda, devendo ser compatível com o *bond pad opening* (Área do *pad* reservada para solda).

ICA: *Inner Chanfer Angle*: Ângulo interno do chanfro: Define a força transferida para a primeira solda.

T: *Tip Diameter*: Define o comprimento da segunda solda, e deve ser compatível com o *pad pitch*.

Também é importante selecionar o tipo de acabamento da superfície do capilar. Ela pode ser polida ou rugosa, dependendo do resultado desejado. No caso do fio de cobre, a superfície rugosa é desejada pois tem melhor aderência no fio, melhorando o desempenho da solda no *lead*, e garantindo uma janela de processos mais ampla. Porém a sua vida útil é mais curta, devido ao desgaste elevado. A Figura 5 demonstra diferentes acabamentos oferecidos pelos fabricantes.

Figura 5: Diferentes acabamentos de superfície de capilar.

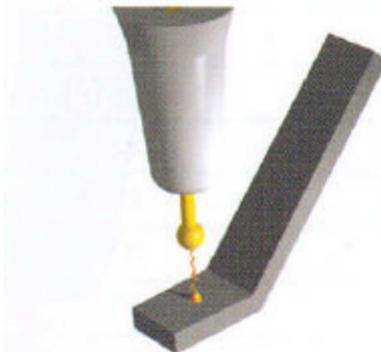


Fonte: PECO (2009).

2.4.2 Eletrodo

O eletrodo, também conhecido como tocha, é a ferramenta que realiza a descarga elétrica para a formação da FAB. Existem diferentes geometrias e dimensões disponíveis, dependendo da composição e diâmetro do fio utilizado, e dos parâmetros de processo (intensidade da corrente e tempo de disparo). O correto posicionamento da tocha (*Spark Gap*) é muito importante para obter-se FABs com volume constante e centralizadas com relação ao fio.

Figura 6: Desenho do eletrodo formando a FAB



Fonte: PECO (2005).

2.4.3 Fio de solda

O fio de solda é um dos materiais mais importantes no processo de *wire bonding*. Ele é o responsável por transmitir a corrente elétrica entre o *die* e o substrato, estando conectado em uma extremidade sobre o *bonding pad*, e na outra extremidade sobre o *lead*. Portanto, o material do fio deve ser compatível com a metalização de ambas conexões, para formar uma solda resistente, e com o material utilizado na etapa de molde, geralmente epóxi.

Além disso, o fio deve ter resistência mecânica para suportar as forças exercidas sobre ele sem empenar, o que causaria um curto circuito entre fios, devido à pequena distância existente entre eles. Porém deve ser macio o suficiente para não danificar a frágil estrutura sob os *bonding pads*. Deve resistir à oxidação, permitindo uma vida útil maior durante a operação, e também apresentando maior confiabilidade. Outro fator importante é atender às exigências de condutividade térmica e elétrica do dispositivo.

Segundo Callister (2007), as principais características que um fio deve possuir para ser utilizado neste processo são: alta condutividade elétrica; habilidade da liga em soldar; formação de uma micro junta mecânica e eletricamente estável; fase intermetálica de tamanho reduzido (menor do que $1\mu\text{m}$); suportar à vibrações e ciclagem térmica; Para atender a todos estes requisitos, diversas ligas foram desenvolvidas, otimizando as propriedades dos fios para determinadas aplicações. O objetivo é sempre cumprir todas as exigências com o menor custo possível. Neste trabalho, a viabilidade da substituição do fio de ouro por fio de cobre é estudada. A Tabela 1 resume as principais propriedades de modelos disponíveis no mercado destes dois tipos de fios.

Tabela 1: Principais propriedades de diferentes modelos para fios de ouro e fios de cobre.

Modelo	Composição Química	Densidade (g/cm ³)	Ponto de Fusão (°C)	Resistência Elétrica (μΩ/cm)	Cond. Térmica (W/m.K)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Elong (%)	Min. Br. Load (g)
Au HD2	Au 99,99%	19,32	1063	2,3	312	> 60	2 ~ 5	2,5
Au HD3	Au 99,99%	19,32	1063	2,2	312	> 65	2 ~ 5	4
MaxSoft 2	Cu 99,97 %	8,92	1081	1,7	405	80 – 90	8 ~ 14	4
MaxSoft	Cu 99,99%	8,92	1083	1,69	401	80 90	7 ~ 15	3
PdPro	Pd 1.2 % 2.5 % Cu 99.98 %	9,03	1081	1,85	401	95 – 105	6 ~ 12	3
PdSoft	Pd 1.3 %~2.9 % Cu 99.99 %	8,99	1083	1,7	401	95 – 105	9 ~ 15	3
PdFlash	Pd+Au 1.5 %~2.5 % Cu 99.98 %	9,03	1081	1,8	401	90 – 100	7 ~ 13	5

Fonte: Adaptado de Heraeus (2016).

2.4.4 Clamp

Outra ferramenta importante no ciclo de solda é o *wire clamp*, ou *clamp*, que consiste em um conjunto de hastes que prendem e soltam o fio durante o ciclo de solda, dependendo do momento e das configurações do equipamento. O *clamp* é vital para qualidade do produto e do processo, pois entra em contato direto com o fio. Sua função é guiar o fio durante a formação do *loop* e cortar o fio após a solda no *lead*.

Contaminação por vapor do adesivo (entre *die* e substrato), resíduos do próprio fio, e outras sujidades causam freqüentes paradas de máquina, reduzindo a produtividade, e também causam danos no fio, podendo ser prejudicial para a qualidade do produto. Por este motivo, é necessário que sejam feitas limpezas preventivas desta peça. O revestimento geralmente é de uma liga de titânio, que embora seja um material com dureza elevada, apresenta desgaste ao longo de sua vida útil, precisando ser substituído. Fios com dureza maior causam desgaste mais acelerado do que fios mais macios.

2.5 Substituição de fio de ouro por fio de cobre

Os avanços nas tecnologias de fabricação de circuito integrado (CI) impõem novos desafios para o processo de *wire bonding*, que devem ser superados ao mesmo tempo em que os custos são reduzidos. Entre eles podemos citar o aumento do número de interconexões, a

redução do espaço entre os *bonding pads* (*Bond Pad Pitch* - BPP) e do diâmetro do fio, a emergência de ligas de fio de ouro e cobre, e o desenvolvimento de um processo de *wire bonding* confiável para dispositivos *ultrafine-pitch low k* (ZHONG, 2008 *apud* ZHONG, 2011).

Zhou (2008 *apud* PEQUEGNAT et al., 2011) afirma que as tendências gerais da indústria de microeletrônica incluem a miniturização, alta performance e custos reduzidos. Por este motivo novas tecnologias de interconexão são constantemente aprimoradas e começam a competir espaço com o *wire bonding*. Dentre estas tecnologias vale citar o *Flip Chip, Through Silicon Vias, Copper Pillar* e *Anisotropic Conductive Film*.

O reflexo disto no processo de *wire bonding* pode ser visto como em Bernd et al. (2011), que observa que a pressão econômica acelerou o desenvolvimento de fios cada vez mais finos, chegando aos 0.6mils. Porém Levine et al. (2004 *apud* ZHONG, 2011) nota que fios mais finos possuem menor condutância, são mais fracos, menos rígidos e mais difíceis de manusear.

O fio de cobre soluciona muitos dos problemas atuais enfrentados no processo de *wire bonding*, devido à algumas de suas características. Chauhan et al. (2014) diz que a melhor condutividade térmica e elétrica do cobre em relação ao ouro permite o uso de fios com diâmetro menores para condução de corrente e calor equivalentes. Pequegnat et al. (2011) confirma que as propriedades superiores do fio de cobre o fazem mais adequado para aplicações *finepitch* e de alta performance.

Zhong et al. (2007) conta que o fio de cobre é superior ao fio de ouro em termos de custo de produção, condutividade elétrica e resistência à *wire sweep*, e apesar disto, ele ainda não é amplamente utilizado devido a fraca soldabilidade causada pela oxidação da superfície. Chauhan et al. (2014) ensina que a substituição de fio de ouro por fio de cobre apresenta diversos desafios no processo de *wire bonding*, e ajustes de parâmetros para a formação da bola de solda, formação do *stitch bond* e perfil de *loop* são necessários.

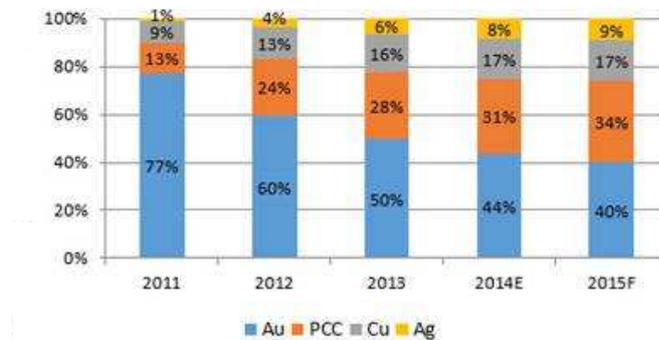
Os problemas da utilização do fio de cobre começam antes mesmo do processo de *wire bonding*. Khoury et al. (1990) afirma que no processo de solda com fio de cobre, a solda do chip no substrato deve resistir à temperaturas superiores do que no processo de solda com fio de ouro. Devido à temperatura elevada, o epóxi utilizado para solda do *die* pode amolecer caso não esteja devidamente curado, o que gera um rendimento ruim no processo de *wire bonding* por causa do movimento do *die* e amortecimento da energia ultrassônica. Portanto, faz-se necessário rever os materiais utilizados no processo de *die attach* para garantir que eles não sejam afetados pela alta temperatura e venham a prejudicar o rendimento dos demais processos, afetando o *yield*.

Outros processos também devem ser revistos, pois podem ser prejudiciais ao fio de cobre. Bernd et al. (2011) lembra que os processos seguintes à etapa de *wire bonding*, que são a limpeza por plasma e a moldagem, também podem impactar na confiabilidade da solda com fio de cobre. O autor ainda diz que uma preocupação em especial são o brometo e o cloreto, que fazem parte da síntese dos epóxis e são difíceis de eliminar. Os níveis típicos destes íons foi reduzido de cerca de 100 ppm para 50 ppm, visando minimizar qualquer corrosão de ligações do fio de ouro.

Segundo Zhong (2011), comparando *wire bonding* com fio de ouro à *wire bonding* com fio de cobre, é como soldar um fio mais duro que deve ser deformado sobre um *pad* mecanicamente mais fraco, com um tamanho reduzido, utilizando um capilar com uma ponta de diâmetro menor e um *bottleneck* possivelmente enfraquecido. O autor também adiciona que esta deformação deve ser propriamente controlada para que se obtenha com consistência o tamanho e altura de bola desejados, dentro de tolerâncias muito estreitas, resultando em um processo confiável. Clauberg et al. (2010) conta que numerosos obstáculos técnicos associados à solda com fio de cobre tem na sua maior parte sido superados. Contudo, obter uma robusteza de processo equivalente à solda com fio de ouro ainda é desafiador e requer melhorias nos procedimentos de controle de fabricação.

Apesar disto, enquanto o preço do fio de ouro depende do preço do ouro, o preço do fio de cobre é dominado pelas áreas de manufatura, ou seja, com o aumento do consumo, é esperado que o preço caia (APPELT; TSENG; LAI, 2009). Em 2014, as vendas de fios de cobre (incluindo fios esmaltados) representaram 48% do volume total de vendas. Esta transição teve início nos produtos consumíveis e de comunicação, porém hoje existe interesse nas áreas industriais, de servidores e automotiva. As fábricas de encapsulamento, de equipamentos e fornecedores de fios e materiais para solda tiveram um papel crítico nesta transição (TRACY, 2014). A Figura 7 demonstra o aumento das vendas dos fios de cobre e esmaltados ao longo dos últimos cinco anos.

Figura 7: Aumento da venda de fios de cobre e esmaltados.



Fonte: SEMI Industry Research and Statistics (2013).

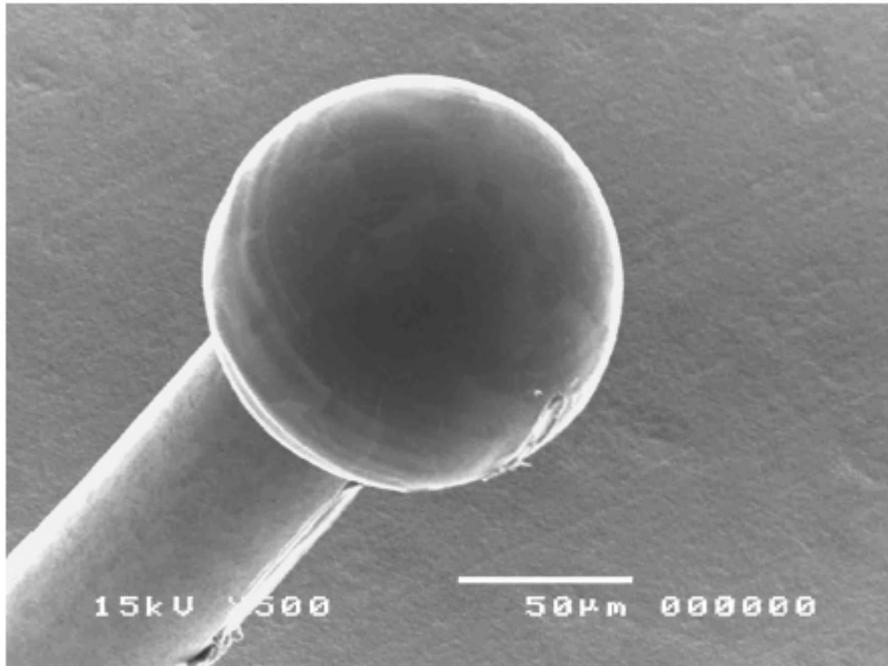
No estudo realizado por Bernd et al. (2011), a eficiência de manufatura e *yield* foram conduzidos para ser equivalentes ao obtido com fio de ouro. Testes de confiabilidade passaram nos critérios usuais e foram estendidos para demonstrar a viabilidade desta tecnologia. O autor atribui uma parte substancial do sucesso de implementação ao gerenciamento do chão de fábrica e ao time dedicado, gerenciamento rigoroso de sala limpa e melhorias gerais na limpeza. Desta forma foi possível obter *yield* e níveis de confiabilidade equivalentes aos obtidos com *wire bonding* com fio de ouro.

A seguir, cada etapa do processo de *wire bonding* é descrita e relacionada à utilização do fio de cobre, e comparada ao fio de ouro. Os problemas e desafios impostos são caracterizados e também são apresentadas as soluções encontradas para superá-los.

2.5.1 Sistema EFO-FAB

Como visto anteriormente, o processo de *wire bonding* inicia-se com a formação da FAB, através do EFO. A esfera criada deverá então ser soldada ao *bonding pad*. Esta esfera deve ser perfeitamente redonda, ter tamanho consistente e ser macia o suficiente para não causar danos mecânicos ao *pad*. Segundo Tan, Toh e Ha (2004), para criar a FAB, a *wire bonder* utiliza a unidade *Electronic Flame-Off* (EFO), que está conectada à alta tensão. Durante a operação, o ar entre o eletrodo e o fio é quebrado por alta corrente, gerando uma faísca de alta tensão, que derrete a ponta do fio, transformando-o em uma esfera. O autor também diz que a formação de FAB consistente com fio de cobre é mais crucial do que no processo com fio de ouro. A Figura 8 demonstra uma FAB com forma ideal para solda.

Figura 8: Imagem de uma FAB com superfície lisa e regular

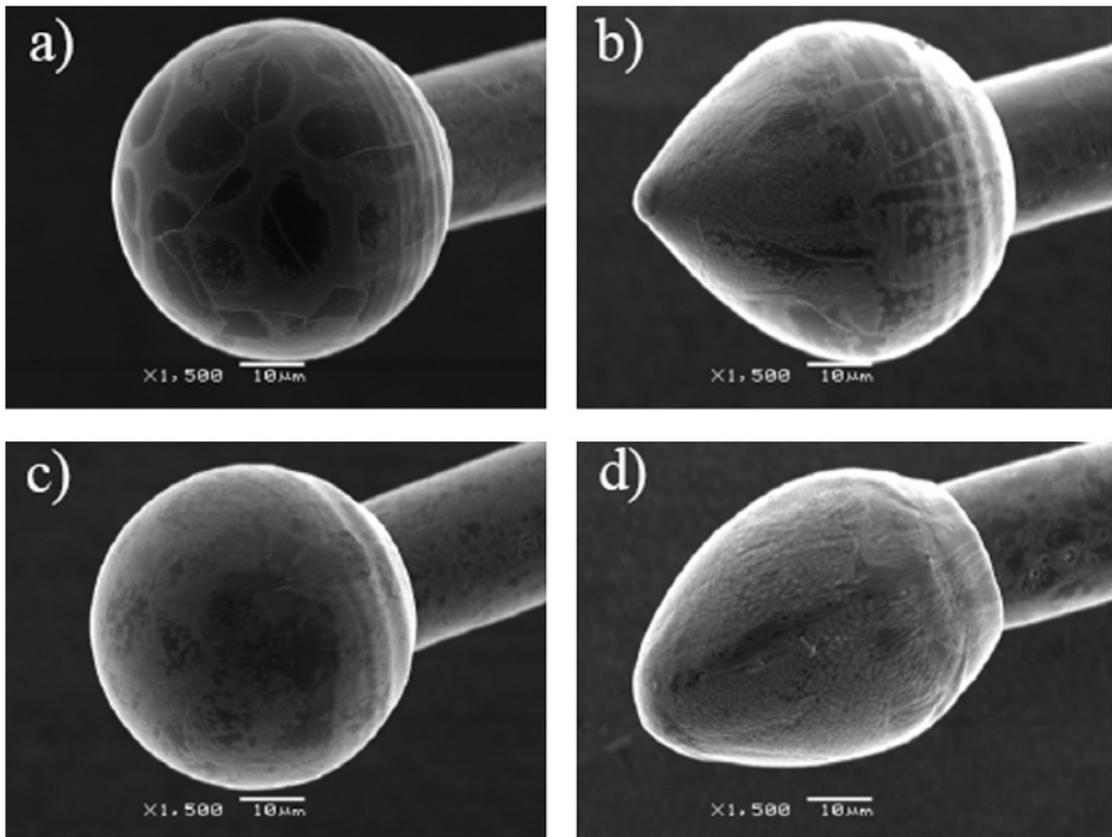


Fonte: Zhong et al. (2007)

Contudo, a consistência do FAB de cobre é muito inferior à do ouro. Isto ocorre devido à oxidação que acontece quando o metal está derretido. Conforme Zhong (2011), durante o estado de fusão do cobre para formação da FAB, ocorre a oxidação do fio, o que gera *voids*, falhas e formação de bolas assimétricas. Pequegnat et al. (2011) alega que em geral os defeitos de FAB são causados por mudanças na tensão superficial durante o estado de fusão do metal devido à oxidação e ao resfriamento não homogêneo. Para evitar a oxidação da FAB, é necessário utilizar um gás de proteção (gás inerte, também conhecido como *forming gas*) durante o momento da formação da esfera. A composição e vazão deste gás deve ser otimizada para a liga de fio utilizada na solda.

A Figura 9 mostra o óxido formado na superfície da FAB e formas irregulares obtidas com fio de cobre e diferentes fluxos de *forming gas* ((a) 0.2 l/min, (b) 0.4 l/min, (c) 0.5 l/min, e (d) 0.75 l/min.) Óxidos de metais geralmente possuem um ponto de fusão maior e tensão superficial menor (HO et al., 2005 apud PEQUEGNAT et al., 2011). Isto faz com que a geometria da FAB seja afetada durante a solidificação, e ao invés de esferas obtêm-se formas pontiagudas, que prejudicam a solda no *bonding pad*.

Figura 9: Óxidos na superfície e formas de FAB obtidas



Fonte: Pequegnat et al. (2011)

Zhong et al. (2007) fala que o fio de ouro é utilizado mais frequentemente porque não oxida rapidamente, porém a solda com fio de cobre está ganhando popularidade, assim como a transição de metalizações de Al para Cu também está em progresso para melhorar a performance dos CIs avançados. O autor comenta que para prevenir a oxidação do cobre e a difusão de oxigênio no cobre durante o derretimento, utiliza-se *forming gas*. Zhong (2011) afirma que FABs obtidas com a utilização da atmosfera de *forming gas* possuem formas uniformes, simétricas e sem falhas. Pequegnat et al. (2011) demonstra que o desvio padrão da altura das FAB produzidas utilizando apenas nitrogênio como gás de proteção é aproximadamente o dobro daquelas produzidas com *forming gas*, identificando um processo de EFO instável.

O *forming gas* também pode contribuir com a qualidade do produto, como observado por Drozdov et al. (2008 apud ZHONG, 2011), pois o comprimento da *Heat Affected Zone* (HAZ), ou zona afetada pelo calor, nos fios de cobre soldados com *forming gas* é menor do que aquele encontrado nos fios soldados sem gás protetivo. Um menor HAZ está associado com maior estabilidade mecânica.

2.5.1.1 Gás de Proteção

Segundo Tan, Toh e Ha (2004); Uno (2011); XU et al. (2008 apud BERND et al., 2011), esta abordagem foi amplamente adotada e são oferecidos *kits* para solda com fio de cobre por todos os fabricantes de máquinas *wire bonder*. Estes kits protegem o cobre durante a formação da FAB e fornecem controles apropriados para longa duração da faísca e alta tensão. De acordo com Pequegnat et al. (2011), o *forming gas* reduz a oxidação do FAB, mas é uma despesa adicional e um motivo de preocupação para a segurança.

Zhong et al. (2007) também recorda que durante a formação do FAB, caso o gás inerte seja insuficiente para prover cobertura total do volume, ocorre oxidação durante o estado de derretimento da cauda do fio. Isto resulta em uma FAB pontuda, porque a tensão superficial reduz significativamente devido à oxidação da camada superficial do FAB de cobre derretido.

Com o objetivo de melhorar a blindagem do cobre durante seu estado de fusão no processo de EFO, foram testadas algumas combinações de gases e temperatura. Conforme Khoury et al. (1990 apud PEQUEGNAT et al., 2011) os gases de proteção utilizados são usualmente uma mistura de H₂ e um gás inerte como o argônio ou o nitrogênio. Hoje em dia a mistura mais comum é 5% H₂ and 95% N₂.

O estudo feito por Tan, Toh e Ha (2004) indica que o uso de *forming gas* pré misturado (5%H₂ + 95%N₂) como gás de proteção é mais eficiente que a utilização de nitrogênio purificado. Misturas que contém mais do que 5% de H₂ são consideradas inflamáveis e portanto evitadas por motivos de segurança e manuseio (KHOURY et al., 1990 apud PEQUEGNAT et al., 2011). Pequegnat et al. (2011) diz que se espera uma redução na qualidade das FABs quando formadas apenas em N₂, devido ao fato da ausência de H₂ para reduzir os óxidos durante o EFO.

Além de reduzir a oxidação, o H₂ provê energia térmica adicional ao EFO (PEQUEGNAT et al., 2011). Tan, Toh e Ha (2004) também atribui a maior eficiência aos 5% de hidrogênio, que tem o papel de deflagração. Porém avisa que para diâmetros menores, a melhora na eficiência energética é menos significativa. É necessário encontrar a mistura certa dos gases, os parâmetros corretos de EFO e a vazão adequada de *forming gas* para atingir níveis satisfatórios de qualidade.

Pequegnat et al. (2011) conduziu um estudo para caracterizar FABs de cobre com diferentes tipos de gás de proteção e vazões, com o objetivo de produzir uma FAB com baixo desvio padrão de seu tamanho e forma, sem apresentar *golf-club* (deslocamento da posição da esfera em relação ao fio) ou ser pontiaguda. O autor concluiu que para o fio de cobre a vazão ideal é de 0.65 l/min, onde o efeito de resfriamento convectivo do *forming gas* aumenta. Para

vazões acima de 0.65 l/min começam a surgir defeitos de *golf-club* e a oxidação aumenta devido à mudança do fluxo de laminar para turbulento.

Em outro estudo, Clauberg et al. (2010) demonstrou que fio de cobre revestido com paládio pode ser soldado com sucesso utilizando-se apenas nitrogênio como gás protetivo, o que recupera parcialmente o custo maior da utilização de fios revestidos em relação ao fio de cobre. Bernd et al. (2011) atenta para o fato que a facilidade do cobre em oxidar permanece sendo um motivo de preocupação para durabilidade de longo prazo dos fios de cobre e soldas quando submetidas a condições de variação de temperatura e umidade durante a vida dos componentes.

2.5.1.2 Parâmetros de EFO

Para obtenção de uma FAB com o diâmetro necessário, é possível controlar três parâmetros de EFO. A distância entre o eletrodo e a cauda do fio (*Spark Gap*), a intensidade e o tempo da corrente. O tamanho da esfera depende da área disponível para a solda, ou seja, do tamanho da abertura sobre os *bonding pads* que se deseja soldar (*BPO – Bonding Pad Opening*). Quanto maior for a FAB, maior será a região de solda, e conseqüentemente maior a força necessária para arrancá-la. Porém uma FAB muito grande pode causar curto circuito entre os *bonding pads*.

Os parâmetros de EFO também possuem influência na dureza da bola formada, o que tem um impacto direto no estresse gerado sobre os *bonding pads*, outro fator crítico para a utilização do fio de cobre, visto que este é mais duro que o ouro. Segundo Zhong et al. (2007), para obter uma FAB macia com fio de cobre e minimizar o estresse gerado durante o impacto da solda, recomenda-se que utilize-se um tempo de disparo curto de EFO, velocidade de contato minimizada e fluxo de gás inerte alto.

No estudo realizado por Tan, Toh e Ha (2004), o EFO- FAB foi examinado como um sistema que consiste em entrada e saída de energia. As variáveis de entrada são a corrente e o tempo de disparo, e a variável medida na saída é o tamanho da FAB. A partir da definição da corrente de EFO e do tamanho desejado para o FAB, é possível prever o tempo de disparo. O autor nota que em geral, o fio de ouro precisa de muito menos energia para formar um FAB do mesmo tamanho que um FAB de fio de cobre. Por isto a importância das melhorias nos equipamentos de *wire bonder*, para que possam suprir esta necessidade.

Em Zhong et al. (2007), foi demonstrado numericamente para a solda com fio de ouro que uma alta corrente de EFO resulta em uma temperatura máxima maior durante a formação

do FAB. É presumido que o mesmo mecanismo seja válido para FAB de cobre, e a temperatura elevada contribui para reduzir a dureza do FAB. Tan, Toh e Ha (2004) diz que também é importante lembrar que o tipo de gás de proteção e a geometria do eletrodo também afetam significativamente a formação do FAB. Um eletrodo menor requer um tempo maior para produzir um FAB do mesmo tamanho quando comparado com um eletrodo maior. Para obter-se eficiência energética, o autor recorda que é necessário produzir um FAB do tamanho desejado minimizando-se a combinação de corrente e tempo de EFO, contribuindo assim para aumentar o UPH (Unidades Produzidas por Hora) da máquina.

2.5.2 Dureza do Fio de Cobre

Segundo Chauhan et al. (2014), como o fio de cobre é mais duro que o fio de ouro, os parâmetros de solda, principalmente a força e energia ultrassônica, devem ser mantidos sob controle rígido. Bernd et al. (2011) observa que fios de cobre agravam alguns modos de falha, devido à dureza elevada e maior força de solda exigida durante a formação do intermetálico. Zhou (2008), Harman (1997) e Shah et al. (2008 apud PEQUEGNAT et al., 2011) também ratificam que a dureza do cobre aumenta a ocorrência de danos ao chip durante o *wire bonding*.

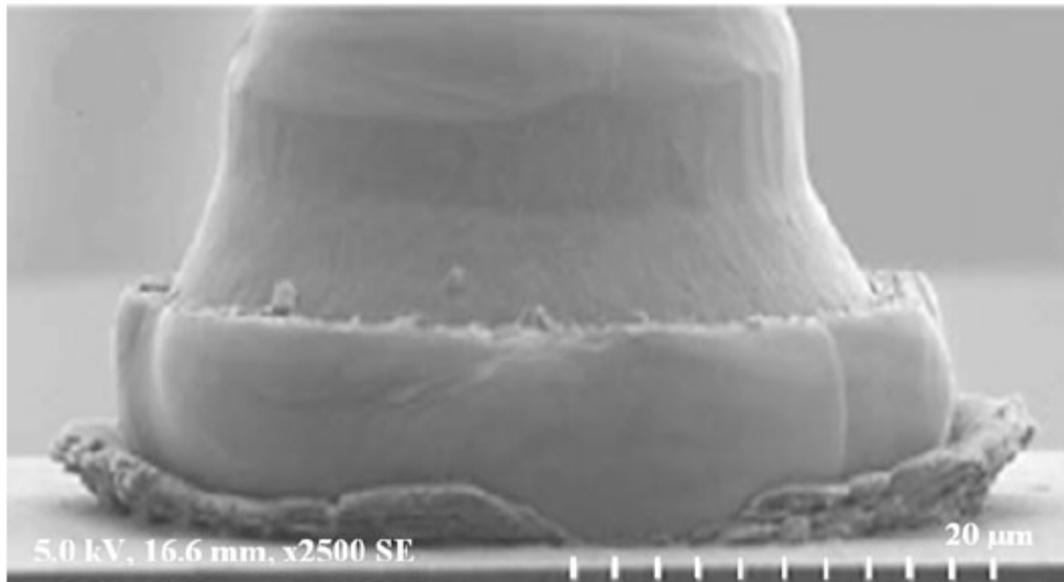
Para viabilizar a utilização do fio de cobre em dispositivos frágeis, foram tomadas medidas para reduzir a dureza da FAB e aumentar a resistência dos *bonding pads*. Onuki et al. (1990 apud TAN; TOH; HA, 2004) deduziu que FABs de fio de cobre formadas com gás de proteção aquecido acima de 175°C são mais macias do que quando formadas com gás inerte à temperatura ambiente.

Chauhan et al. (2014) conta que como *pads* com cobertura de alumínio correm o risco de serem danificados pelo fio de cobre por causa de sua dureza elevada e alta força de soldagem requerida, a indústria de semicondutores adotou *pads* de alumínio com espessura maior do que os utilizados em solda com fio de ouro, assim como *pads* recobertos com níquel. Shah et al. (2008 apud BERND et al., 2011) diz que foram feitas alterações nos processos de fabricação dos fios para deixá-los mais macios, como o aumento da pureza de Cu (4N e 5N) e a adição de dopantes.

De acordo com Srikanth (2007 apud ZHONG, 2011), impurezas no fio de cobre resistem ao deslize das discordâncias em sua microestrutura, aumentando a dureza e demandando maior energia para formação da FAB, o que leva a um maior espalhamento do alumínio dos *pads* (*Al Splash*). Este espalhamento não é desejado pois diminui a espessura de alumínio restante sob a

solda, podendo gerar problemas de confiabilidade, além do potencial curto circuito entre *pads* adjacentes. A Figura 10 ilustra o *Al Splash* sob a bola de cobre soldada sobre o *bonding pad*.

Figura 10: *Al Splash* ocorrido durante solda com fio de cobre.



Fonte: Chauhan et al. (2014, p. 112)

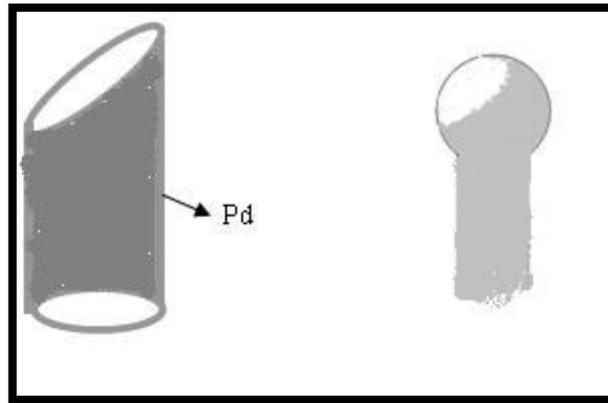
Zhong et al. (2007) realizou um estudo para verificar a microdureza das bolas de solda de cobre com um fio de 25.4 μ m, e diferentes combinações de corrente e tempo de disparo, utilizando *forming gas* (5% H_2 and 95% N_2) como gás inerte. Testes de microdureza foram realizados na seção transversal das bolas de solda. O estudo comprovou que a microdureza das bolas de cobre está relacionada com os parâmetros de EFO. FAB obtidas utilizando-se corrente mais alta são mais macias.

A redução da dureza é atribuída à temperatura máxima durante o estado de derretimento da FAB. A média dos valores obtidos para dureza de Vickers das bolas de solda formadas com corrente maior durante o EFO foi menor do que a media dos valores obtidos para as bolas de solda formadas com corrente baixa. O estresse sofrido nos *bonding pads* é menor quando soldados com FAB de cobre formada com corrente EFO de 105mA quando comparado ao estresse sofrido durante a solda de FAB formado com corrente EFO de 60mA. O estudo também revelou que o gerador de corrente ultrassônica é o fator mais relevante para aumentar o diâmetro e reduzir a altura da bola soldada, e também para aumentar a força de cisalhamento.

Outro estudo realizado por Zhang et al. (2009) confirmou que a distribuição do paládio na FAB depende da geometria da cauda do fio logo antes do momento do disparo da corrente elétrica. Uma sessão não simétrica da cauda gera distribuição assimétrica do paládio, o que faz com que ele fique entre o cobre e o alumínio, compondo a camada de intermetálico. Isto faz

com que os resultados dos testes de cisalhamentos sejam deteriorados, apresentando riscos à estabilidade do processo. A Figura 11 ilustra a distribuição desigual de paládio sobre a superfície da FAB.

Figura 11: Distribuição de paládio sobre FAB.



Fonte: Zhang et al. (2009).

2.5.3 Fios Esmaltados

Outra alternativa oferecida pela indústria para resolver os problemas de oxidação e de dureza do fio de cobre são os fios esmaltados (*Coated Wire*). Fios de cobre recobertos com paládio ou ouro, e até mesmo uma combinação dos dois são comercializados atualmente. Clauberg et al. (2010) comenta que embora não atinja a mesma redução de custos como o fio de cobre puro, eles prometem um processo de solda mais robusta. Experimentos em Kaimori et al. (2006 apud ZHONG, 2011) revelaram que o fio de cobre com paládio é capaz de produzir bolas com mesmo formato das obtidas com fio de ouro. Zhong (2011) observa que sendo um metal nobre, o paládio previne a oxidação da superfície. Também melhora a performance da segunda solda, aumenta a vida útil do fio após a abertura da embalagem e o protege da corrosão.

De acordo com Bernd et al. (2011), a vida útil do fio PdCu é muitas vezes superior à do fio de cobre, e uma cobertura de nitrogênio deve ser suficiente para formação do FAB e solda. Esta vantagem no processo e a economia com *forming gas* podem ser suficientes para justificar o uso de um fio mais caro mesmo sem a comprovação da maior confiabilidade deste material. Segundo Zhong (2011), testes de temperatura e umidade, ciclagem térmica e câmaras de pressão confirmaram que o fio PdCu possui excelente soldabilidade e confiabilidade.

Embora não seja objeto de estudo deste experimento, outra forma existente de fio esmaltado que vem ganhando popularidade são os fios isolantes (*Insulated Wire*). Segundo

Zhong (2011), na medida que os encapsulamentos de CI vão ficando mais complicados, *wire bonding* com fios isolantes tem demanda de mercado atual e futura, por causa dos problemas de *wire sweep*, que se tornam cada vez mais frequentes com a redução do BPP (*Bonding Pad Pitch*) e diâmetro dos fios. O autor ainda destaca que com fios isolantes é possível soldar fios mais longos, que se toquem ou se cruzem.

2.5.4 Solda no *Pad*

Depois de conseguir desenvolver um processo consistente de EFO – FAB, é preciso soldar a esfera sobre o *bonding pad*, processo também chamado de primeira solda, onde é feito o contato elétrico entre o fio e o *die*. Para garantir uma boa solda, é necessário que a superfície dos pads esteja livre de contaminações. Lee et al. (2007 apud ZHONG, 2011) afirma que a limpeza dos *bonding pads* é muito importante quando da utilização de fio de cobre. A limpeza por plasma do substrato logo antes da solda aumenta significativamente a estabilidade do processo, o que é confirmado pelo teste de arrancamento de fios, que obteve um resultado comparável ao obtido com fio de ouro, com força de arrancamento superior a 50mN.

Com relação aos *bonding pads*, Bernd et al. (2011) alerta que algumas mudanças na construção dos CIs fragilizaram sua estrutura, como o deslocamento do circuito para baixo dos *bonding pads* e a redução da constante dielétrica. Isto ainda é agravado pelo fato da dureza do cobre ser superior à do ouro. Conforme Hong et al. (2005 apud ZHONG, 2011), devido à dureza elevada do fio de cobre, é necessário utilizar força de solda maior e mais energia ultrassônica para formar a solda, o que pode danificar o substrato, causar *die cratering*, rachaduras (*cracking*) e espalhamento de alumínio nos pads. Khoury et al. (1990) define *cratering* como danos à passivação e ao silício embaixo da metalização dos *pads*, causados pelo processo de solda.

Independentemente do fio utilizado, Bernd et al. (2011) argumenta que o diâmetro da bola de solda deve ser definido para que a bola de solda e o *splash* de alumínio estejam dentro do *bonding pad*, evitando curto-circuito entre os *pads*. Como o diâmetro do FAB para fios de cobre é um pouco maior do que o FAB obtido para um fio de ouro de mesmo diâmetro, deve-se selecionar um fio de cobre mais fino. Da mesma maneira, o autor orienta que as dimensões críticas do capilar devem ser escolhidas para controlar a geometria da bola de solda e minimizar o *Al splash*.

Zhong (2011) comenta que a obtenção de bolas de solda com alto tempo de vida útil é um dos principais desafios da solda com cobre, já que a utilização de parâmetros de solda elevados resultam em arrancamento do metal dos *pads* (*metal lift*), e parâmetros baixos resultam em *non sticking* (sem solda). Bernd et al. (2011) revela que este é um processo iterativo, que passa por alguns projetos de experimentos e monitoramento das variáveis de resposta, como arrancamento de fios e cisalhamento de bola, medidas do tamanho e altura da bola soldada, enquanto são acompanhados os modos de falha e paradas de máquina. Testes de integridade de solda em England (2007 apud ZHONG, 2011) revelaram que um aumento na temperatura de solda aumenta a janela de processo para os parâmetros de solda, permitindo a utilização de força de soldagem menores, o que minimiza problemas nos *pads*.

Outra maneira de evitar problemas de rachaduras nos *bonding pads* é mudar a composição dos metais dos *pads*. Um exemplo é a utilização de *pads* de NiPd(Au) ao invés de Al. Esta configuração obteve desempenho superior em virtualmente todos os aspectos, como força da solda, janela de parâmetros, danos à estrutura e confiabilidade, no estudo desenvolvido por Clauberg, Backus e Chylak (2011). Devido à baixa ocorrência de *Kinkerdall Voids*, estes *pads* já foram adotados por algumas empresas inclusive para produção com fio de ouro.

Em experimento semelhante, Wei e Daud (2002) avaliou diferentes metalizações de *bonding pads*, soldados com fio de cobre através do processo de solda termossônica. A Tabela 2 demonstra o resultado da medida de dureza triangular (HT) e do percentual de *cratering* produzidos nas diferentes estruturas, mostrando como é possível otimizar este processo. Quanto mais duro for o *pad* maior será sua resistência à danos pelo fio de cobre.

Tabela 2: Resultado da medida de dureza triangular (HT) e do percentual de *cratering*.

Bond Pad	Hardness (HT)	% Cratering
Tipo A (100% Al)	36	18,5
Tipo B (100% Al)	52	2,5
Tipo C (100% Al)	59	0
Tipo D (Al – 1%Si)	75	0
Tipo E (Al – 1%Si)	155	0

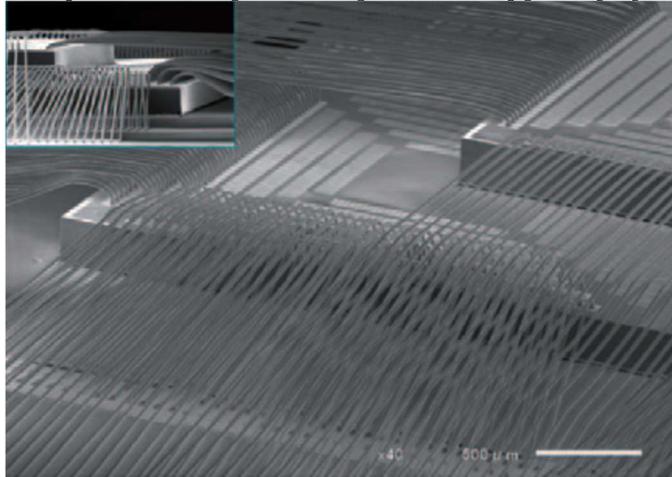
Fonte: Adaptado de Wei e Daud (2002).

2.5.5 Loop

Existem diversas configurações e perfis de *loop*, para atender aos diversos modelos de encapsulamento. Com a tendência à miniaturização, os loops se tornam cada vez mais baixos e próximos, alguns longos, outros curtos, e até mesmo reversos. A resistência mecânica elevada

do cobre e do paládio permitem que o *loop* seja mais rígido, minimizando problemas de curto-circuito entre os fios e *wire sweep*.

Figura 12: Exemplo de fine pitch stacking packaging.



Fonte: Uno (2011).

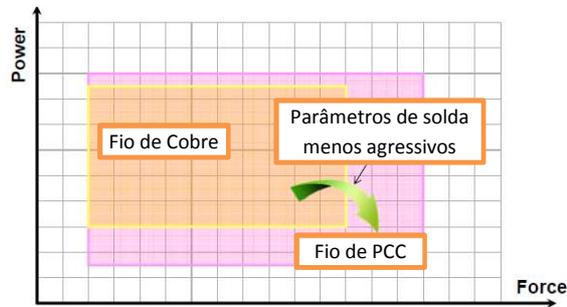
Portanto, o processo de *looping* não impôs nenhuma dificuldade e aparenta seguir de perto a capacidade deste processo obtida com fio de ouro (APPELT; TSENG; LAI, 2009). Pelo contrário, o fio de cobre facilitou este processo, permitindo fios mais longos e resistentes.

2.5.6 Solda no *Lead*

Logo no início da introdução do fio de cobre em larga escala, a principal dificuldade estava relacionada à estreita janela de processos para a solda no substrato. Constantes paradas de máquina acusando problema de *lead open* geravam trabalho extra aos técnicos, não sendo possível obter um processo estável (UNO, 2011). Inicialmente, tentou-se fazer melhorias nos equipamentos de solda. A inclusão de passos extras de solda, como múltiplos ciclos de ultrassom e a utilização do movimento de *scrub* aumentam a qualidade da solda, além de ajudarem a reduzir a incidência de *metal peel* (SHINKAWA, 2012).

Estudos evidenciam esta melhoria, que chegou a ter resultados de teste de arrancamento do *stich bond* até 60% superiores para *Bare Copper*, mas acompanhado de uma queda significativa na produtividade (UNO, 2011). Com o fio de cobre esmaltado, foi possível obter uma melhora drástica e valores satisfatórios para o *stich pull test*, com uma janela mais ampla para configuração de parâmetros (YAUW et al., 2010). A Figura 13 representa a janela de processos para ambos os fios (Cu e PdCu).

Figura 13: Janela de processos para 2nd bond (Cu e PdCu).

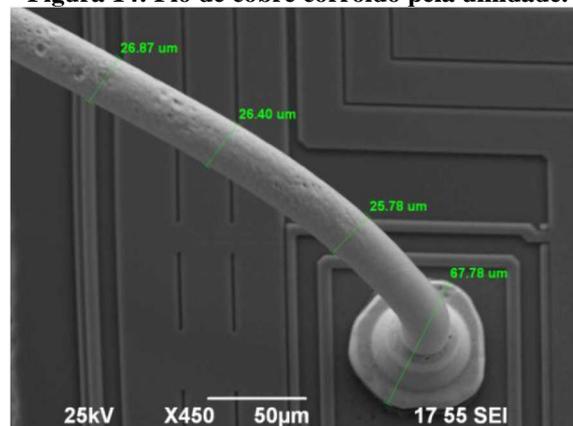


Fonte: MK Electron (2015).

2.5.7 Confiabilidade

Os componentes são utilizados em diversas aplicações, algumas delas exigindo altos níveis de segurança, como em servidores, setor automotivo e aviação, saúde, entre outros. Isto significa que ele deve resistir a diversos fatores ambientais como umidade elevada, ciclos térmicos, vibrações, pressão alta, etc. Para verificar a viabilidade da utilização de fios de cobre esmaltados nestes dispositivos, é necessário que eles sejam aprovados em uma série de testes de confiabilidade regulamentados ou exigidos pelos clientes. A principal preocupação neste caso é a corrosão do cobre. De acordo com Shankara (2004), encapsulamento plásticos (com resina epóxi) são expostos à ambientes hostis durante a operação, onde a difusão da umidade, contaminação por moléculas e conteúdo iônico podem ocorrer através dos poros da estrutura polimérica.

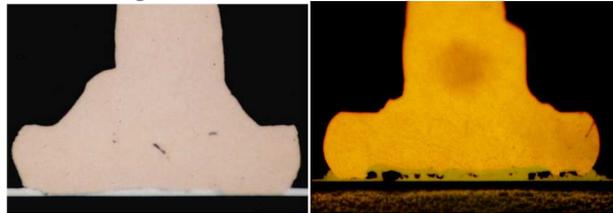
Figura 14: Fio de cobre corroído pela umidade.



Fonte: Lee, Trent e Higgins (2011).

O principal ponto a ser avaliado é a qualidade da solda. A solda no *pad* contém uma camada intermetálica (IMC), que deve segurar o fio no contato elétrico. O IMC criado entre o cobre e o alumínio é significativamente mais fino do que o formado entre alumínio e ouro, que contém mais fases. Apesar disto, o IMC da solda com cobre é mais robusto e estável. Além disso, Lee, Trent e Higgins (2011) destaca que o consumo do alumínio restante sob o *pad* é muito mais lento, o que impede a formação de *Kinkerdall Voids*. A Figura 15 compara os resultados do teste de armazenamento em temperatura elevada para um fio de cobre e um fio de ouro.

Figura 15: IMC e Kinkerdall Voids.

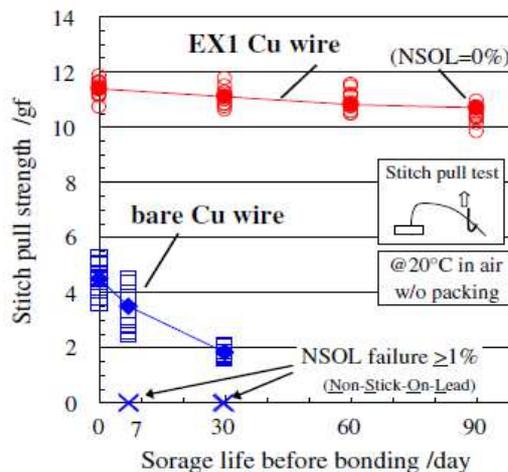


Fonte: MK Electron (2015).

As condições do teste são: 1000 horas de ensaio, com temperatura de 175°C e fio de 1.0mil. Analisando esta figura percebe-se que o fio de ouro teve a formação de bolhas na região do IMC, o que ocasiona circuito aberto e falha elétrica (MK ELECTRON, 2015).

A solda no substrato também sofre degradação, e precisa ser validada. Para o caso do fio de cobre, os resultados começam a degradar rapidamente após 96 horas em ambiente com umidade elevada (MK ELECTRON, 2015). Porém para o fio de PdCu, a camada de paládio protege o fio da oxidação, o que mantém os resultados em níveis muito bons, comparáveis com os resultados gerados com o fio de ouro (UNO, 2011).

Figura 16: Evolução do Stitch Pull Test (Cu e PdCu).



Fonte: Uno (2011).

2.6 O Método do Payback

Segundo Weston e Brigham (2000 apud SHINODA, 2008), o método do *payback* simples, ou período de retorno do investimento, é definido como o número de anos necessários para a recuperação do investimento original, tendo sido o primeiro método formal utilizado para avaliação de projetos. Boyle e Guntrie (2006 apud SHINODA, 2008) destacam que embora este método seja amplamente rejeitado pela comunidade acadêmica, ele ainda é amplamente utilizado por empresários. De acordo com Lima (2013) o *payback* simples apresenta como principal vantagem a facilidade de seu cálculo, por não exigir nenhuma sofisticação matemática, somente sucessivas subtrações.

Conforme Bajdiuk (2013), quanto menor o *payback* do projeto, ou seja, o tempo necessário para que os benefícios do projeto restitua o valor investido, menor também será o risco associado. Shinoda (2008) lembra que o *payback* mínimo aceitável varia de acordo com a condição socioeconômica e política do país, do setor de atividade econômica e das condições da empresa investidora. Para Kliemann Neto (2005 apud LIMA, 2013), o *payback* é um indicador complementar, sendo útil para situações de instabilidade econômica, de alto risco ou sujeitas a frequentes oscilações.

Contudo, o método do *payback* apresenta uma grande limitação, por não considerar o valor do dinheiro no tempo. Lima (2013) afirma que ao ignorar o efeito do dinheiro no tempo, o resultado obtido fica distorcido, apresentando como *payback* um resultado menor ou igual ao valor correto, isto é, associa-se um risco menor ou igual ao que provavelmente estará sujeito o projeto de investimento em estudo. O autor ainda destaca que nesse contexto, o *payback* calculado da maneira tradicional pode apontar de forma incorreta a viabilidade econômica de um projeto de investimento, existindo o risco de o projeto não se pagar dentro do horizonte de planejamento.

2.6.1 Payback descontado

Com o objetivo de superar a principal limitação do *payback* simples, foi desenvolvido o método do *payback* descontado, que avalia o investimento com base em fluxos de caixa descontados, levando em consideração o valor do dinheiro no tempo através da utilização de juros compostos (SHINODA, 2008). Também denominado de *Payback* ajustado, Lima (2013) indica que este método é adequado para corrigir distorções que podem ser geradas no cálculo

do *payback* de projetos de investimentos que se utilizam de financiamentos que apresentam períodos de carência.

Desta forma, o fluxo de caixa do projeto é atualizado através da aplicação da fórmula do Valor Presente, considerando uma taxa de juros definida pela empresa (SHINODA, 2008). A taxa normalmente utilizada é a TMA (Taxa Mínima de Atratividade), que reflete a realidade da empresa e do mercado, considerando o retorno que o investimento do mesmo capital utilizado no projeto poderia ter em outro investimento. Outra opção para a taxa de juros seria a utilização da taxa Selic, por exemplo.

Em resumo, o *payback* descontado informa o período de tempo necessário para que os benefícios advindos de um investimento possam cobrir seus custos, considerados a uma adequada taxa de juros (HIRSCHFELD, 1998 apud SHINODA, 2008). Lima (2013) ainda realça o fato de que apesar do *payback* descontado levar em consideração o valor do dinheiro no tempo, ele também:

- a) desconsidera os fluxos de caixa posteriores ao período identificado;
- b) para projetos de longo prazo, dificulta a aprovação;
- c) leva em conta a incerteza dos fluxos de caixa mais distantes;
- d) incorpora na sua aplicação o risco envolvido no projeto.

Nos próximos capítulos será apresentada a metodologia utilizada para realização deste estudo, aplicando os conhecimentos adquiridos durante a pesquisa bibliográfica, bem como o desenvolvimento do trabalho proposto e resultados obtidos ao longo dos experimentos.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo está dividida em duas etapas. Primeiramente foi analisada a viabilidade técnica da substituição de fios de ouro por fios de cobre no processo de soldagem de fios para o encapsulamento de memórias DRAM. Em seguida foi verificada a viabilidade econômica desta proposta, a partir dos resultados da etapa anterior.

Para avaliar a viabilidade técnica, foram considerados os resultados obtidos em outros estudos semelhantes com fio de cobre, verificados durante a pesquisa bibliográfica. Complementarmente, foi feita uma pesquisa de campo em empresa coreana, que levou em consideração os conhecimentos adquiridos com encapsulamentos de outros componentes que também utilizam o fio de cobre. Ambas as pesquisas foram focadas em pontos específicos que são determinantes para a obtenção de uma boa solda do componente. Segundo Gil (2007), a pesquisa é um procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. É um processo constituído de várias fases, desde a formulação do problema até a apresentação e discussão dos resultados. Sendo assim o estudo foi desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, periódicos, *websites*, artigos e também, na fase de pesquisa de campo, a partir dos dados obtidos do estudo de caso de uma empresa coreana fabricante de dispositivos semicondutores.

A partir destas pesquisas, foi elaborado um plano de desenvolvimento e qualificação para solda de memórias DRAM DDR3 com fio de cobre. Os ensaios técnicos foram feitos em uma soldadora modelo *KnS Icoon Power Series*, ano 2009, equipada de um *kit* para solda com fio de cobre. A receita foi criada a partir de outra receita semelhante de um componente já fabricado em massa com fio de cobre. Em seguida os parâmetros mais significativos para a qualidade da solda foram otimizados através de DOE. Após encontrar o modelo ideal que maximiza a qualidade da solda, o componente passou por um processo de caracterização, com finalidade de mensurar os atributos da solda.

É importante lembrar que para a realização de uma pesquisa, muitas vezes apenas o desejo do pesquisador não é suficiente para obtenção de bons resultados. É fundamental ter-se o conhecimento do assunto tratado, além de recursos humanos, materiais e financeiros. Neste sentido fica claro a enorme importância da colaboração entre universidades e empresas para os resultados obtidos nesta pesquisa. Máquinas *wire bonder*, materiais de encapsulamento como substratos, fios de ouro e cobre e equipamentos para caracterização dos protótipos são exemplos de recursos que demandam alto investimento para realização de pesquisa.

O estudo da viabilidade técnica foi dividido em sete etapas, conforme descrição no Quadro 1:

Quadro 1: Etapas para determinação da viabilidade técnica.

#	Etapa	Descrição	Dias
1	Educação técnica	Treinamento com especialista da empresa coreana sobre o processo de <i>wire bonding</i> .	8
2	Geração da receita de solda e seleção dos materiais	Gerar programa de solda a partir de outro componente semelhante fabricado com fio de cobre e definir os materiais utilizados (ferramentas e consumíveis).	1
3	Rodada experimental	Testar a solda nas memórias DRAM, modificando os parâmetros do equipamento de acordo com o conhecimento técnico e verificar visualmente a qualidade da solda para os parâmetros definidos.	3
4	Identificação dos fatores críticos	A partir da avaliação da rodada experimental, identificar os principais fatores que afetam a qualidade da solda e devem ser otimizados.	1
5	Otimização por DOE	Definir níveis ideais para os fatores selecionados através de DOE, estabelecendo uma janela de processo.	3
6	Caracterização da solda	Produzir amostra com parâmetros otimizados e avaliar qualidade do processo dentro da janela de processo.	2
7	Comparação entre fio de ouro e fio de cobre	Confrontar os resultados obtidos com ambos os fios e compará-los quanto às limitações técnicas da solda.	2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A etapa de comparação entre a solda com fio de ouro e fio de cobre foi dividida em quatro áreas: Parâmetros de processo; Performace; Materiais e Limitações. Para cada área existe um conjunto de itens que deve ser respondidos, sempre comparando o fio de ouro com o fio de cobre. Estes itens foram selecionados após a análise da literatura anteriormente apresentada e, também, após contatos com especialistas na área envolvida. O Quadro 2 elenca as áreas e os itens a serem investigados por cada uma delas. As limitações existentes também estão no mesmo quadro. Este ponto é importante, devido à inserção do estudo na realidade da indústria microeletrônica.

Quadro 2: Áreas e itens para comparação entre fios de cobre e fios de ouro.

7. Comparações entre a solda com fio de ouro e fio de cobre			
<u>1. Parâmetros de Processo</u>	<u>2. Performance</u>	<u>3. Materiais</u>	<u>4. Limitações</u>
1.1 Solda no <i>Pad</i>	2.1 Intermetálico	3.1 Fios esmaltados	4.1 Tipo de adesivo
Parâmetros e janela de processo	Área e espessura	PCC x APC	DAF, Epóxi, FOW
1.2 Solda no <i>Lead</i>	2.2 Testes BPT e BST	3.2 Propriedades dos fios	4.2 Espessura dos materiais (<i>die</i>, fio)
Parâmetros e janela de processo	Resistência mecânica da solda e modos de falha	Características principais	Qual a menor possível?
1.3 <i>Spark</i>	2.3 Modos de falha comuns	3.3 Metalizações dos <i>pads</i> / <i>lead</i>	4.3 <i>Pad Pitch</i>
Corrente e tempo;	Gráfico Pareto dos defeitos	É necessário modificar?	Qual o menor possível?
1.4 <i>Forming gas</i>	2.4 Produtividade	3.4 Capilares	4.4 Empilhamento de <i>Die</i>
Composição e fluxo	Unidades produzidas por hora	Modelos e vida útil	É possível?
1.5 Temperatura	2.5 Rendimento do processo	3.5 <i>Torch tip</i>, <i>Wire clamber</i>	4.5 Tamanho do fio
<i>Heater Block</i> , <i>Pre</i> e <i>Pos heater</i>	<i>Yield</i> geral dos produtos na etapa w/b	Modelos e vida útil	Qual o menor loop e maior fio possível?
1.6 Loop	2.6 Qualidade da solda	3.6 <i>Forming gas</i>	4.6 Temperatura
Modelo e perfil	Capabilidade dos requisitos	<i>Forming</i> x N ₂	Qual a máxima temperatura?

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir da avaliação dos resultados obtidos para cada item e da comparação destes com o exigido para a fabricação de memórias DRAM, será possível determinar qual a melhor combinação entre equipamentos, materiais e tipo de encapsulamento. Desta maneira será definido a existência ou não da viabilidade técnica para a fabricação de memórias DRAM utilizando fio de cobre. Então as definições de equipamento e materiais, bem como

características de processo (manufaturabilidade, produtividade, rendimento) servirão como dados de entrada para a segunda parte da metodologia, que visa avaliar a viabilidade econômica, respondendo se é economicamente vantajoso realizar esta substituição de materiais, e para qual volume.

Embora existam diversos métodos de avaliação de investimentos, como a VPL (valor Presente Líquido), a TIR (Taxa Interna de Retorno), e o EVA (Valor Econômico Agregado), escolheu-se pela utilização do método do *payback* nesta segunda parte do trabalho. Esta métrica é bastante conhecida e está descrita, entre outros, em SHINODA (2008). O *payback* calcula o tempo necessário para o retorno do investimento. Este indicador é muito importante principalmente neste tipo de negócio, onde a tecnologia muda constantemente devido à exigência do mercado por produtos com maior capacidade de memória e processamento. A utilização de fio de cobre no lugar de fio de ouro pode ser um negócio lucrativo, porém se a tecnologia de *flip chip* evoluir muito depressa, pode não haver tempo suficiente para se pagar o investimento antes de esta nova tecnologia dominar o mercado. Destaca-se o caráter atual desta situação.

O cálculo do *payback* levará em consideração diversos fatores, separados em custos fixos (investimento inicial), e custos variáveis. Os custos variáveis serão comparados entre o processo convencional (com fio de ouro) e o proposto (com fio de cobre). O Quadro 3 lista os itens a serem avaliados para o cálculo do *payback*.

Quadro 3: Fatores para cálculo do *payback*.

Custos Fixos	Custos Variáveis
Equipamento	Mão de obra
Instalação	Gás de proteção
Treinamento	Custo do capilar
NPI	Custo do fio
Ensaio de confiabilidade	Rendimento

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De posse dos resultados obtidos com a metodologia apresentada, uma empresa do setor poderá qualificar o processo de tomada de decisão à respeito de substituir ou não a tecnologia atual pela proposta de utilização de fios de cobre.

4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento da metodologia proposta foi realizado na Coréia do Sul, em uma empresa especializada em encapsulamento de componentes semicondutores como memórias DRAM, cartões SD, *pen drives* (SIP), dispositivos de rádio frequência (RF ID), MCP, eMMC, entre outros. A empresa possui vasta experiência nesta área, tendo atuado por mais de quinze anos neste mercado, atendendo à clientes como Samsung e Hynix.

O modelo de negócio da empresa é baseado em serviço (OEM), realizando o processo de montagem dos componentes conforme requisição dos clientes, sem possuir marca própria. A grande competitividade do mercado sul asiático exige elevado nível de eficiência nos processos, permitindo o desenvolvimento de novos produtos de forma rápida, com qualidade e baixo custo. Para que isto seja possível, é necessário que profissionais muito bem qualificados estejam constantemente melhorando os processos e solucionando problemas de produção.

4.1 Estudo da Viabilidade Técnica

O objetivo desta etapa é determinar se é possível e quais as condições necessárias para montar memórias DRAM DDR3 utilizando fio de cobre na etapa de *wire bonding* ao invés de fio de ouro, visando reduzir o custo final do produto. Isto significa definir quais os materiais necessários, consumíveis diretos e indiretos, ferramentas, equipamentos e recursos humanos para efetivar esta mudança.

4.1.1 Educação Técnica

Nesta etapa do estudo o autor teve a oportunidade de discutir questões relacionadas ao processo de *wire bonding* diretamente com um especialista da área. O treinamento foi realizado durante um período de oito dias, onde foi possível confrontar o conhecimento adquirido durante a pesquisa bibliográfica com a realidade vivenciada pelo especialista. O especialista atua como engenheiro de processo de *wire bonding* há sete anos na empresa, focado nos encapsulamentos que utilizam o fio de cobre.

O estudo foi conduzido com base nos aspectos importantes do processo de solda e nos materiais utilizados. Os documentos internos da empresa contendo as especificações técnicas foram revisados e explicados, sempre relacionando à solda com fio de cobre e às experiências vivenciadas pelo especialista. No período da manhã eram feitas as revisões dos documentos,

relatórios técnicos e questionamentos, e no período da tarde o assunto discutido era observado na linha de produção.

4.1.2 Substratos

Inicialmente foi discutido a respeito do substrato, sobre o qual o chip é colado e posteriormente os fios são conectados. Basicamente existem dois tipos de placas, os *leadframes* e os substratos (PCB). O *leadframe* é feito de cobre, além de ligas de estanho e níquel. Geralmente são fabricados através de processo de estampagem, e possuem uma estrutura delicada e com desníveis, exigindo atenção especial com relação ao manuseio, pois é muito frágil. O tempo de atravessamento deve ser reduzido devido à oxidação, e o design das ferramentas do *heater block* e do *window clamp* são complexos para acomodar a estrutura com desnível. Os *leadframes* são soldados com fio de cobre, e sua aplicação é normalmente para dispositivos de RF ID, com encapsulamento do tipo QFN.

Já os substratos, tipo de PCB utilizado no encapsulamento das memórias DRAM, são compostos de diversos materiais em sua estrutura, incluindo o cobre para formar as trilhas que conduzem o sinal. Porém a parte interna é feita de resina epóxi e a parte externa é coberta por uma camada de *solder resist*. Eles são extremamente resistentes à oxidação, com *lead fingers* e *ball lands* cobertos por fina camada de ouro, e extremamente flexíveis. Sua espessura pode variar de 100µm a 250µm, dependendo das dimensões finais desejadas para o produto. Alguns substratos possuem até quatro camadas de trilhas, porém o modelo utilizado para memórias DRAM contém apenas duas.

Deve-se ter cuidado especial com relação ao empenamento dos substratos, pois eles são muito sensíveis à temperatura. Este tipo de deformação causa problemas em outras etapas do processo de encapsulamento, devido ao desalinhamento da estrutura. A solda com fio de cobre exige uma temperatura maior com relação ao ouro, o que pode ser um problema por gerar empenamento excessivo. Este ponto é muito importante e deverá ser verificado durante a validação do processo com fio de cobre.

4.1.3 Fios de solda

Outro ponto estudado foram os tipos de fios utilizados, suas propriedades físicas e características no processo. A empresa utiliza diversos modelos de fios, incluindo algumas ligas de ouro e prata, fios esmaltados (cobre e paládio, cobre paládio e ouro) e fios de ouro. O

diâmetro varia de 0.55 Mils até 1.5 Mils, dependendo da aplicação. A qualificação de fornecedores é outro aspecto importante, pois embora a qualidade do fio não mude significativamente, o preço pode ser negociado.

Para controlar os modelos e garantir que sempre seja aplicado corretamente nos produtos, existe um robusto sistema de gerenciamento. O operador retira um novo carretel em uma máquina que verifica o modelo de acordo com o *travel card* do lote. Uma etiqueta externa na embalagem indica o material do fio, utilizando cores diferentes para cada liga, e a cor do carretel é de acordo com a espessura do fio. Ainda, ao carregar o carretel no equipamento, o sistema de gerenciamento de produção confere o modelo com a receita carregada na máquina.

A maioria dos produtos utiliza fio do tipo PCC ou fio de ouro. O PCC é usado nos *leadframes* e alguns substratos, enquanto que a maioria dos substratos são soldados com fio de ouro. O fio de ouro, por ser mais macio que o cobre, reduz a vibração do chip em encapsulamentos com empilhamento de chips, o que aumenta a precisão da solda. Ele também pode ser utilizado em uma quantidade maior de equipamentos, por não exigir gás de proteção. Além disso, possui uma vida útil e janela de processos maior, o que facilita o gerenciamento da produção.

4.1.4 Capilar

O capilar é o principal consumível indireto do processo, tendo influência direta na qualidade da solda, na quantidade de intermetálico formada, no formato da bola de solda sobre o *pad* e também na área de solda do *stitch*. A empresa utiliza muitos modelos de capilar, com dimensões e acabamentos diferentes, de diversos fabricantes. Um sistema semelhante ao utilizado para o gerenciamento dos fios é aplicado para os capilares.

As dimensões devem ser selecionadas de acordo com o diâmetro do fio e as dimensões do chip e do substrato, ou seja, o BPO e BPP, e a largura dos *bond fingers*. Como o fio de cobre possui menor deformação da bola de solda devido à sua dureza, pode-se selecionar um capilar com maior ICA e CD com relação ao ouro. Uma bola de solda maior maximiza a área de IMC e também reduz o impacto sobre os *pads*.

O fio de cobre exige que se utilize um capilar com acabamento rugoso, pois isto aumenta a adesão do fio à ponta do capilar no momento da formação da segunda solda. Isto também está relacionado à dureza elevada do cobre, e reduz a vida útil do capilar em média um terço com relação aos capilares utilizados com fio de ouro. Portanto, o custo do capilar é maior quando se utiliza fio de cobre, e além disso a produtividade é afetada, pois a troca de capilar é um processo

que pode levar de cinco a dez minutos, e também exige verificação da qualidade da solda após a substituição.

4.1.5 Critérios de qualidade

Os critérios de qualidade são especificados de acordo com os requisitos dos clientes. A empresa deve monitorar os produtos e garantir que eles atendam todos os critérios estabelecidos. Durante a produção de um produto, existem etapas de inspeção visual e testes para confirmar que as características mais importantes para a qualidade do produto estão sendo atendidas. Cada modelo de produto segue um plano de controle próprio, que indica o que deve ser verificado, com qual frequência e qual o documento para referência de como fazer a inspeção e avaliar.

Na etapa de *wire bonding*, as inspeções podem ser divididas em três partes: primeira solda, *loop*, e segunda solda. Para a primeira solda, são verificados o tamanho da bola de solda e formato, presença de *splash* de alumínio, altura da bola de solda, força de arrancamento, força de cisalhamento, área do intermetálico e presença de rachaduras nos *pads*. Como o ouro é mais macio, a bola de solda tende a se espalhar mais, possuindo diâmetro maior e altura menor com relação ao cobre. Isto pode causar curto circuito caso bolas adjacentes se encostem. A bola de solda com fio de cobre é mais fácil de controlar, porém seu formato nem sempre é redondo, devido à problemas de oxidação durante a formação da FAB. Além disso, a dureza elevada causa *splash* de alumínio, o que também pode causar curto entre *pads*.

A força de arrancamento apresenta resultados superiores com fio de cobre, devido à maior resistência mecânica do fio, porém o resultado do teste de cisalhamento com fio de ouro é melhor que o do cobre. Isto ocorre pois a espessura do intermetálico entre ouro e alumínio é muito maior do que o IMC entre cobre e alumínio. Por este motivo, a especificação para área mínima de IMC para ouro é de 80%, enquanto o cobre deve ter ao menos 90% da área. O fio de cobre é mais propenso a causar danos nos *pads*, graças à sua dureza, que causa estresse na frágil estrutura do chip.

Para a avaliação do *loop*, é importante conferir a altura máxima que ele atinge, e também o seu formato. A altura do *loop* é fácil de controlar para ambos os fios, porém o formato pode apresentar alguns problemas no caso do fio de ouro. Fios longos (maiores que 2mm) são propensos a apresentar *sagging wire*, *wire short* e também *wire sweep*. Estes modos de falha causam curto entre fios e são os principais problemas enfrentados pelo fio de ouro. O fio de

cobre apresenta grande vantagem neste aspecto, devido à sua alta resistência mecânica, que previne deformações no fio.

Já a solda no *lead finger* normalmente não apresenta grandes problemas, sendo fácil de obter um processo estável e confiável. Os pontos verificados são a área de solda, a presença de marca de capilar e *heel crack*. Através do controle da vida útil do capilar e dos parâmetros de solda esses defeitos são evitados, porém o fio de cobre apresenta uma tendência maior de ter *stitch peeling*, o que reduz a área da segunda solda e pode piorar o resultado do teste de arrancamento em casos severos.

4.1.6 Técnicas de análise de falhas

Muitas vezes as falhas não são identificadas pelas inspeções, e apenas nos processos seguintes é que estes defeitos são detectados. Isto dificulta muito a análise da causa raiz do problema, exigindo métodos sofisticados de análise para determinar o ocorrido e solucionar o problema. Aqui estão descritos as principais técnicas de análise de falhas utilizadas para investigação no processo de solda de fios.

O método mais comum é a utilização de raio x. Este é um teste não destrutivo, que permite a visualização dos fios de solda após a moldagem do componente. Por sua simplicidade e por não danificar o chip, ele é o primeiro método utilizado na maioria dos casos. Através da imagem é possível identificar curto entre fios, curto entre soldas, fios soltos, retorcidos ou quebrados, e também a disposição dos fios de acordo com o diagrama de solda. Para dispositivos com empilhamento de chips, esta análise pode se tornar exaustiva e complicada, devido à quantidade e sobreposição dos fios.

Por este motivo, por vezes é necessário utilizar a técnica de *decaping*. Ela consiste em atacar a resina epóxi do molde utilizando ácido nítrico, de forma gradual, expondo os fios e o substrato. No caso de encapsulamentos com PCB, deve-se tomar cuidado pois o ácido também ataca o substrato, que também é composto de resina epóxi. Isto pode causar movimentação dos fios e uma interpretação incorreta da falha. Para componentes com fio de cobre, é necessário utilizar o método de *laser decaping* ou *plasma decaping*, pois o ácido nítrico também ataca o cobre. Embora mais caro e demorado, ele garante uma precisão maior.

Para avaliação do intermetálico, a técnica mais comum é o *chemical etching*, também conhecida como KOH. Ela consiste em remover o alumínio dos *pads* quimicamente, com hidróxido de potássio. Desta forma o intermetálico pode ser visualizado na parte inferior da bola de solda, e também pode-se verificar a presença de rachaduras na estrutura logo abaixo

dos *pads*. No caso de componentes com fios de cobre, deve-se utilizar ácido nítrico para remoção dos fios, e então avaliar o IMC presente sobre os *pads*. Em seguida, o hidróxido de potássio pode ser utilizado para remoção do alumínio e análise de rachaduras.

Em alguns casos, é difícil de precisar se houve algum dano na estrutura do chip, ou então quer-se verificar outros aspectos como a espessura restante de alumínio abaixo da bola de solda e o *splash* de alumínio, a espessura do intermetálico, o formato e planaridade da bola de solda, e a estrutura do circuito abaixo dos pads (CUP). O ideal para estas análises é realizar um corte transversal (*cross section*) na região que deseja-se visualizar. Este corte pode ser feito através da técnica de *ion milling* ou FIB (*Focused Ion Beam*), que remove lentamente camadas do componente, expondo a superfície alvo de uma maneira clara e sem imperfeições causadas por polimento. Após expor a superfície, uma imagem de SEM (detector de elétrons secundários) é feita para análise morfológica.

Também pode-se desejar verificar a presença de materiais estranhos ou contaminantes, como por exemplo presença anormal de Fluor sobre os *bonding pads*, que causa problemas para a primeira solda. Uma análise de EDS (Espectroscopia de Energia Dissipativa) demonstra a composição química elementar do ponto desejado, que pode ser comparado com outro lote que não apresenta o problema. Assim é possível confirmar a presença de anormalidades e facilitar a identificação da origem das mesmas.

Por fim, técnicas para verificar o sinal elétrico são utilizadas com frequência. Porém deve-se ter uma indicação do local afetado previamente, pois são métodos demorados e trabalhosos. O teste de *Manual Probe* permite verificar a presença de circuito aberto ou fechado em cada um dos contatos do chip, sempre comparando a corrente de saída do componente problemático com um componente em perfeito estado de funcionamento. Porém não é possível afirmar se o problema na condução da corrente ocorre na esfera de solda, no substrato, no fio ou dentro do circuito do *chip*. Para esta análise é necessário utilizar a técnica de TDR (*Time Domain Reflectometry*).

4.1.7 Equipamento Kns Icoon Power Series

Para este experimento, foi selecionado uma máquina soldadora de fios da marca *KnS*, modelo *Icoon Power Series*, ano 2009. Este equipamento é um dos mais avançados disponíveis no mercado, com diversas funções para controle de parâmetros de solda, *loop* e formação da FAB. Na empresa onde o estudo foi conduzido, este é o modelo mais moderno presente, e uma máquina foi dedicada exclusivamente para os testes durante o período de duas semanas.

A partir deste momento, o autor recebeu treinamento para entender as ferramentas, funções, e operação desta máquina, adquirindo conhecimento necessário para desenvolvimento do experimento. Primeiramente, foram verificadas as ferramentas de processo, em seguida os parâmetros de solda foram estudados, e então a parte operacional foi praticada, para familiarização com a máquina e sua operação.

4.1.7.1 Ferramentas de processo

Para iniciar o processo de solda é necessário substituir algumas partes do equipamento, adaptando-o para o modelo de substrato e *chip* em questão. O *heater block* é uma peça que fica logo abaixo do substrato, tendo a função de aquecer e fixar o PCB, facilitando a solda e impedindo que este se movimente durante o processo. A fixação do substrato ocorre através de pequenos orifícios no *heater block*, que aplicam vácuo diretamente na parte traseira do *chip*. Complementarmente, o *window clamp* prende a parte superior do PCB, pressionando-o contra o *heater block*. Ao posicionar estas ferramentas é muito importante verificar a pressão de vácuo e a área disponível para solda na parte superior.

Após selecionar ambas as peças citadas e verificar a correta fixação do substrato, foi instalado o *kit* para solda com fio de cobre. Este *kit* é vendido separadamente como um opcional ao equipamento. Ele é composto de dois canais para alimentação de gás inerte. Um canal é dedicado à formação da FAB, e outro canal sopra o ar sobre o *lead finger*, para auxílio durante a segunda solda. Os canais são controlados individualmente, sendo possível ajustar o fluxo de gás através de um regulador. O objetivo desta ferramenta é evitar a oxidação do cobre, permitindo a geração de FAB esféricas.

4.1.7.2 Parâmetros

As máquinas soldadoras contém uma série de parâmetros para o controle do processo. O nome dado à estes parâmetros varia entre os fabricantes, porém a função é a mesma. Conhecimento sobre o processo é importante para determinar quais os parâmetros são mais importantes e que devem ser otimizados, pois a verificação de todos eles levaria muito tempo. Os principais fatores neste caso são o tempo e corrente da faísca para formação da FAB, e a força, tempo e ultrassom para formação da primeira e segunda solda, e também a temperatura do *heater block*.

Contudo, para o caso do fio de cobre, o *kit* ainda inclui uma atualização do *software* (*Pro Stitch*), que permite o modo de solda chamado de *step bonding*. Este modo permite que sejam utilizados até dez configurações de solda para solda no *pad* e no *lead*. Normalmente apenas uma combinação de parâmetros é utilizada, porém a solda com fio de cobre exige um controle maior dos parâmetros. Desta forma, para um ponto de solda, diferentes passos são utilizados, variando força, ultrassom, tempo, entre outros. Apesar de melhorar a qualidade da solda, isto dificulta muito a otimização do processo, devido à enorme quantidade de variáveis envolvidas.

4.1.7.3 Operação

Para habituar-se com o método de operação da máquina foram necessários dois dias de treinamento intenso. Conhecimento do menu de operação e configuração de parâmetros são necessários para realização do experimento, e também para sanar problemas básicos de processo. O sistema é amigável, apesar de ter poucas figuras, e o teclado adaptado para controle das funções é muito intuitivo e superior ao dos concorrentes. O *kit* para solda com fio de cobre dificulta um pouco o processo de passar o fio pelo capilar, porém como o cobre tem alta resistência mecânica, o fio tende a ficar reto e facilitar o *wire thread*.

Após apenas dois dias de treinamento no equipamento, o autor já estava apto a conduzir os experimentos, realizando todos os passos por conta própria. Vale a pena destacar a qualidade da soldadora, que se mostrou extremamente estável durante esta etapa. A partir deste momento o *set up* foi finalizado, estando tudo pronto para o início dos testes. O especialista acompanhou toda a realização dos testes e avaliação das amostras, até a validação do processo.

4.1.8 Planejamento do experimento

O método utilizado para desenvolvimento do produto foi adaptado do procedimento padrão da empresa coreana. Primeiramente foram selecionados os materiais (fio de solda e capilar) e então foi criada a receita de solda, a partir de outra receita similar. Em seguida uma rodada experimental foi executada para configurar os parâmetros de solda, até obtenção de um processo estável e com características de qualidade aceitáveis. A partir do resultado deste experimento inicial, os fatores críticos para qualidade da solda do produto foram identificados e então otimizados através de DOE.

Em seguida foi estabelecida uma janela de processos para estes parâmetros, para permitir que o produto seja fabricado em diferentes máquinas, que apresentam pequenas diferenças em suas configurações, portanto exigindo ajustes para atingir uma produção estável. A janela de processos foi configurada com auxílio do software estatístico JMP, utilizando a função de *Surface Response Design*, que gera um modelo quadrático da superfície de resposta a partir da avaliação das interações entre os fatores considerados no experimento. Após a definição dos valores máximos e mínimos de cada variável, foram produzidas amostras com as configurações mínima, média e máxima, para validação. Estas amostras foram caracterizadas por testes de qualidade, e finalmente os resultados obtidos foram comparados com os resultados dos mesmos testes para o fio de ouro.

4.2 Geração da receita de solda e seleção dos materiais

A versão inicial da receita para solda foi gerada a partir de uma outra receita do mesmo equipamento para um componente semelhante. Sendo assim, as configurações básicas de operação foram mantidas, porém os parâmetros de solda precisaram ser modificados. Além da parametrização, a receita é composta pelo sistema de visão, onde são ensinados ao equipamento os pontos de reconhecimento do substrato e do chip, para alinhamento da câmera e reconhecimento do componente. Por fim, o diagrama de solda e sequência foram especificados, finalizando este processo.

O fio escolhido para este estudo foi um fio de cobre do fabricante coreano Heesung. O diâmetro de 0.7 Mils é compatível com as dimensões dos contatos tanto do chip quanto do substrato. O fio é esmaltado com uma fina camada de paládio (entre 50 e 100 nm) para prevenir a oxidação e aumentar a sua vida útil, por isto é chamado de *PCC Wire (Palladium Coated Copper Wire)*. Já a seleção do capilar foi feita com base no diâmetro do fio, nas dimensões dos *pads* (BPO = 50 μ m), na distância entre *pads* (BPP = 64.5 μ m), e também no tamanho e altura desejados para bola de solda. A superfície do capilar escolhido é rugosa, maximizando o efeito de *scrub* na segunda solda.

Para seleção do gás inerte, foi feito um teste comparativo entre o *forming gas* (95% N₂; 5% H₂) e o nitrogênio puro. Para obter uma FAB do mesmo tamanho utilizando apenas nitrogênio, foi necessário aumentar o tempo de disparo de EFO de 270 para 278 μ s, o que não representa problemas para produtividade. Então foi verificado o formato da FAB e da bola de solda. Apesar de pequenas imperfeições nas FABs formadas com nitrogênio, foi possível obter bolas de solda com formato semelhante às geradas com *forming gas*. Para redução de custos,

decidiu-se por utilizar o nitrogênio neste experimento. A Figura 17 demonstra as FABs geradas a partir do nitrogênio. Embora o formato não seja perfeitamente esférico, nenhuma FAB pontiaguda ou achatada foi encontrada.

Figura 17: FABs obtidas com nitrogênio como gás inerte.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3 Rodada experimental

Estando a máquina configurada e com os materiais carregados, o próximo passo consiste em soldar algumas unidades e avaliar as características visuais da solda. Para esta etapa, quanto maior for a experiência do pesquisador no processo de *wire bonding*, melhor será o resultado e mais rápido os parâmetros ideais serão encontrados. É válido ressaltar que não existe uma receita perfeita, cada engenheiro irá configurar o equipamento de acordo com sua perspectiva, porém atendendo aos requisitos de qualidade. A solda pode ser obtida por diferentes métodos ou passos, e por isso as preferências e experiência do engenheiro é que irão nortear as decisões.

Cada conjunto de parâmetros é responsável por uma etapa do processo de solda. Estas etapas e a influencia de cada parâmetro devem ser bem compreendidas para que os ajustes sejam precisos, dispensando a necessidade de inúmeros experimentos. O Quadro 4 resume os principais passos do processo para a primeira solda, seus parâmetros com maior influência na qualidade e a sua função.

Quadro 4: Passos principais da primeira solda.

Passo	Parâmetros	Função
Spark	Current	Derreter a cauda do fio para fazer a <i>Free Air Ball</i> .
	Time	
Initial Force	CV	Definir o tamanho e altura da bola de solda.
	Threshold	
	Pre Bleed	
seg 1 (Force)	USG	Aprimorar o formato da bola de solda.
	Time	
	Force	
seg 2 (Scrub)	USG	Tornar a parte inferior da bola de solda mais plana.
	Cycles	
	Force	
seg 3 (Force)	USG	Formar o intermetálico.
	Time	
	Force	
seg 4 (Force)	USG	Auxiliar a formação do intermetálico e fixação da solda.
	Time	
	Force	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Utilizando uma amostra de substrato com memórias DRAM DDR3, iniciou-se um processo iterativo de solda, inspeção visual e ajustes de parâmetros, com base no conhecimento técnico e influência de cada variável. Nesta etapa verificou-se que o controle das dimensões da bola de solda não necessita de grande atenção como é o caso do fio de ouro, pois grandes mudanças nos parâmetros da primeira solda geram pouca ou nenhuma diferença no tamanho da bola, sendo o capilar e os parâmetros de *spark* os responsáveis por seu formato. Também não foi observado *splash* de alumínio, que é comum em solda com fio de cobre.

Contudo, ao realizar ensaios de arrancamento do fio, foi verificado que apesar dos resultados estarem acima do especificado, o modo de falha de rompimento do fio mais comum foi o desprendimento da bola de solda do *bonding pad*. Isto ocorre devido à fina camada de alumínio presente nos *pads* destes componentes, o que facilita a ocorrência de *metal lift*. Sendo assim, durante o processo de otimização dos parâmetros da primeira solda, a variável de resposta selecionada foi a quantidade de *metal open* resultante nos testes de BPT, com o objetivo de minimizá-las.

Foram necessárias vinte e quatro rodadas experimentais para encontrar a combinação ideal dos parâmetros que minimizam este modo de falha. Os resultados melhoraram após o aumento do tamanho da FAB, o que distribui o estresse em uma área maior do *pad*, em conjunto

com um aumento da temperatura do *heater block* em 25°C, para aumentar a temperatura máxima no momento da solda e maximizar a formação de intermetálico.

A segunda solda não apresentou grandes dificuldades, apesar de uma ocorrência alta de *stitch peeling*. Como o modo de falha nos testes de BPT em nenhum momento foram de *stitch open*, significa que mesmo com a área de solda reduzida sobre os *lead fingers* a força necessária para arrancá-la ainda é superior à necessária para arrancar a bola de solda ou quebrar o fio. Mesmo assim, decidiu-se por otimizar os parâmetros da segunda solda, para que não ocorram problemas de produção, como paradas de máquina.

Foram necessárias vinte e uma rodadas experimentais para que não fosse verificado nenhum *stitch peeling* nos componentes soldados. Os fatores responsáveis por melhorar esta condição foram o aumento da força de solda e redução do ultrassom no primeiro passo, seguido por um aumento de força e ultrassom no terceiro passo. O segundo passo, onde é feito o movimento de *scrub*, também precisou ser modificado, aumentado para 4 ciclos com 3um de amplitude, o que causa grandes impactos na produtividade. A Tabela 3 resume as condições iniciais e finais para os parâmetros otimizados ao final da rodada experimental.

Tabela 3: Condições iniciais e finais para os parâmetros otimizados.

Passo	Etapa		1ª Solda		2ª Solda	
	Parâmetro	Unidade	1ª rodada	24ª rodada	1ª rodada	21ª rodada
Spark	<i>Current</i>	<i>mAmps</i>	40	40		
	<i>Time</i>	μ s	270	270		
Initial Force	<i>CV</i>	<i>mils/ms</i>	0,3	0,3	N/a	
	<i>Threshold</i>	%	50%	50%		
	<i>Pre Bleed</i>	<i>mAmps</i>	25	25		
seg 1 (Force)	<i>USG</i>	<i>mAmps</i>	0	0	20	5
	<i>Time</i>	μ s	5	5	3	3
	<i>Force</i>	<i>gf</i>	25	30	20	40
seg 2 (Scrub)	<i>USG</i>	<i>mAmps</i>	25	15	15	20
	<i>Cycles</i>	<i>ea</i>	2	2	2	4
	<i>Amplitude</i>	μ m	2	2	2	3
	<i>Force</i>	<i>gf</i>	20	20	50	60
seg 3 (Force)	<i>USG</i>	<i>mAmps</i>	55	50	130	160
	<i>Time</i>	μ s	10	15	12	15
	<i>Force</i>	<i>gf</i>	5	5	40	60
seg 4 (Force)	<i>USG</i>	<i>mAmps</i>	50	50	N/a	
	<i>Time</i>	μ s	5	10		
	<i>Force</i>	<i>gf</i>	10	10		
Heater Block	<i>Temp.</i>	$^{\circ}$ C	175	200	200	200
Avaliação	Item		<i>Metal Open</i>		<i>Stitch Peeling</i>	
	Quantidade		1	0	17	0

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao término desta fase do processo de desenvolvimento da solda com fio de cobre, já é possível produzir amostras do produto final e verificar sua qualidade e confiabilidade. Contudo, ainda não é possível dizer se é viável a produção em massa deste componente. Para produção em larga escala, diversas máquinas deverão ser utilizadas, e embora todas elas sejam do mesmo modelo e estejam devidamente calibradas, ainda assim haverá pequenas diferenças entre elas.

Além disso, durante os ciclos de solda o equipamento e as ferramentas apresentarão um desgaste natural, que exigirá pequenos ajustes de parâmetros de solda para que a máquina possa continuar trabalhando sem que ocorra uma intervenção prolongada. Por este motivo, é preciso estabelecer uma janela de processos para os parâmetros críticos de solda, permitindo a continuidade da operação de maneira rápida, mantendo os mesmos níveis de qualidade e sem prejudicar a capacidade de produção.

Na empresa onde o estudo foi conduzido, para cada produto desenvolvido, são determinadas janelas de processo para os principais parâmetros de processo, que afetam o resultado dos testes de qualidade do produto. A extensão para o ajuste de cada variável é então documentada na instrução de trabalho, e configurada no sistema de gerenciamento de fábrica. Sempre que ocorre a alteração do valor de alguma destas variáveis no equipamento, o sistema recebe a informação do evento e confere se os novos valores estão dentro do permitido, validando o processo e prevenindo a fabricação de componentes defeituosos.

4.4 Identificação dos fatores críticos

O próximo passo do desenvolvimento é a identificação de quais as variáveis do processo de solda que afetam as características de qualidade do produto. Normalmente elas não se modificam de um produto para outro, sendo bem conhecidas pelos engenheiros de *wire bonding*. Em casos especiais, pode-se desejar controlar um parâmetro específico, como a utilização de movimentos de *scrub* ou ângulos de formação de *loop* (componentes com *stack*), ou ainda restringir a modificação de variáveis.

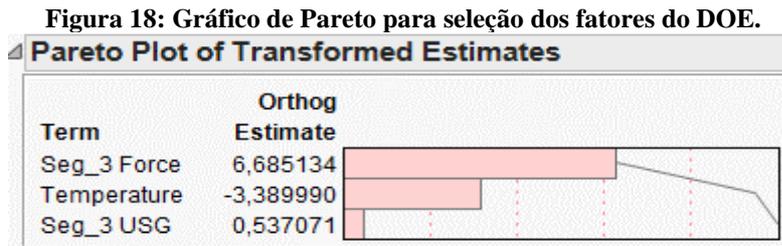
Porém na maioria dos casos os parâmetros que recebem maior atenção são os descritos no Quadro 4. Durante anos de experiência e vivência no chão de fábrica, os engenheiros já realizaram diversos experimentos que comprovaram a grande influência que estes componentes têm sobre as características de qualidade do produto. Ainda, estas são as variáveis que os fabricantes recomendam ter-se maior atenção. Desta forma, não será necessária a realização de um estudo à parte para identificação dos fatores críticos da solda, utilizando o conhecimento prévio do processo para determinações dos mesmos.

Durante a etapa de rodada experimental, constatou-se que o maior risco à qualidade das memórias DRAM soldadas com fio de cobre é a ocorrência de *metal open*. A fina camada de alumínio presente sobre os *bonding pads* é danificada pela dura FAB de cobre, e acaba se despreendendo do circuito abaixo dos *pads*, podendo gerar problema na condução do sinal (circuito aberto) ou então não possuir os requisitos mínimos para força de cisalhamento ou arrancamento do fio, apresentando potencial de falhas de confiabilidade.

Por este motivo, decidiu-se por otimizar a etapa da primeira solda, garantindo a não ocorrência de *metal lift* e ao mesmo tempo atendendo às especificações de qualidade. A otimização foi feita através de DOE, objetivando estabelecer uma janela de processos para os fatores críticos da solda no *pad*, que minimizam os danos sobre a estrutura dos *pads* e

maximizam a qualidade da solda. Vale lembrar que esta janela deverá ser larga o suficiente para permitir a produção em massa.

Os fatores foram selecionados de acordo com o resultado da rodada experimental. Os dados coletados serviram de entrada para geração de um modelo no software JMP, que revelou as variáveis com maior efeito para redução de *metal open*, conforme o gráfico de Pareto da Figura 18.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 4 lista as variáveis de resposta e os fatores selecionados para este experimento. Os limites para a força de cisalhamento e de arrancamento do fio são requisitos do cliente. Já os limites para o diâmetro da bola estão relacionados às dimensões da estrutura do *pad*, e os limites para a altura da bola estão associados à forma da bola de solda. Por fim, a ocorrência de *metal open* deve ser nula. Os limites para cada um dos fatores foram estabelecidos com base nos resultados obtidos durante a rodada experimental e o conhecimento do processo.

Tabela 4: Variáveis de resposta e fatores para DOE da solda no *pad*.

Variáveis de resposta				
Característica	Objetivo	Limite Inferior	Limite Superior	Tamanho da amostra
Diametro da bola	Atingir alvo	36 μm	44 μm	10
Altura da bola	Atingir alvo	4 μm	15 μm	10
Força de arrancamento	Maximizar	3 gf	-	25
Força de cisalhamento	Maximizar	7 gf	-	25
<i>Metal open</i>	Minimizar	-	0	72
Fatores				
Parâmetro	Passo	Limite Inferior	Centro	Limite Superior
<i>USG</i>	Seg-3 (Force)	40 mAmps	50 mAmps	60 mAmps
<i>Time</i>	Seg-3 (Force)	10 μs	15 μs	20 μs
<i>Force</i>	Seg-3 (Force)	5 gf	10 gf	15 gf

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.5 Otimização por DOE

O próximo passo consiste em otimizar os parâmetros selecionados como críticos para qualidade da primeira solda, encontrando a configuração ótima para eles e definindo a extensão de trabalho de cada um. Para auxiliar neste processo foi utilizado a ferramenta estatística JMP versão 10. A escolha pela utilização deste *software* levou em conta o fato de ser o *software* oficial utilizado pelos engenheiros da empresa coreana para este tipo de projeto, e que estes receberam treinamento formal nesta ferramenta durante o ano de 2015.

A configuração das variáveis de resposta e dos fatores foi feita utilizando o modelo de *Response Surface Design* do tipo *Box-Behnken*. Segundo MiniTab (2015) o RSD é uma técnica avançada de DOE que ajuda a entender melhor e otimizar as respostas, utilizada em especial quando se suspeita de curvaturas na superfície da resposta. SAS Institute (2015) afirma que o RSD é útil para modelar uma superfície curva quadrática de fatores contínuos, possibilitando a identificação da resposta máxima e mínima dentro da região dos fatores.

O modelo *Box-Behnken* possui geralmente um número reduzido de pontos para criação do modelo, permitindo a realização de experimentos mais rápidos e com custos menores, porém com o mesmo número de fatores (MINITAB, 2015). Este design necessariamente possui sempre três níveis para cada fator, e o cubo definido pelos níveis dos fatores não possui pontos nos vértices, o que pode ser proveitoso quando deseja-se evitá-los devido às considerações de engenharia (SAS INSTITUTE, 2015). No caso estudado da solda com fio de cobre, isto é válido, pois a utilização de todos os fatores no nível máximo produz amostras com características de qualidade próximas ao limite aceitável, caracterizando um processo com baixa capacidade. Também um equipamento que necessita operar com todos os fatores no nível máximo provavelmente necessita de reparos.

A tabela para realização dos ensaios foi gerada automaticamente pelo programa JMP, contendo 15 combinações dos fatores em diferentes níveis, com três pontos centrais. A ordem para a realização de cada combinação é aleatória, para evitar ruídos externos. Para cada padrão, cinco unidades de memória DRAM DDR3 foram produzidas. A primeira amostra de cada padrão não foi considerada para avaliação dos resultados, visto que o equipamento pode apresentar algum erro logo após a mudança dos parâmetros. A segunda amostra foi utilizada para medição da altura e diâmetro da bola de solda, a terceira amostra para o teste de BST, a quarta amostra para o teste de BPT e a quinta amostra para a verificação de *metal open*.

Previamente à utilização das amostras para costura, elas passaram pelo processo de limpeza por plasma e jato de ar, para evitar que o resultado fosse afetado por alguma impureza

na superfície das peças. Durante a realização dos ensaios a máquina apresentou um desempenho excelente, não ocorrendo nenhuma falha de solda. A verificação das variáveis de resposta de todas as rodadas ocorreu no mesmo dia, para evitar que a oxidação do fio de cobre tivesse influência no resultado. A Tabela 5 contém os resultados do experimento.

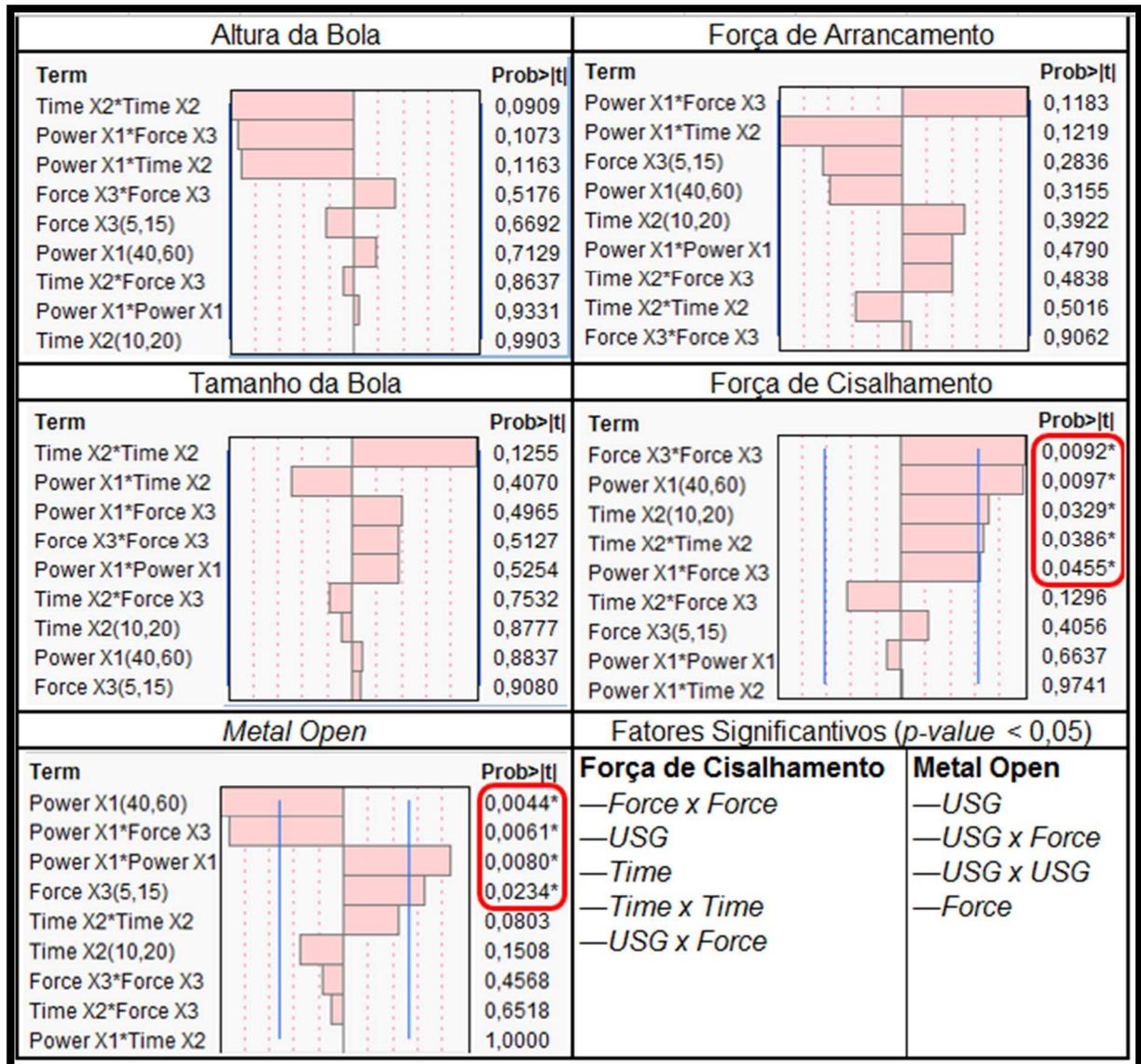
Tabela 5: Resultados do DOE para otimização da solda no *pad*.

Box Behnken		Fatores			Variáveis de Resposta				
#	Padrão	Power	Time	Force	Ball Height	Ball Size	BPT	BST	Metal Open
1	+0-	60	15	5	13,4	37,9	7,0	15,9	5
2	+ -0	60	10	10	12,2	38,8	7,1	16,3	5
3	-0+	40	15	15	13,1	38,6	6,8	14,5	14
4	000	50	15	10	13,0	38,1	6,9	15,1	2
5	000	50	15	10	12,6	38,0	7,1	14,6	0
6	++0	60	20	10	11,8	38,7	6,9	16,8	1
7	000	50	15	10	11,8	38,3	7,1	14,6	1
8	0-+	50	10	15	12,4	38,6	6,9	16,8	6
9	0--	50	10	5	12,4	39,1	6,9	15,4	0
10	--0	40	10	10	10,9	38,3	6,8	14,5	15
11	0+-	50	20	5	11,9	38,8	6,9	19,1	0
12	+0+	60	15	15	12,1	38,9	7,0	18,6	0
13	-0-	40	15	5	12,2	38,3	7,6	15,5	0
14	0++	50	20	15	11,6	38,1	7,1	17,9	4
15	-+0	40	20	10	12,6	38,9	7,3	15,0	11

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir dos valores obtidos para as variáveis de resposta, o software JMP é capaz de calcular a influência que cada fator tem sobre a característica de qualidade mensurada. Considerando-se um nível de confiança de 95%, caso o fator exerça uma mudança significativa na resposta, o valor p calculado deve ser menor do que 0,05. Para cada variável de resposta, o programa calcula o grau de influência dos fatores e combinações de fatores. A Figura 19 resume os resultados obtidos neste experimento.

Figura 19: Fatores com influencia significativa sobre as variáveis de resposta.



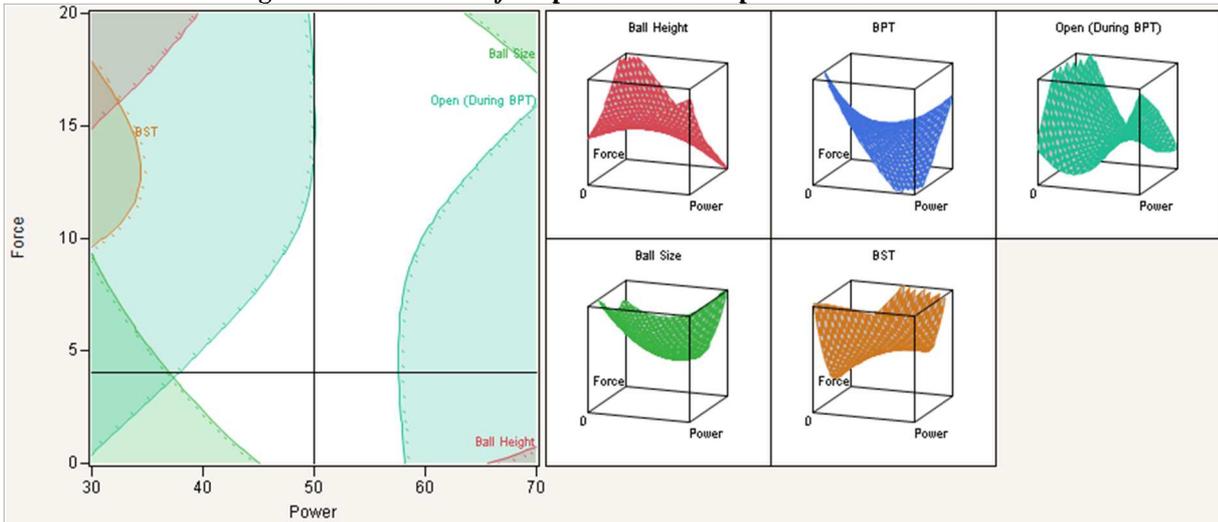
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com isto, pode-se concluir que os fatores inicialmente selecionados para o DOE realmente modificam o resultado da característica de qualidade que se deseja otimizar, no caso a ocorrência de *metal open*. O próximo passo é encontrar os valores ideais para estes parâmetros, e estabelecer desta forma uma janela de processo, que possibilite pequenos ajustes nos equipamentos e ao mesmo tempo garanta a qualidade do produto.

A partir do modelo criado pelo programa com base nos resultados do DOE, é possível acessar a ferramenta *Profiler*, que é uma opção particularmente valiosa para o entendimento do modelo. Ela é útil para explorar a superfície de resposta do modelo, e desta forma encontrar a melhor combinação de valores para os fatores. Neste estudo, utilizou-se a opção *Counter Profiler*, que contém uma visualização gráfica excelente. O fator tempo foi fixado no seu valor

mínimo, e a área de processo para os fatores força e ultrassom estão representados pela área branca, conforme a Figura 20.

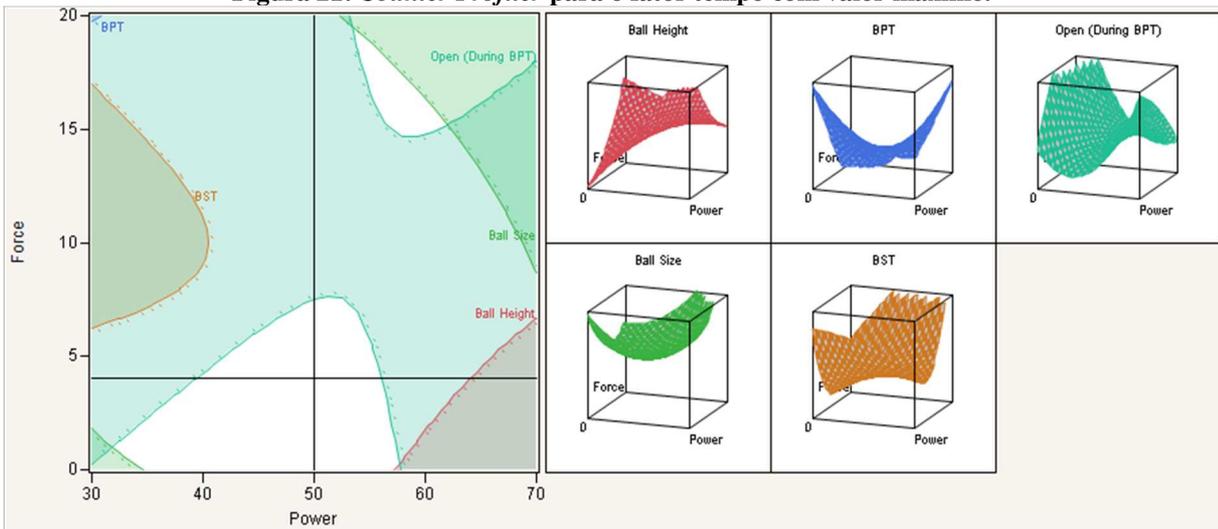
Figura 20: Counter Profiler para o fator tempo com valor mínimo.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em seguida o fator tempo foi fixado em seu valor máximo. A razão para este procedimento é que se deseja ter uma extensão grande para ajuste da variável tempo, devido à questões de engenharia. A Figura 21 demonstra o mesmo gráfico, porém para o fator tempo fixado em seu valor máximo.

Figura 21: Counter Profiler para o fator tempo com valor máximo.

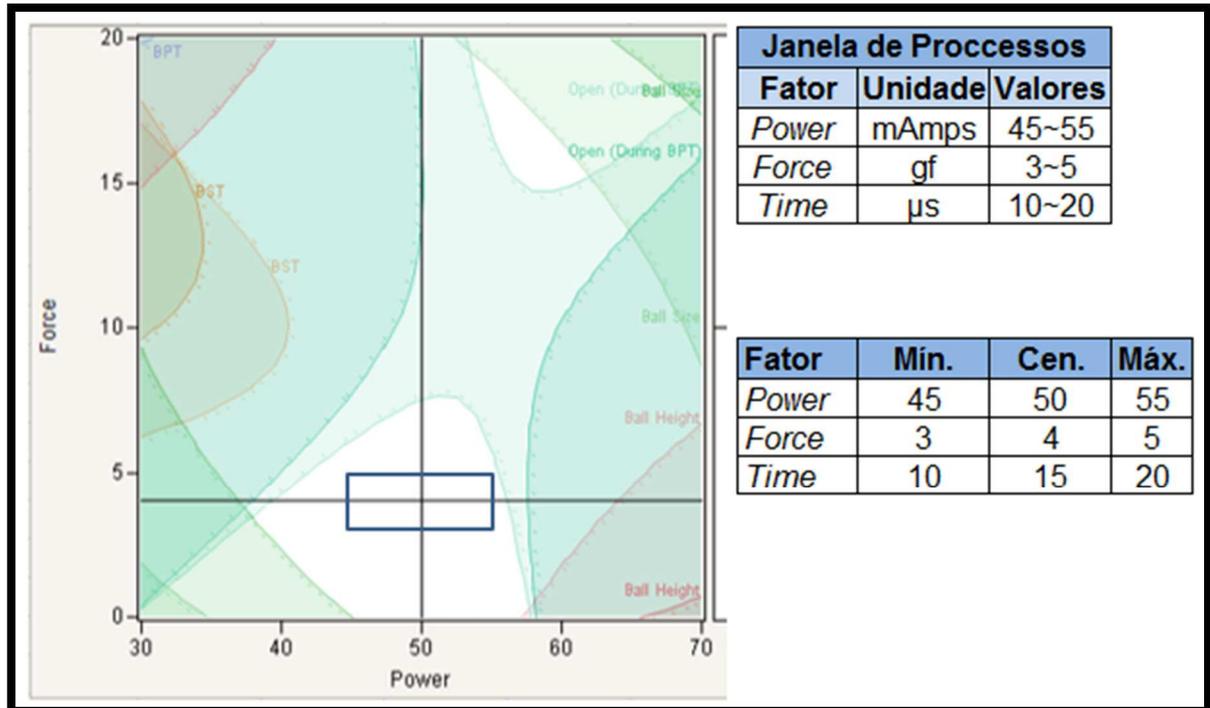


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A sobreposição destas duas imagens demonstra a área de processos factível dentro de toda extensão do fator tempo. Assim foi possível definir os valores máximos e mínimos para

os fatores força e ultrassom, que não irão gerar produtos fora das especificações para as variáveis de resposta medidas. A Figura 22 contém a sobreposição dos gráficos, com o retângulo azul representado a área de processo.

Figura 22: Janela de processos para os fatores.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.6 Caracterização da solda

Após a definição da extensão aceitável para a configuração dos valores de cada um dos fatores críticos, o próximo passo consiste na validação destes valores. Para este propósito, foram produzidas trinta amostras com a configuração mínima ($power = 45$; $force = 3$; $time = 10$), trinta amostras com a configuração central ($power = 50$; $force = 4$; $time = 15$) e trinta amostras com a configuração máxima ($power = 55$; $force = 5$; $time = 20$). O número elevado de amostras serviu para confirmar a manufaturabilidade do processo com os diferentes níveis para os fatores críticos.

Estas amostras foram posteriormente verificadas com relação à sua distribuição, capacidade e atendimento aos requisitos de qualidade. Nesta etapa também foi utilizado o *software* estatístico JMP. Todas as distribuições são normais, podendo-se calcular o Cpk. O valor do Cpk deve ser acima de 1,66 para os testes de BPT e BST, quando utilizados os valores

com a configuração central. Os demais valores de Cpk são apenas para referência. O Quadro 5 indica os itens a serem verificados para validação das amostras.

Quadro 5: Método para validação da qualidade das amostras.

Caracterização da solda			
Item	Critério	Método	Equipamento
Formato da bola de solda	Circular	Visual	Microscópio óptico (10~50x)
<i>Stitch peeling</i>	sem <i>peeling</i>	Visual	Microscópio óptico (500x)
Perfil do loop	sem <i>sagging</i>	Visual	Microscópio óptico (10~50x)
Fios em curto	sem curto entre fios	Visual	Microscópio óptico (10~50x)
Diagrama de solda	conforme diagrama	Visual	Microscópio óptico (10~50x)
Tamanho da bola	36~44 μ m	Medição	Microscópio óptico (500x)
Altura da bola	4~15 μ m	Medição	Microscópio óptico (500x)
Teste de arrancamento	Mín. 3gf	Medição	Dage 4000 tester
Teste de cisalhamento	Mín. 7gf	Medição	Dage 4000 tester
Intermetálico	Mín 80%	Visual	Microscópio óptico (500x)
Estrutura do <i>pad</i>	Sem rachaduras	Visual	Microscópio óptico (500x)
<i>Al splash</i>	Sem curto entre soldas	Visual	Microscópio óptico (500x)
<i>Metal open</i>	Sem <i>metal open</i>	Visual	Microscópio óptico (500x)

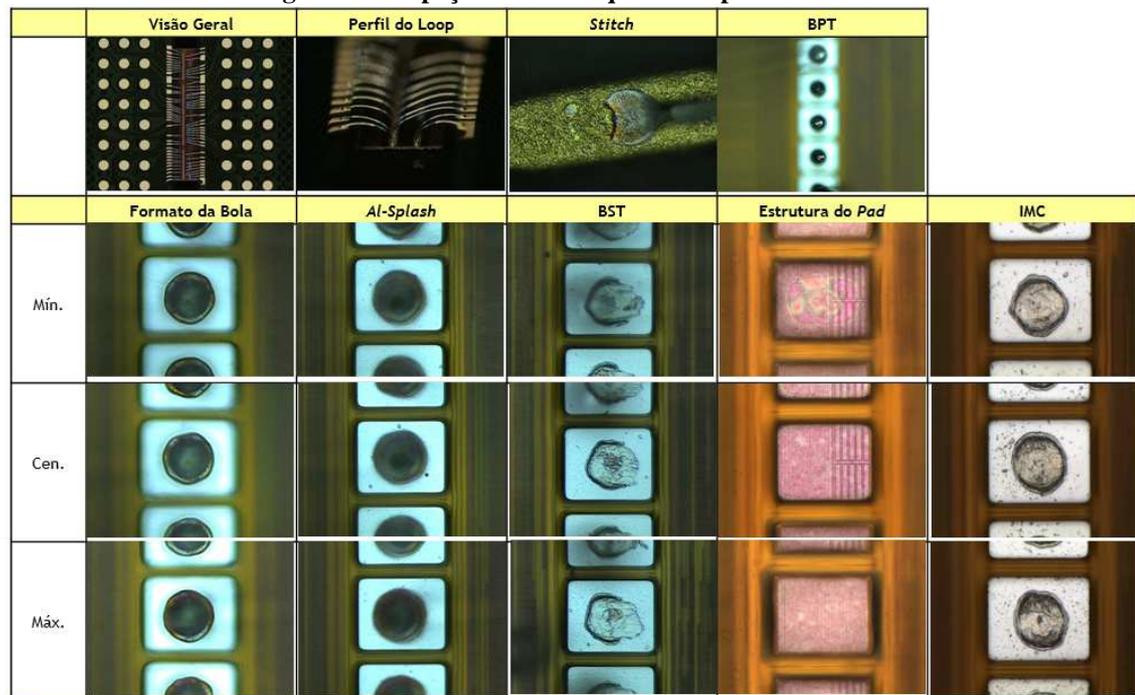
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O diagrama de solda e a presença de curto entre fios foi verificado observando-se a visão geral do componente. Já para verificação do perfil do *loop* foi necessário colocar a amostra sobre uma ferramenta de inspeção que permite a inclinação da peça. A segunda solda não apresenta diferenças entre as configurações, visto que os parâmetros alterados foram apenas da primeira solda. O modo de falha para o teste de arrancamento do fio foi o mesmo para todas amostras, com o fio rompendo na região do pescoço.

O formato da bola de solda se manteve estável, apresentando pequena variação de tamanho. Já o *splash* de alumínio verificado foi surpreendentemente baixo, o que é um bom sinal. O teste de cisalhamento teve o modo de falha mais comum, com o rompimento do alumínio, o que indica um bom intermetálico. Isto foi confirmado através da remoção da bola de solda com ácido nítrico e conferência da área do intermetálico. Em seguida o restante de alumínio sobre o *pad* foi removido com hidróxido de potássio, e a estrutura logo abaixo foi verificada quanto a presença de rachaduras, contudo nenhum dano foi encontrado. A Figura 23

demonstra as inspeções visuais realizadas para os níveis mínimo, central e máximo dos fatores em questão.

Figura 23: Inspeção visual de qualidade para amostras.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 6 compila os resultados obtidos para as variáveis de resposta do experimento, confirmando a capacidade do processo para todas as configurações, com o ajuste central obtendo os melhores resultados. Com isto, a janela de processos foi validada, possibilitando um processo estável de solda dos componentes de memória DRAM DDR3 utilizando fio de cobre com paládio esmaltado como alternativa ao fio de ouro.

Tabela 6: Resultados obtidos para as variáveis de resposta.

Leg #	Input Factor			Output Response								
	Power	Time	Force	Item	S/S	Spec.	Mín.	Máx.	Méd.	Desv.	Cpk	Result
1	Mínimo			Altura da Bola de Solda	25	4-15	9,6	13,6	12,1	1,05	0,91	Ok
				Diâmetro da Bola de Solda	25	36-48	37,3	40,2	38,8	0,84	3,65	Ok
				Força de Arrancamento	25	Mín. 3	5,7	8,5	7,2	0,63	2,22	Ok
				Força de Cisalhamento	25	Mín. 7	12,0	17,5	14,3	1,40	1,74	Ok
				<i>Open Pad</i>	72	0	<i>Sem open pad</i>				Ok	
2	Central			Altura da Bola de Solda	25	4-15	11,1	13,7	12,8	0,71	1,05	Ok
				Diâmetro da Bola de Solda	25	36-48	37,0	40,1	38,7	0,83	3,75	Ok
				Força de Arrancamento	25	Mín. 3	6,1	8,2	7,2	0,54	2,57	Ok
				Força de Cisalhamento	25	Mín. 7	14,2	18,7	16,2	1,14	2,66	Ok
				<i>Open Pad</i>	72	0	<i>Sem open pad</i>				Ok	
3	Máximo			Altura da Bola de Solda	25	4-15	10,2	13	11,7	0,73	1,48	Ok
				Diâmetro da Bola de Solda	25	36-48	37,5	39,8	38,6	0,74	4,19	Ok
				Força de Arrancamento	25	Mín. 3	6,4	8,5	7,5	0,63	2,36	Ok
				Força de Cisalhamento	25	Mín. 7	12,9	18,8	16,2	1,60	1,92	Ok
				<i>Open Pad</i>	72	0	<i>Sem open pad</i>				Ok	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7 Comparação entre fio de ouro e fio de cobre

Embora o processo tenha sido validado para o fio de PCC, existem muitas diferenças entre o fio de ouro e o fio de cobre, que também devem ser levadas em conta para definição de qual liga deve ser utilizada em determinado componente. O objetivo desta sessão é comparar estes diversos aspectos e também os resultados das características de qualidade e de processo para solda com ambos os fios.

4.7.1 Parâmetros de processo

4.7.1.1 Solda no pad

A solda no *pad* com fio de cobre é muito mais delicada do que a solda com fio de ouro. Devido à dureza elevada da FAB de cobre, existe o risco de danificar a estrutura do *pad*, causando rachaduras que se propagam pelo CUP, podendo até mesmo gerar problemas de confiabilidade. Para componentes com espessura da camada de alumínio inferior à 0.8 μm , a solda no *pad* com fio de cobre pode ser muito complicada. Além disso existe o problema do *splash* de alumínio, que deve ser controlado para evitar curto entre soldas. O ponto positivo é o maior controle do tamanho da bola de solda. A Tabela 7 compara a extensão das janelas de processos entre os dois fios.

Tabela 7: Janelas de processo da primeira solda para os fios de cobre e ouro.

1 ^a Solda	Fio de Ouro			Fio de Cobre		
	Central	Amplitude	%	Central	Amplitude	%
USG	65	30	46%	50	10	20%
Time	12	10	83%	15	10	67%
Force	12	10	83%	4	3	75%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7.1.2 Solda no lead

Para a segunda solda, o fio de cobre necessita de maior força e ultrassom, além do gás de proteção contra oxidação. A janela de processos também é reduzida com relação ao ouro, com alto risco de *stich peeling*. O capilar deve ter a superfície rugosa, para aumentar a aderência com o fio, maximizando a força aplicada durante a solda. Contudo, isto reduz a vida útil do capilar normalmente em um terço. O principal problema para a solda no *lead* é a necessidade de ciclos de *scrub*, o que reduz consideravelmente a produtividade. A Tabela 8 compara as janelas de processo entre cobre e ouro para a segunda solda.

Tabela 8: Janelas de processo da segunda solda para os fios de cobre e ouro.

2ª Solda	Fio de Ouro			Fio de Cobre		
	Central	Amplitude	%	Central	Amplitude	%
USG	140	55	39%	160	20	13%
Time	15	10	67%	15	10	67%
Force	40	25	63%	60	10	17%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7.1.3 Spark

O fio de cobre exige maior energia do que o ouro para formação da FAB. Para produzir uma esfera de 1.4mils, o fio de cobre precisou de uma corrente de 40mAmps durante 278 μ m com nitrogênio como gás inerte, enquanto o ouro precisou de apenas 30mAmps. O tempo de disparo para o ouro não pôde ser determinado, pois a máquina varia automaticamente até atingir o tamanho desejado. É importante destacar que quanto mais elevada a corrente, maior a incidência de bolas deformadas, podendo gerar danos sobre os *pads* ou curto entre soldas.

4.7.1.4 Forming gas

O gás de proteção é um recurso indispensável para solda com fio de cobre. Os equipamentos possuem de dois a três canais para vazão do gás, protegendo o fio durante a formação da FAB e durante a solda no *lead*. A instalação de dutos para condução do gás pode ser muito cara, assim como o preço do gás com a composição de 95%N₂ e 5%H₂. Por este motivo algumas empresas optam por produzir o próprio *forming gass* ou então utilizar apenas o nitrogênio como gás inerte, aproveitando os dutos já existentes. Para o fio de cobre esmaltado com paládio, apenas o nitrogênio é suficiente para atingir bons níveis de qualidade, como demonstrado anteriormente neste estudo. A vazão necessária fica entre 0,5 a 0,6 LPM por canal.

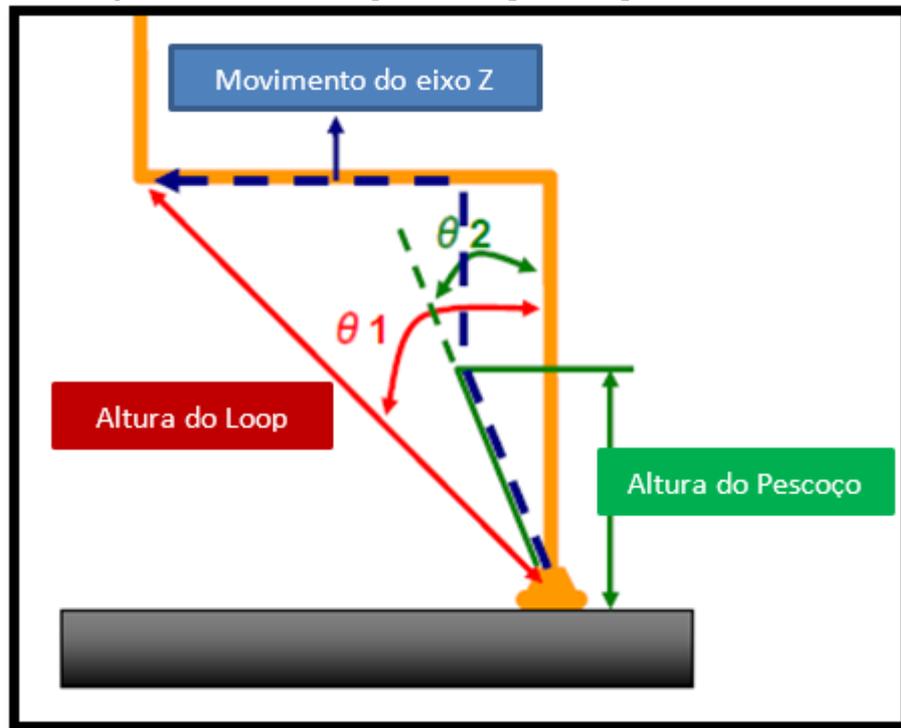
4.7.1.5 Temperatura

O fio de ouro pode ser soldado em temperaturas inferiores ao cobre, o que é benéfico para evitar problemas de empenamento do substrato, além de consumir menos energia. A temperatura para o *heater block* deve estar entre 150°C e 175°C, enquanto que o fio de cobre precisa entre 200°C e 210°C. Para os demais aquecedores pode-se utilizar a mesma configuração, com 150°C para o *pre heater* e 50°C para o *pos heater*.

4.7.1.6 Loop

O modelo utilizado para *loop* é o mesmo para ambos os fios. No caso do encapsulamento BOC, utiliza-se o modelo *forward*, no qual a FAB é soldada no *pad* em seguida no *lead*, variando apenas duas vezes o ângulo durante este processo. A Figura 24 ilustra este processo. O perfil do *loop* para o fio de cobre aparenta maior rigidez, sendo menor a incidência de *wire short* durante o processo de solda, embora a resistência a *wire sweep* na etapa de molde seja semelhante ao fio de ouro. Para o caso do fio de 0,7mils, o fio de ouro pode produzir perfis com até 2,2mm, enquanto o cobre possui bom comportamento até 2,4mm.

Figura 24: Modelo de *loop* utilizado para encapsulamentos BOC.



Fonte: Adaptado de Shinkawa (2008).

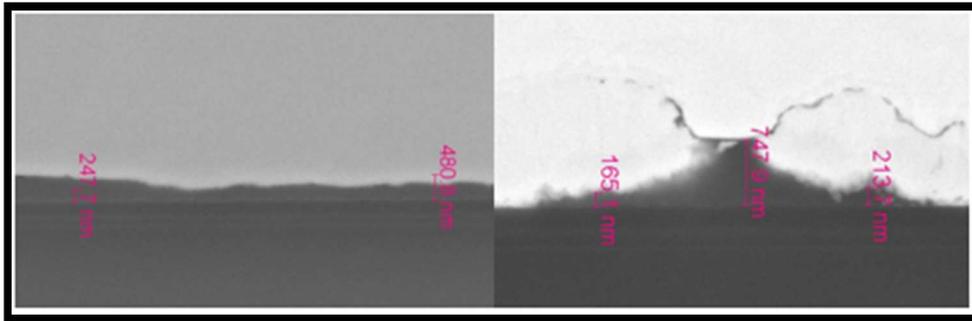
4.7.2 Performance

4.7.2.1 Intermetálico

A espessura do IMC formada pelo fio de cobre é muito menor do que a espessura do IMC entre ouro e alumínio. Isto resulta em uma força de cisalhamento menor para o fio de cobre, embora o crescimento lento do intermetálico durante ciclos térmicos seja benéfico à

confiabilidade. Na Figura 25, as imagens feitas com as amostras produzidas revelam espessura do IMC inferior a $0,2\mu\text{m}$ para o cobre, enquanto o IMC do ouro chega a ter espessura superior a $1\mu\text{m}$. Por este motivo, a área mínima exigida de IMC para o fio de cobre é de 80% da região da solda, enquanto o fio de ouro necessita de 70%.

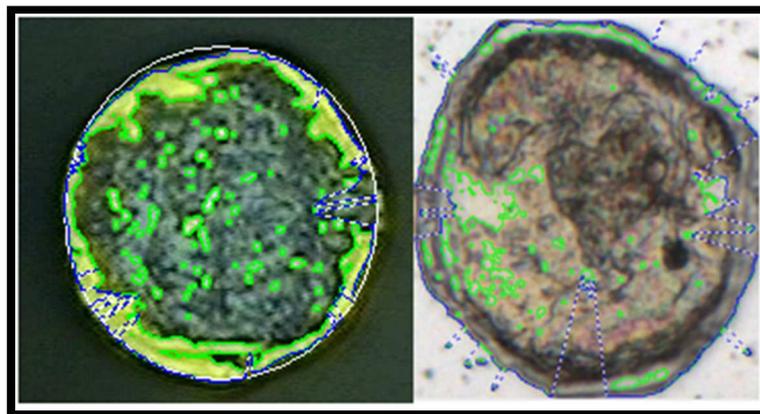
Figura 25: Espessura do intermetálico formado entre cobre e alumínio (lado esquerdo) e ouro e alumínio (lado direito).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 26 mostra a área de intermetálico visualizada em microscópio óptico (500X) após a remoção da bola de solda. O fio de ouro apresenta aproximadamente 85% da região com IMC, enquanto o cobre possui em torno de 95%.

Figura 26: Área do intermetálico para o fio de ouro (lado esquerdo) e o fio de cobre (lado direito).



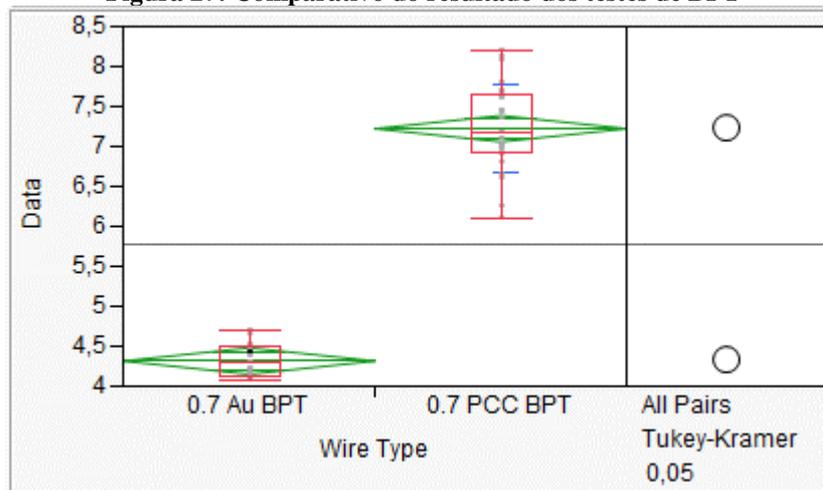
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7.2.2 Testes BPT e BST

Os principais testes de qualidade do processo de *wire bonding* apresentaram diferença significativa nos resultados entre o fio de cobre e o fio de ouro. Para o caso do BPT, o fio de cobre obteve melhor desempenho, com uma média de 7,22gf, porém com desvio padrão de

0,55. O modo de falha foi sempre o arrancamento da bola do *pad* (*Ball Lift*), já que o fio tem maior resistência mecânica e não se rompe facilmente. Já o fio de ouro obteve média de 4,31gf e desvio padrão de 0,19, com o modo de falha sendo o rompimento do fio (*Wire Broken*). A Figura 27 compara os resultados do teste de arrancamento para os fios.

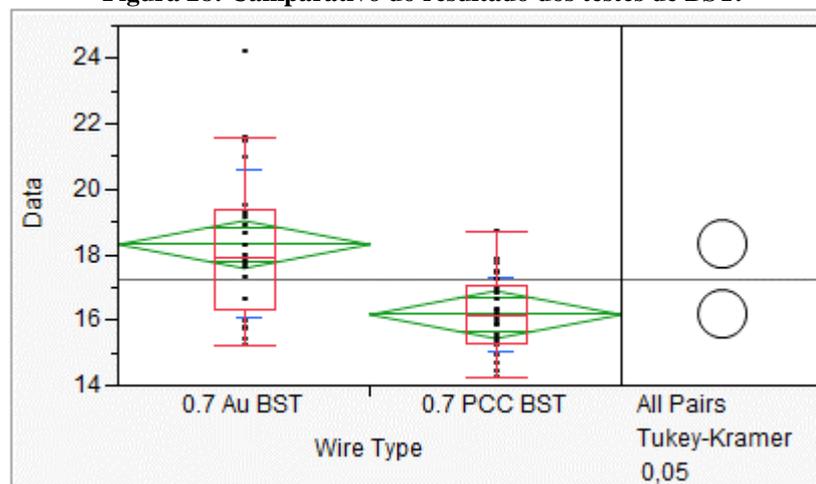
Figura 27: Comparativo do resultado dos testes de BPT



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No caso do teste de BST, o fio de ouro apresentou melhores resultados, com uma força média de cisalhamento de 18,32gf e desvio padrão de 2,27. O modo de falha foi o rompimento do intermetálico. O fio de cobre teve uma média de 16,17gf, com desvio padrão de 0,92. O modo de falha foi o rompimento da camada de alumínio. A Figura 28 contém o comparativo entre os resultados. Quanto maior a área e espessura do intermetálico, maior será a força de cisalhamento.

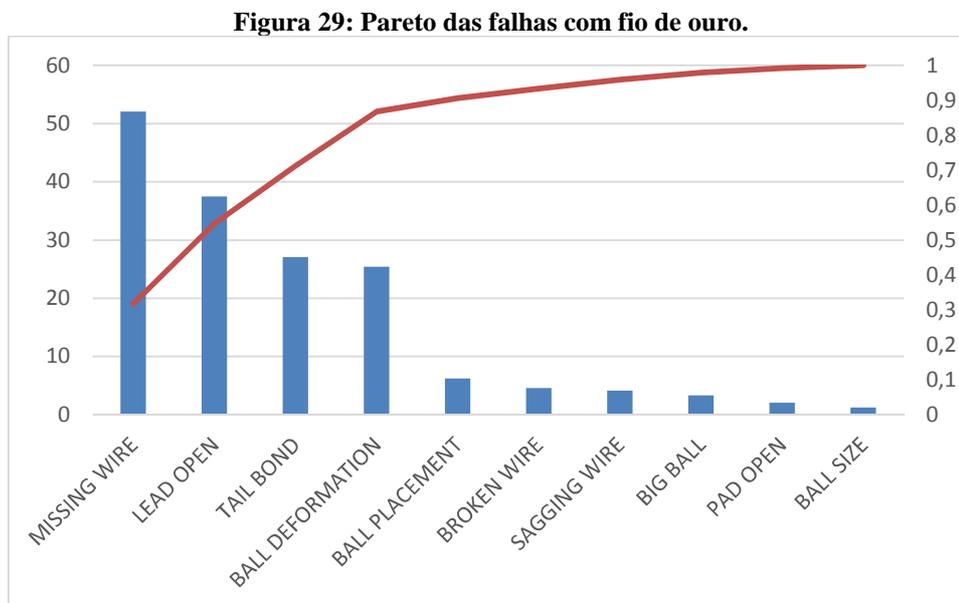
Figura 28: Comparativo do resultado dos testes de BST.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

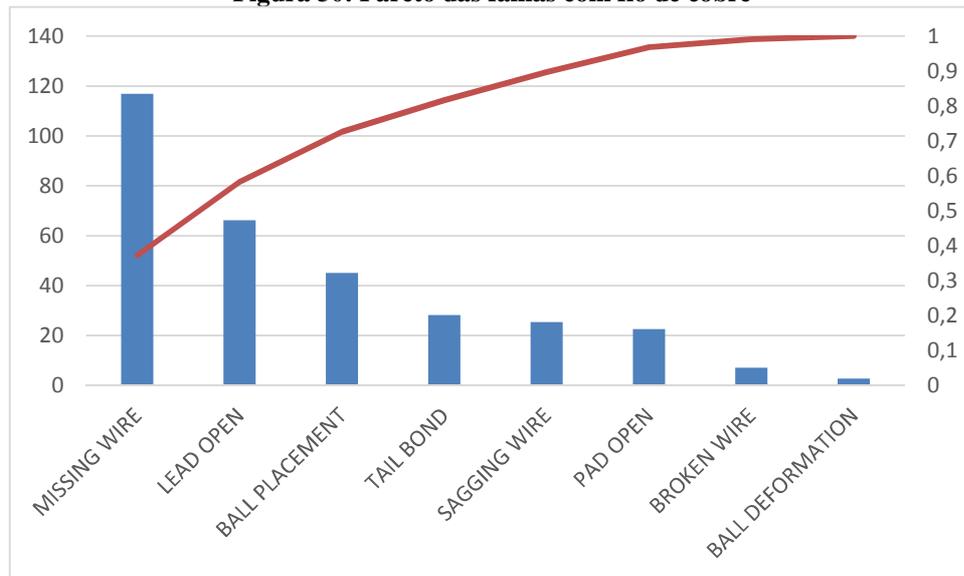
4.7.2.3 Modos de falha comuns

Para avaliar os modos de falhas no processo de *wire bonding* que estão relacionados ao tipo de fio, foram estratificados os dados de dois encapsulamentos semelhantes fabricados na empresa coreana, ambos do tipo QFN. O produto era produzido com fio de ouro, que foi substituído por fio de cobre do tipo PCC. A detecção dos modos de falha, bem como sua severidade não mudam entre os produtos, sendo possível comparar diretamente a ocorrência de cada tipo de falha entre eles. Entretanto, antes foi feito um filtro para remover as falhas que não estão relacionadas ao tipo de fio, como contaminação e quebra de *leadframe*. As Figuras 29 e 30 contêm o gráfico de Pareto para os defeitos com fio de ouro e fio de cobre, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 30: Pareto das falhas com fio de cobre



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através da análise destes gráficos é possível concluir que os modos de falha são semelhantes para os dois modelos de fio, com o fio de cobre tendo um controle maior da dimensão da bola de solda (*ball deformation*). Como estes dados são provindos de inspeção visual, a frequência de inspeção pode distorcer os resultados, pois a detecção dos defeitos é maior.

4.7.2.4 Produtividade

A produtividade do processo com fio de cobre é em torno de 20% inferior à do fio de ouro. Isto ocorre graças aos múltiplos passos para solda tanto no *pad* (4 passos) quanto no *lead* (3 passos), enquanto que o fio de ouro necessita de apenas um passo para cada solda. Além disso o movimento de *scrub* é demorado, sendo responsável por uma grande redução da quantidade de unidades produzidas por hora (UPH). Neste estudo o tempo total da segunda solda aumentou de 55 μ s para 78 μ s ao inserir o movimento de *scrub* nesta etapa. Para solda de um componente, o tempo total médio mensurado para o fio de ouro foi de 13,2 segundos, ou 273 UPH, e para o fio de cobre foi de 16,45 segundos, ou 219 UPH.

4.7.2.5 Rendimento do processo

O *yield* do processo é um indicador muito importante sob o ponto de vista da qualidade e também financeiro. Diversos fatores afetam o rendimento do processo, como o treinamento

dos operadores, o equipamento utilizado, os materiais, o tipo de produto e o controle do processo. Como neste experimento não foi possível realizar a produção em massa e verificar a quantidade de defeitos, foi comparado o resultado obtido para dois produtos semelhantes fabricados na empresa coreana, os mesmos utilizados para a análise de falhas no processo de *wire bonding*. O produto com fio de cobre apresentou um *yield* geral de 99,68% em um total de 710 mil peças, enquanto que o produto com fio de ouro teve rendimento semelhante, de 99,60% em um total de 2 milhões e 400 mil peças. Vale a pena ressaltar que este é o resultado ao final do processo de encapsulamento, sem considerar o teste elétrico e funcional dos componentes.

4.7.2.6 Qualidade da solda

Ao verificar a capacidade do processo com relação às principais características de qualidade mensuráveis, nota-se que os fios possuem um desempenho semelhante, não sendo possível indicar uma superioridade indiscutível. O fio de ouro apresenta melhor controle da altura da bola de solda, o que está relacionado à facilidade em se deformar. O fio de cobre possui variação grande da altura, provavelmente devido à variação do tamanho da FAB. Já o diâmetro do fio de cobre é muito mais constante, como visto anteriormente os parâmetros da primeira solda têm pouca influência sobre ele, graças à dureza elevada. Da mesma forma, o fio de ouro apresenta alta variação neste quesito, justamente por ser mais mole.

Com relação aos testes de BPT é interessante observar que embora os valores obtidos para o fio de cobre sejam superiores aos do fio de ouro, a capacidade do processo é menor, por causa do desvio padrão elevado. O mesmo ocorre para o teste de cisalhamento, no qual o ouro tem valores elevados mas desvio também é grande, reduzindo o Cpk. A Tabela 9 resume os valores obtidos durante o experimento.

Tabela 9: Comparativo entre os valores medidos para os principais requisitos de qualidade da solda.

Qualidade da Solda Au x PCC									
Item	S/S	Spec.	Material	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	Cpk	Resultado
Altura da Bola	25	4~15µm	Au	7,5	10,8	9,3	0,83	2,14	Au
			PCC	11,1	13,7	12,8	0,71	1,05	
Diâmetro da Bola	25	36~48µm	Au	40,4	45,4	43,3	1,24	1,24	PCC
			PCC	37	40,1	38,7	0,83	3,75	
BPT	25	Min. 2gr	Au	4	4,7	4,3	0,18	4,15	Au
		Min. 3gr	PCC	6,1	8,2	7,2	0,54	2,57	
BST	25	Min. 6gr	Au	15,2	24,2	18,3	2,27	1,8	PCC
		Min. 7gr	PCC	14,2	18,7	16,2	1,14	2,66	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7.3 Materiais

4.7.3.1 Fios esmaltados

Neste estudo também foi verificado a utilização de um novo modelo de fio disponível no mercado, o fio de cobre esmaltado com paládio e com uma fina camada (*flash*) de ouro. Conhecido como APC, este fio promete um melhor desempenho no processo de solda, tendo uma proteção maior contra oxidação, porém com um custo um pouco maior que o PCC. Então foi testado uma amostra deste fio da fabricante MKE, para confirmar se existe realmente uma melhora aparente no processo.

Os parâmetros utilizados foram os mesmos do fio PCC, com um pequeno ajuste no tempo de corrente de EFO para atingir o mesmo tamanho da FAB. Então as amostras foram produzidas e testadas quanto às características de qualidade. O resultado encontra-se na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados obtidos para o fio APC

Qualidade da Solda para o fio APC								
Item	S/S	Spec.	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	Cpk	Resultado
Altura da Bola	25	4~15µm	10,2	13	11,6	0,8	1,41	Ok
Diâmetro da Bola	25	36~48µm	38,4	40,2	39,2	0,5	5,87	Ok
BPT	25	Min. 3gr	6	7,8	6,8	0,52	2,48	Ok
BST	25	Min. 7gr	9,9	19,5	14,4	2,65	1,29	NOK
<i>Al Splash</i>	72	Sem curto	Nenhum curto encontrado					Ok
Estrutura do <i>Pad</i>	72	Sem danos	Nenhum <i>pad</i> danificado					Ok

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A altura da bola e o diâmetro obtiveram desempenho superior ao do fio PCC, revelando que o controle do tamanho da FAB é melhor, portanto a *flash* de ouro realmente auxilia na proteção contra oxidação. Contudo, o teste de BST ficou abaixo do esperado, com um desvio padrão extremamente alto. O motivo deste resultado é desconhecido, porém é possível que uma otimização por DOE venha a sanar este problema. Como o custo do fio APC é maior e os resultados não foram significativamente superiores, decidiu-se pela escolha do fio de PCC como alternativa ao fio de ouro.

4.7.3.2 Propriedades dos fios

Os modelos de fio utilizados possuem diferentes propriedades, que são responsáveis pelo desempenho único de cada liga. A principal diferença para o processo de *wire bonding* encontra-se na dureza da FAB, que causa grande impacto na primeira solda. É interessante notar que antes da formação da FAB a dureza é semelhante para todos os fios, porém após a formação da bola o cobre tende a aumentar muito a sua dureza, devido à oxidação. A Tabela 11 contém as propriedades dos fios especificadas pelos fabricantes.

Tabela 11: Propriedades dos fios utilizados nos experimentos.

Propriedade	Modelo do fio		
	MKE 0.7Mil	HS 0.7Mil PCC	MKE 0.7Mil APC
Diametro do fio (μm)	18.0 \pm 1.0	18.0 \pm 1.0	18.0 \pm 1.0
Composição	Au	Pd Cu	Au <i>flash</i> PdCu
Breaking Load (g)	Min.4.0	Min.3.0	Min.4.0
Elongation (%)	2.0~8.0	10.0~20.0	7.0~14.0
Dureza (Hv)	FAB	65~75	60~70
	HAZ	55~65	
	Fio	60~70	65~75
Densidade (g/cm^3)	19.32	8.98	9.00
Módulo de Elasticidade(Gpa)	65~85	90~100	50~70
Ponto de Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	1063	1080~1100	1084
Fusing Current(Length = 10mm)	0.35	0.42	0.44
Resistividade($\mu\Omega\text{cm}$)	2.32	1.9	1.8

Fonte: Adaptado de documentos internos Hana Micron.

4.7.3.3 Metalizações dos pads e leads

Não é necessário modificar as metalizações tanto do chip quanto do substrato para substituição do material do fio no caso estudado. A metalização do *pad* poderia ser aprimorada para permitir uma janela de processos maior da primeira solda, tanto pelo aumento da camada de alumínio como pela adição de ligas com silício. Contudo, seria necessário verificar outras questões como o custo para esta modificação e a integridade do sinal no circuito. A metalização do *lead* poderia ser modificada para redução de custo, utilizando cobre ao invés de ouro, o que manteria a mesma qualidade da solda porém reduziria a vida útil do substrato durante o processo. Contudo existe o risco de reduzir a manufaturabilidade, e também redução do tempo de atravessamento do processo.

4.7.3.4 Capilares

A principal diferença entre os modelos de capilar utilizados está no acabamento da superfície. As demais dimensões são semelhantes, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Características dos capilares.

Capilar	Superfície	H (mils)	CD (mils)	T (mils)	FA	ICA	OR
Au (PECO)	Polida	9	13	35	11°	70°	5°
PCC (MEGTAS)	Rugosa	10	12	33	11°	70°	5°

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.7.3.5 Torch tip e Wire Clamp

Não foi necessário modificar o modelo de eletrodo para formação da FAB, apenas a configuração dos valores de tempo e corrente foram suficientes. Para o *wire clamp*, também não foram necessárias modificações, pois a dureza do fio é semelhante e o desgaste da ferramenta também.

4.7.3.6 Forming Gas

Todos os componentes foram soldados utilizando apenas nitrogênio como gás de proteção, o que apesar do pequeno aumento na variação do tamanho da FAB, reduz consideravelmente os custos de implementação e consumíveis do processo.

4.7.4 Limitações

4.7.4.1 Tipo de adesivo

A solda com fio de cobre exige altas temperaturas, o que é prejudicial para o adesivo que segura o chip ao substrato. A maioria dos adesivos do tipo DAF (*Die Attach Film*) ou FOW (*Filling On Wire*) amolecem à temperaturas acima de 180°C (redução do módulo de elasticidade), o que causa problemas no processo devido à vibrações durante a solda e movimentação do chip. O adesivo do tipo epóxi resiste a temperaturas mais elevadas, porém

ocorre a evaporação do adesivo, que acaba por contaminar as ferramentas do equipamento, exigindo uma limpeza preventiva com maior frequência.

4.7.4.2 Espessura dos materiais

O fio de menor diâmetro utilizado para solda com fio de cobre é de 0,7mils, pois este é o menor diâmetro disponível no mercado. O processo de redução da espessura do fio é mais caro que o custo do cobre, portanto não existe a necessidade de fabricá-los. O mesmo não é válido para o fio de ouro, que já é soldado com diâmetro de 0,55 mils. Quanto à espessura do *die*, ela não afeta na escolha do material do fio. Na empresa estudada componentes entre 120 μm e 355 μm são fabricados com fio PCC, e poderiam ser desenvolvidos outros encapsulamentos com espessura ainda menor. O fator determinante para escolha do material é a resistência mecânica do *pad*.

4.7.4.3 Pad Pitch

O menor *pad pitch* em produção na empresa estudada é de 50 μm , com BPO de 44 μm . Na verdade, seria possível soldar em uma área menor com fio de cobre de 0,7mils, porém existe uma limitação no processo de fabricação do *wafer*. Para obter-se uma camada espessa de alumínio sobre os *bonding pads* (acima de 0,8 μm) é necessário um BPO largo.

4.7.4.4 Empilhamento de die

Todos os empilhamentos de chip são feitos utilizando adesivos em estado sólido, como o DAF, pois eles minimizam o problema de inclinação do chip sobre o substrato, deixando-o o mais plano possível. Portanto, não seria possível soldar estes componentes com cobre à temperaturas elevadas. Para viabilizar este processo é necessário desenvolver adesivos com alta temperatura de transição vítrea (acima de 210°C) ou então um processo de solda robusta com fio de cobre à temperaturas inferiores.

4.7.4.5 Comprimento do fio

O comprimento do fio máximo permitido para o fio de cobre com 0,7mils é de 2,4mm, apenas 0,2mm maior do que o praticado para o fio de ouro de mesma espessura. Com a tendência de minituralização dos dispositivos, o comprimento do fio tende a reduzir, não sendo um ponto de atenção para a indústria. Para o caso das memórias, o fio deve ter o menor comprimento possível, para melhorar a integridade do sinal. Por este motivo o encapsulamento com *wire bonding* utilizado normalmente é do tipo BOC, com comprimento dos fios em torno de 0,5mm.

4.7.4.6 Temperatura

A alta temperatura de solda é uma das principais limitações do fio de cobre. Além de aumentar o consumo de energia do equipamento, ela acelera o processo de oxidação, causando problemas tanto de processo quanto de confiabilidade. Também existe a questão do empenamento do substrato, que se acentua consideravelmente acima de 170°C. O vapor de epóxi também dificulta o bom andamento da operação, sujando as peças do equipamento e reduzindo o tempo médio entre falhas.

4.8 Payback

Tendo sido confirmada a viabilidade técnica da substituição do fio de ouro por fio de cobre com paládio esmaltado, é importante verificar a viabilidade econômica deste projeto. Para isto foi utilizado o método do *payback*, fazendo um comparativo entre o *payback* simples e o *payback* descontado. Os dados inseridos para cálculo são valores reais obtidos através de orçamentos e fontes internas da empresa brasileira onde o projeto foi proposto.

Os custos fixos foram descontados no primeiro ano do investimento, considerando um tempo curto para substituição de todos os equipamentos e validação do processo. Isto é necessário pois o mercado de semicondutores é extremamente dinâmico, e as empresas devem se adaptar rapidamente. Como os valores são baseados em orçamentos, não existe uma negociação para efetuação dos pagamentos. Caso o negócio venha a se concretizar, existe a possibilidade de melhorar o fluxo de caixa utilizando pagamentos parcelados e até mesmo obtendo descontos.

Outro ponto importante é o volume de produção. A empresa não dispõe de projeção superior a um ano, e existem variações de volume que podem impactar no resultado. Também foi considerado a produção apenas de memórias DRAM DDR3, porém os equipamentos adquiridos poderão contribuir para produção de diversos outros produtos, que também poderão utilizar o fio de cobre. Além disso a aquisição destes equipamentos aumenta a capacidade produtiva da empresa e possibilita a produção de componentes mais avançados como MCP e demais *stackings*, que estão previstos no planejamento para o próximo ano.

Para o cálculo do montante dos custos fixos, a quantidade de máquinas necessárias para atender à demanda foi calculada considerando a produtividade mensurada e uma eficiência de 80%, com uma jornada de trabalhos de três turnos e seis dias trabalhados por semana. O custo destas máquinas foi retirado de orçamento do fabricante, juntamente com as despesas para suporte e instalação. Os custos administrativos incluem treinamento do autor na empresa coreana e os recursos necessários para realização do NPI. Ainda compõe os custos fixos o valor para realização de ensaio de confiabilidade em câmara HAST durante 198 horas.

Para o cálculo do montante dos custos variáveis, o consumo de fio foi calculado no equipamento e acrescentado de um desperdício médio da empresa, e o custo considerado foi a diferença entre o preço do fio de ouro e do fio de PCC. O custo do capilar foi considerado o mesmo, porém com uma vida útil reduzida em um terço. O custo da mão de obra foi acrescido da contratação de dois técnicos devido à redução do tempo entre falhas e aumento de manutenções preventivas. A diferença de rendimento do processo foi calculada considerando a incidência média de defeitos de *wire short* e uma melhora significativa neste item, devido à substituição do modelo da máquina de solda e da diminuição da ocorrência de *wire short*. O custo do gás de proteção considerou a vazão utilizada nos experimentos e o custo de produção do mesmo.

Os valores apresentados foram multiplicados por um fator de conversão para sigilo da informação. A moeda considerada foi o dólar americano, e a taxa de conversão utilizada para os valores em reais foi de 0,25. A taxa de juros considerada para o fluxo de caixa do *payback* descontado foi de 9,5%. A Tabela 13 demonstra o cálculo dos fluxos de caixa para este investimento, pressupondo as considerações expostas.

Tabela 13: Fluxo de caixa para o investimento.

Período	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Custos Fixos	1	2	3	4	5	6	7
Treinamento	\$ -5,74						
	\$ -4,75						
Equipamento	\$ -1.462,48						
Instalação	\$ -5,17						
NPI	\$ -3,83						
Confiabilidade	\$ -0,82						
	\$ -1.482,79						
Custos Variáveis							
Custo do capilar	\$ -5,23	\$ -5,23	\$ -5,23	\$ -5,23	\$ -5,23	\$ -5,23	\$ -5,23
Mão de obra	\$ -9,95	\$ -9,95	\$ -9,95	\$ -9,95	\$ -9,95	\$ -9,95	\$ -9,95
Gás de proteção	\$ -0,87	\$ -0,87	\$ -0,87	\$ -0,87	\$ -0,87	\$ -0,87	\$ -0,87
Custo do fio	\$ 294,03	\$ 294,03	\$ 294,03	\$ 294,03	\$ 294,03	\$ 294,03	\$ 294,03
Rendimento	\$ 26,76	\$ 26,76	\$ 26,76	\$ 26,76	\$ 26,76	\$ 26,76	\$ 26,76
	\$ 304,73						
Produção							
Volume total DDR3	24 M	24 M	24 M	24 M	24 M	24 M	24 M
Fluxo de Caixa (simples)	\$ 304,73	\$ 304,73	\$ 304,73	\$ 304,73	\$ 304,73	\$ 304,73	\$ 304,73
% Recuperado no período	20,6%	20,6%	20,6%	20,6%	20,6%	20,6%	20,6%
% Recuperado acumulado	21%	41,1%	61,7%	82,2%	102,8%	123,3%	143,9%
Fluxo de Caixa (descontado)	\$ 278,29	\$ 254,15	\$ 232,10	\$ 211,96	\$ 193,57	\$ 176,78	\$ 161,44
% Recuperado no período	18,8%	17,1%	15,7%	14,3%	13,1%	11,9%	10,9%
% Recuperado acumulado	19%	35,9%	51,6%	65,9%	78,9%	90,8%	101,7%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Desta forma, o *payback* simples resultou em 4,86, ou quatro anos e onze meses para recuperação do investimento inicial. Por outro lado, considerando o valor do dinheiro no tempo, o método do *payback* descontado resultou em 6,84, ou seis anos e onze meses para que o projeto se pague. O período de amortização dos equipamentos normalmente é de dez anos, porém na indústria de semicondutores a tecnologia avança à passos largos, tornando estas máquinas obsoletas mais depressa.

Algumas empresas de encapsulamento já possuem plantas para produção de componentes *flip chip*, incluindo memórias DRAM. A empresa onde se realizou este estudo

também está capacitada para atender este novo mercado, porém a taxa de sucesso de desenvolvimento de novos produtos ainda é muito baixa, em torno de 10 por cento. Além disto não existem muitos pedidos de clientes para componentes com esta tecnologia, porque o custo é alto e o desenvolvimento difícil e dispendioso. Acredita-se que por volta de 2018 a produção de componentes *flip chip* terá um aumento considerável.

A próxima geração de memórias DDR4 já está sendo fabricada, ainda utilizando *wire bonding* em sua grande maioria. Para adaptá-la ao *flip chip*, é necessário um processo de metalização dos *pads* e de RDL no substrato, o que a torna muito mais cara, porém com o desempenho semelhante. Também é preciso levar em conta o fato que muitos outros tipos de encapsulamento ainda precisarão de *wire bonding* por muito tempo, e podem compor o portfólio da empresa brasileira a partir da aquisição de máquinas soldadoras modernas como as propostas neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

O processo de solda com fio de cobre avançou muito nos últimos anos, com o desenvolvimento de fios de até 0,7mils, de diversas composições e níveis de pureza e revestimentos para evitar a oxidação e controlar suas propriedades físicas. Em paralelo, as equipamentos também foram aprimorados, incluindo kits especiais para solda com fio de cobre, com a utilização de gás de proteção e módulos especiais para o programa de solda, aumentando a soldabilidade através de múltiplos passos de solda.

Diversos estudos foram realizados à fim de entender melhor o funcionamento deste processo e encontrar as condições ideais para maximizar a qualidade dos produtos com fios de cobre. A pressão para redução de custos na indústria de semicondutores foi decisiva para o direcionamento destes esforços, que elevaram o grau de conhecimento dos engenheiros de *wire bonding* em diversos aspectos, culminando com a substituição de fios de ouro por fios de cobre em uma ampla gama de componentes.

Hoje em dia é sabido que a qualidade da solda com fio de cobre é muito semelhante à do fio de ouro, e este estudo conseguiu demonstrar isto quantitativamente. Muitos clientes exigem de seus fornecedores que façam a substituição do material do fio objetivando a redução do custo final do produto. Isto pode ser verificado pelo significativo aumento nas vendas de fios de cobre, em face à redução nas vendas de fios de ouro, e também pela elevada quantidade de máquinas capacitadas para este tipo de solda comercializadas recentemente.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi comprovado que a substituição do fio de ouro por fio de cobre como interconexão entre *chip* e substrato é tecnicamente viável para os componentes de memória DRAM DDR3, sem que seja necessário a modificação das estruturas e metalizações originais. Após a otimização por DOE dos parâmetros da primeira solda, todas as características de qualidade foram atendidas, com valores para força de arrancamento e cisalhamento da bola de solda acima do especificado e com capacidade excelente.

Contudo, a janela de processos para a primeira solda é estreita com relação ao processo com fio de ouro, devido ao problema enfrentado de *metal open*, decorrente da fina camada de alumínio sobre os *bonding pads*. Também o tempo de atravessamento do produto e a vida útil do fio durante a produção devem ser menores, o que exige um controle maior a nível de chão de fábrica e capacitação técnica dos funcionários. Vale lembrar que o experimento foi feito com apenas uma máquina soldadora, e necessita ser validado em um conjunto maior de equipamentos.

Este estudo não contempla os testes de confiabilidade indispensáveis para validação do processo, conforme exigência normativa, que garantam o funcionamento e desempenho dos componentes em um período prolongado e sob condições adversas. Estes ensaios devem obrigatoriamente ser realizados com antecedência à quaisquer investimento neste sentido. Outros estudos já comprovaram a qualidade à longo prazo do fio de cobre em componentes semelhantes, porém cada novo produto deve possuir validação própria.

Também faz-se necessário a aprovação por parte dos clientes para efetuação desta mudança. Normalmente o resultado dos testes de qualidade e confiabilidade são notificados aos clientes, que verificam e aprovam ou não a modificação. Contudo, neste caso específico, é prudente consultar os clientes antes da qualificação interna, visto que preferências particulares podem inviabilizar o projeto.

O processo de solda com fio de cobre ainda enfrenta dificuldades, em especial pela necessidade de alta temperatura durante a solda, normalmente acima dos 200°C. Além de trazer problemas como oxidação acelerada e empenamento do substrato, ela amolece o adesivo entre *chip* e substrato, impossibilitando este processo em componentes com empilhamento de chips. Como a tendência da indústria de encapsulamento é aumentar a densidade dos seus componentes, é extremamente necessário que a solda com fio de cobre seja aprimorada, através da redução da temperatura ou então do desenvolvimento de DAF (*Die Attach Film*) com maior módulo de elasticidade. Do contrário, ela ficará restrita à encapsulamentos com *leadframes*.

Em alguns casos não é possível realizar a substituição do fio de ouro por fio de cobre, porém isto não significa que os custos do processo de *wire bonding* não possam ser reduzidos. Deve-se considerar a redução do diâmetro do fio (o ouro já está disponível até 0,55 mils) ou então a substituição por outras ligas como Au88%Ag, Ag15%Au, APC, ou até mesmo outras composições de Au. Também é possível tentar a redução do comprimento do fio em alguns casos, ou até mesmo o aumento da vida útil do capilar. É importante lembrar que o objetivo por trás deste projeto é a redução do custo de fabricação do produto.

Devido à necessidade de investimento em máquinas soldadoras de custo elevado, ao longo tempo que o projeto leva para recuperação do capital investido (seis anos e onze meses), e à eminente substituição do processo de *wire bonding* pela tecnologia de *flip chip* em alguns segmentos, este investimento é considerado de risco elevado sob o ponto de vista financeiro, sendo uma decisão a ser tomada pela gerência da empresa em conjunto com seus principais clientes.

Porém é importante lembrar que a aquisição destes equipamentos aumenta consideravelmente a capacidade produtiva da empresa, melhora sua produtividade e eficiência,

além de conferir-lhe tecnologia para fabricação de modelos de encapsulamento mais avançados, que certamente serão desenvolvidos num futuro próximo.

A realização deste estudo permitiu ao autor o aprendizado profundo sobre o processo de *wire bonding* como um todo, aumentando o conhecimento e entendimento desta etapa do encapsulamento, e possibilitando que demais melhorias sejam executadas no processo existente na empresa brasileira. A vivência com engenheiros e especialistas de outra nacionalidade, com cultura muito diferente e metodologia de trabalho única foi essencial para o aprimoramento profissional e pessoal.

Recomenda-se para desenvolvimentos futuros que seja considerado todo o processo de encapsulamento e teste de memórias, não restringindo-se à etapa de *wire bonding*. A validação do componente epóxi utilizado para o processo de moldagem, e sua compatibilidade com o fio de cobre deve ser estudada, bem como a realização de testes elétricos funcionais e ensaios de confiabilidade devem ser conduzidos em conformidade com os requisitos normativos. Desta forma será possível validar o componente com fio de cobre junto aos clientes, permitindo sua produção em larga escala e garantindo que não haverá prejuízo de performance para o usuário final.

Por fim, a metodologia apresentada pode ser adaptada e utilizada em outros experimentos, contribuindo para o desenvolvimento e qualificação de novos produtos, avaliação da substituição de materiais e otimização de parâmetros de processo e características de qualidade, tanto no processo de *wire bonding* como nas demais etapas do encapsulamento de semicondutores, ou até mesmo em outras indústrias.

REFERÊNCIAS

APPELT, B. K.; TSENG, A.; LAI, Y.S. Fine pitch copper wire bonding. Why now?. In: ELECTRONICS PACKAGING TECHNOLOGY CONFERENCE, 11., [S.l.], 2009. **Anais eletrônicos...** [S.l.], 2009.

BAJDIUK, C. U. **Framework para análise de viabilidade e gestão financeira de projetos de inovação tecnológica**. 2013. 48 f. Monografia (Especialização em Gestão Negócios) -- Curso de Especialização em Gestão Negócios, Departamento Acadêmico de Gestão e Economia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

BERND, K. et al. Fine pitch copper wire bonding in high volume production. **Microelectronics Reliability**, [S.l.], v. 51, n. 1, p. 13-20, jan. 2011.

CALLISTER JR, W. D. **Materials science and engineering, an introduction**. 7th. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2007.

CHAUHAN, P. S. et al. Cooper Wire Bonding. **Springer**, New York, 2014.

CLAUBERG, H.; BACKUS, P.; CHYLAK, B. Nickel-palladium bond pads for copper wire bonding. **Microelectronics Reliability**, v. 51, p. 75-80, 2011.

CLAUBERG, H. et al. Wire Bonding with Pd-Coated Copper Wire. **Kulicke & Soffa Ind, Inc.**, Fort Washington, PA, USA. 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

HERAEUS. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://heraeus-contactmaterials.com/en/downloads/datasheets.aspx>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

INVESTING. [S.l.], 2016. Disponível em <<http://br.investing.com/commodities/copper-historical-data>> e <<http://br.investing.com/commodities/gold-historical-data>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

KHOURY, S. L. et al. A comparison of copper and gold wire Bonding on integrated circuit device. In: ELECTRONIC COMPONENTS AND TECHNOLOGY CONFERENCE, 40., Arizona, 1990. **Anais eletrônicos...** Arizona: Motorola Semiconductor Products, 2200.

LEE, S. U.; TRENT, L.; HIGGINS, L. **Freescale copper wire - analysis, results and implementation**. [S.l.], 25 abr. 2011.

LIMA, J.D. Proposals of adjustment for the payback calculation of funded investment projects. **Custos e @gronegocio on line**, [S.l.], v. 9, n. 4, Oct./Dec. 2013.

MINITAB. What is a response surface design? [S.l.], 2015. Disponível em <<http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/response-surface-designs/what-is-a-response-surface-design/>>. Acesso em: 25 abr. 2016

MK ELECTRON. **MKE Pd-coated cu bonding wire technology**. Korea, 2015.

PECO. **Capillary training material**. Fundamentals of ball bonding process.[S.l.], 2005.

PECO. **Cu bonding with new material**. Enhanced compact capillary. [S.l.], 2009.

PEQUEGNAT, A. et al. Effect of gas type and flow rate on Cu free air ball formation in thermosonic wire bonding. **Microelectronics Reliability**, [S.l.], v. 51, n. 1, p. 4-12, jan. 2011.

SAS INSTITUTE. **Design of experiments guide**. Response surface designs. [S.l.], 2016. Disponível em <http://www.jmp.com/support/help/Response_Surface_Designs.shtml - SAS Institute Inc.>. Acesso em: 25 abr. 2016

SEMI INDUSTRY RESEARCH AND STATISTICS. **Global bonding wire market and forecast**. [S.l.], 2013.

SHANKARA, K. P. **Advanced wirebond interconnection technology**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.

SHINKAWA. **Introduction of Cu wire bonding technique**. Japan, 2012.

SHINKAWA. **UTC-1000 super**. Main loop parameter report. Japan, 30 jan. 2008.

SHINODA, C. **Viabilidade de projetos de investimentos em equipamentos com tecnologia avançada de manufatura**: estudo de múltiplos casos na siderurgia brasileira. 2008. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Escola Politécnica, USP, 2008.

SOLID STATE OF TECHNOLOGY. **Insights for electronics manufacturing**. Insights from leading edge. [S.l.], 26 set. 2010. Disponível em: <<http://electroi.com/insights-from-leading-edge/2010/09/iftle-17-itrs-assembly-and-packaging-roadmap/>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

SOLID STATE OF TECHNOLOGY. **Insights for electronics manufacturing**. Advanced packaging. [S.l.], 16 out. 2014a. Disponível em: <<http://electroi.com/blog/2014/05/advanced-packaging-6/>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

SOLID STATE OF TECHNOLOGY. **Insights for electronics manufacturing**. Texas instruments announces 22B copper wire bond technology units shipped. [S.l.], 2014b. Disponível em: <<http://electroi.com/blog/2014/10/texas-instruments-announces-22b-copper-wire-bond-technology-units-shipped/>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

TAN, J.; TOH, B.H.; HA, H.M. Modelling of free air ball for copper wire bonding. In: ELECTRONICS PACKAGING TECHNOLOGY CONFERENCE, [S.l.], 2004. **Anais eletrônicos...**[S.l.], 2004

TRACY, D. **Bonding wire transition marches on**. [S.l.]: SEMI Global Semiconductor Packaging Materials Outlook, 2014.

TUMMALA, R. R. **Fundamentals of microsystems packaging**. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, 2001.

UNO, T. Enhancing bondability with coated copper bonding wire. **Microelectronics Reliability**, [S.l.], v. 51, p. 88-96, 2011.

WEI, T. C.; DAUD, A. R. Cratering on thermosonic copper wire ball bonding. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S.l.], v. 11, p. 283-7, 2002.

YAUW, O. et al. Wire bonding optimization with fine copper wire for volume production. In: ELECTRONICS PACKAGING TECHNOLOGY CONFERENCE, 12., [S.l.], 2010. **Anais eletrônicos...**[S.l.], 2010.

ZHANG, B. et al. Behaviors of palladium in palladium coated copper wire bonding process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC PACKAGING TECHNOLOGY & HIGH DENSITY PACKAGING (ICEPT-HDP), [S.l.], 2009. **Anais eletrônicos...**[S.l.], 2009.

ZHONG et al. Tand. Study of factors affecting the hardness of ball bonds in copper wire bonding. **Microelectronic Engineering**, [S.l.], v. 84, n. 2, p. 368-74, fev. 2007.

ZHONG, Z.W. Overview of wire bonding using copper wire or insulated wire. **Microelectronics Reliability**, [S.l.], v. 51, n. 1, p. 4-12, jan. 2011.