

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

MÁRCIO RAFAEL STRACKE

AVALIAÇÃO DO ARRASTE DOS FIOS DE SOLDA
DURANTE O PROCESSO DE MOLDAGEM POR
TRANSFERÊNCIA NO ENCAPSULAMENTO DE
MEMÓRIAS DRAM

SÃO LEOPOLDO

2018

Márcio Rafael Stracke

**Avaliação do Arraste dos Fios de Solda Durante o Processo de
Moldagem por Transferência no Encapsulamento de
Memórias DRAM**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do
Rio dos Sinos - UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod

São Leopoldo

2018

S894a

Stracke, Márcio Rafael.

Avaliação do arraste dos fios de solda durante o processo de moldagem por transferência no encapsulamento de memórias DRAM / Márcio Rafael Stracke. – 2018.

59 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, São Leopoldo, 2018.

“Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod.”

1. Circuitos integrados. 2. Microeletrônica. 3. Simulação (Computadores). 4. Encapsulamento de semicondutores. I. Título.

CDU 621.3

Márcio Rafael Stracke

**Avaliação do Arraste dos Fios de Solda Durante o Processo de
Moldagem por Transferência no Encapsulamento de
Memórias DRAM**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do
Rio dos Sinos - UNISINOS.

Aprovado em 15 de Maio de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Willyan Hasenkamp Carreira –
Unisinos
Avaliador

Prof. Dr. Sandro Campos Amico – UFRGS
Avaliador Externo

Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod (Orientador)

Visto e permitida a impressão
São Leopoldo

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

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este trabalho a todas pessoas que me auxiliaram durante todas etapas deste projeto, seja de forma direta ou indireta.

Primeiramente, agradeço a minha esposa Aline e meu filho Mateus, por serem a razão do meu sorriso e a motivação para que eu busque sempre ser uma pessoa melhor.

Agradeço também a meus pais, Suzana e Paulo, por me ensinarem que devo sempre perseguir os meus sonhos e pelo incentivo ao estudo. Agradeço aos meus familiares e amigos, por acreditarem em mim e me auxiliarem dentro de suas possibilidades.

Ao meu professor orientador, Eduardo Luis Rhod, por sua dedicação, confiança, conhecimento e vontade de auxiliar no que fosse possível. Aos professores Wyllian e Celso pelas sugestões em momentos de dificuldade e definições do trabalho. Aos demais professores do curso e equipe do itt CHIP.

A HT Micron, pela oportunidade, confiança e suporte financeiro na forma de bolsa de estudos. Aos meu colegas de trabalho, pela amizade, boa vontade e colaboração para a execução deste trabalho.

*“Lembre-se de olhar para o alto, para as estrelas,
e não para baixo, para os seus pés.”
(Stephen Hawking)*

RESUMO

Com o avanço da microeletrônica, cada vez mais surgem dispositivos eletrônicos portáteis. Isso traz diversos desafios à cadeia de semicondutores, desde o projeto, no desenvolvimento de circuitos integrados menores e mais eficientes até o encapsulamento, uma vez que os componentes tem ficado menores, mais finos e com um número maior de pinos de entrada e saída. Esses desafios estão presentes em todos os processos de fabricação de um *chip* e podemos citar a moldagem como um processo crítico em especial. A tecnologia de moldagem por transferência, que está consolidada e é a principal utilizada neste processo, necessita de cuidados especiais na otimização de seus parâmetros e materiais, tendo em vista os fatores citados e a consequente redução do diâmetro dos fios que realizam a interconexão do *die* com o substrato. Neste cenário, o *wire sweep*, que é o arraste destes fios de solda devido ao escoamento do encapsulante, acaba se tornando um problema, já que perdas no processo de moldagem implicam em sucatear o componente. A taxa de falhas devido a este tipo de falha podem chegar a 2,5%, segundo estudos de grandes fabricantes da cadeia de semicondutores divulgado em (SANDGREN; ROTH, 2004). Neste trabalho foi simulado o processo de moldagem de memórias DRAM com encapsulamento do tipo BOC BGA, utilizando o módulo de FSI do *software* COMSOL. Os resultados da razão de *wire sweep* obtidos na simulação ficaram dentro do intervalo da média com um desvio padrão, na comparação com os valores reais medidos em peças fabricadas na condição simulada, tendo como erro máximo 15,26%.

Palavras-chaves: Encapsulamento de semicondutores. Simulação computacional. *Transfer molding*. *Wire sweep*.

ABSTRACT

The advancement of microelectronics makes more and more portable electronic devices emerge in our daily lives. This brings a number of challenges to the semiconductor chain, from design, to the development of smaller and more efficient integrated circuits to encapsulation, since the components have become smaller, thinner, and with a larger number of input and output pins. These challenges are present in all chip fabrication processes and we can define molding as a critical process in particular. The transfer molding technology, which is consolidated and the main one used in this process, requires special care in the optimization of its parameters and materials, since there are more and shorter wires realizing the connection between the die and the substrate. The wire sweep, which is the entrainment of the wires due to the flow of the mold compound, becomes a problem, since losses in the molding process imply scrapping the component. The failure rate due to this type of failure can reach 2.5%, according to studies by major semiconductor chain manufacturers disclosed in (SANDGREN; ROTH, 2004). In this project the DRAM memory molding process with BOC BGA encapsulation type was simulated using the FSI module in COMSOL software. Results of wire sweep ratio obtained are within the average adding or subtracting one standard deviation and the maximum error rate ranging was 15.26% considering manufactured boards using the simulation parameters.

Key-words: Semiconductor packaging. Simulation. Transfer molding. Wire sweep.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Invenção do circuito integrado.	18
Figura 2 – Componente da família DIP.	19
Figura 3 – Componente da família QFN.	20
Figura 4 – Componente da família FBGA.	20
Figura 5 – Esquema de moldagem por transferência	23
Figura 6 – Esquema de moldagem por compressão	25
Figura 7 – Composição típica de um EMC	26
Figura 8 – Principais modos de falha durante o encapsulamento	27
Figura 9 – Definição de <i>wire sweep</i>	28
Figura 10 – Geometria simulada nas primeiras análises.	36
Figura 11 – Geometria simulada.	36
Figura 12 – Parametrização dos materiais (fio de ouro) no modelo	37
Figura 13 – Malha do modelo proposto	38
Figura 14 – Comparação entre a malha utilizada na primeira simulação com resultados (a) e a malha final (b).	39
Figura 15 – Gráfico da viscosidade do EMC em função do tempo	40
Figura 16 – Medição da taxa de <i>wire sweep</i> utilizando o equipamento de Raio-X	43
Figura 17 – Comparação entre a simulação e uma peça produzida nas condições simuladas 1 (a) e 2 (b).	44
Figura 18 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é mínima.	46
Figura 19 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é mínima.	47
Figura 20 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência máxima e Temperatura onde a viscosidade é máxima.	48
Figura 21 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência média e Temperatura onde a viscosidade é máxima.	48
Figura 22 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é máxima.	49
Figura 23 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência máxima e Temperatura onde a viscosidade é média.	50
Figura 24 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência média e Temperatura onde a viscosidade é mínima.	51
Figura 25 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência intermediária e Temperatura onde a viscosidade é média.	51

Figura 26 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é média.	52
Figura 27 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.	53
Figura 28 – Gráfico de Efeitos Principais.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Confiabilidade térmica e mecânica	22
Tabela 2 – Projeto de experimentos.	42
Tabela 3 – Comparação entre os dados reais e simulados do experimento 1.	45
Tabela 4 – Comparação entre os dados reais e simulados do experimento 2.	46
Tabela 5 – Projeto de experimentos.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALE	Método Arbitrário Lagrangiano–Euleriano
BGA	Tipo de encapsulamento de matriz de esferas
BOC	Tipo de encapsulamento onde o substrato é colocado sobre o chip
CAD	Desenho assistido por computador
CAE	Engenharia assistida por computador
CI	Circuito integrado
C-Mold	Moldagem por compressão
DOE	Projeto de experimentos
DRAM	Memória dinâmica de acesso randômico
EMC	Composto epóxi para moldagem
FEM	Método dos elementos finitos
FSI	Interação entre fluidos e sólidos
FVM	Método dos volumes finitos
GNF	Fluido Newtoniano generalizado
IDM	Fabricantes integrados de dispositivos
PBGA	Encapsulamento BGA plástico
PCI	Placa de circuito impresso
SOT	Tipo de encapsulamento para montagem em superfície
T-Mold	Moldagem por transferência

LISTA DE SÍMBOLOS

x	Deformação do fio
L	Comprimento do fio
μm	Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Encapsulamento de Semicondutores	18
2.2	Encapsulamento Hermético e Não-Hermético	21
2.3	O Processo de Moldagem	22
2.4	Materiais para Encapsulamento Polimérico	25
2.5	Defeitos e Falhas Durante o Processo de Moldagem por Transferência	26
2.6	<i>Wire Sweep</i>	28
2.7	Simulação do Processo de Moldagem por Transferência	29
2.7.1	<i>Softwares</i> de simulação multifísica	30
2.7.2	Método Arbitrário Lagrangiano–Euleriano	31
2.8	Trabalhos Similares	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Proposta de Pesquisa	35
3.2	Escolha do <i>Software</i> de Simulação	35
3.3	Desenvolvimento da Geometria	36
3.4	Projeto de Experimentos (DOE)	41
3.5	Validação do Modelo	42
4	RESULTADOS	44
4.1	Correlação Entre Simulação e Dados Reais	44
4.2	Resultados da Simulação	46
4.3	Resultados do Projeto de Experimentos (DOE)	52
5	CONCLUSÃO	55
5.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A eletrônica está cada dia mais presente no cotidiano das pessoas, sendo inimaginável a execução de tarefas diárias sem utilização de dispositivos eletrônicos. Essa presença pode ser observada tanto nos utensílios mais óbvios, como computadores e telefones celulares, quanto em novas aplicações, podendo-se verificar o aumento significativo do uso de dispositivos semicondutores nas indústrias automobilísticas e medicina (ARDEBILI; PECHT, 2009).

A cadeia de semicondutores é composta basicamente por cinco etapas: a concepção do produto, o projeto, a fabricação do chip (também denominada como *front-end*), o encapsulamento e teste do circuito integrado (conhecido como *back-end*) e o serviço ao cliente. Existem diferentes formas de atuação nessa cadeia, sendo as principais os fabricantes integrados (IDM) que executam todas as etapas do processo produtivo, as *fabless* que fazem o projeto apenas, as *foundries* que realizam a etapa de *front-end* e os encapsuladores que fazem a etapa de *back-end* (GUTIERREZ; LEAL, 2004).

O encapsulamento de semicondutores é o processo final dessa cadeia, que transforma o *chip* de silício em um produto funcional que será vendido ao consumidor final. Neste processo, os fatores mais relevantes são o custo e o desempenho, o que acaba por estimular a inovação através de pesquisas que envolvem, entre outros fatores, a miniaturização dos componentes, utilização de novos materiais e criação de processos de manufatura. (INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS (ITRS), 2011)

Para atingir estágios inovadores, o método convencional de projetos de experimentos utilizado por pesquisadores e engenheiros traz custos elevados e consumo de tempo, uma vez que os problemas estão cada dia mais complexos. A interação entre diversos materiais, como o composto de moldagem e as estruturas do encapsulamento (substrato, *die*¹, fios de solda) pode causar deformações na estrutura e característica dos componentes. Com o rápido desenvolvimento da informática, se torna possível a utilização de modelos virtuais para investigação de problemas em várias etapas críticas do encapsulamento (KHOR et al., 2014).

Uma dessas etapas críticas do encapsulamento é a moldagem, que tem como principal função proteger o *chip* de silício e suas interconexões. Essas interconexões podem ser realizadas de diversas maneiras, sendo a mais comumente utilizada a ligação com uso de fios, também conhecida como *wire bonding*. Atualmente, mais de 99% dos componentes produzidos são encapsulados com materiais poliméricos, que tem grandes vantagens relacionadas a custo e facilidade de produção, em relação ao encapsulamento hermético (ARDEBILI; PECHT, 2009).

O método mais utilizado no encapsulamento, em processos de produção em massa, é a moldagem por transferência, tendo grande aceitação devido ao baixo custo e a grande capacidade

¹ Die: Chip de silício que é encapsulado. A tradução gera um termo não usual para a área.

de produção. Neste método, o componente a ser encapsulado é carregado em uma matriz de moldagem e o material encapsulante injetado utilizando pressão e temperatura. O material utilizado é uma resina termofixa, ou seja, é um material que depois de polimerizado e rígido não retorna ao seu estado inicial, mesmo sendo submetido à altas temperaturas. Como desvantagem desta tecnologia, pode-se citar os frequentes danos aos fios, devido à alta pressão e a velocidade de injeção. (ARDEBILI; PECHT, 2009)

Um defeito comum encontrado nos processos de manufatura durante a moldagem por transferência é o *wire sweep*, que é o arrastamento dos fios de interconexão. Durante a injeção da resina epóxi, é criado um fluxo sobre os fios e se os parâmetros não estiverem otimizados, o fluxo induzido pode movimentar os fios potencializando o surgimento de curto-circuitos, ou seja, os fios acabam encostando uns nos outros (NGUYEN; LIM, 1990).

1.1 Justificativa

O processo de solda de fios tem se mantido como principal opção para interconexão entre o *die* e o substrato, devido ao aumento da capacidade das máquinas, aumento na precisão e a efetividade em encapsulamentos 3-D com empilhamento, ou seja, utilização de dois ou mais *dies* posicionados um sobre o outro em um único componente. Mesmo com essa evolução do processo de solda de fios, existem fatores que dificultam o alcance de altos níveis de rendimento, sendo uma das principais o *wire sweep* (SANDGREN; ROTH, 2004).

Um defeito comumente encontrado em encapsulamentos plásticos de circuitos integrados é o *wire sweep*, que se torna cada vez mais crítico com o aumento da densidade dos mesmos. O processo tradicional para minimizar o arraste de fios é realizar alterações no projeto, materiais e processos, com base na experiência e utilizando o método de tentativa e erro, o que consome recursos financeiros e tempo. Uma forma de reduzir os custos e as perdas é utilizar simulação numérica como prevenção deste tipo de falha (WU et al., 1998).

Em estudos realizados por empresas de encapsulamento, a taxa de falhas relacionada com *wire sweep* pode chegar a 2,5% e diversas análises vem sendo realizadas de forma a conseguir o aumento do rendimento deste processo (SANDGREN; ROTH, 2004). Segundo Ardebili e Pecht (2009) o *wire sweep* é o modo de falha dominante para encapsulamentos *fine-pitch* (quando a distância entre os terminais de solda de fios é de 25 milésimos de polegada ou menor), podendo ser reduzido através de otimização por simulação, utilizando um modelo analítico para deformação do fio com as informações reológicas e cinéticas. Para Ramdan et al. (2012), o arraste dos fios é reconhecido como um dos principais modos de falha no encapsulamento de componentes eletrônicos realizado através de moldagem por transferência.

Durante o processo de encapsulamento de semicondutores, existem diversas etapas, sendo objeto de estudo deste trabalho a moldagem através da tecnologia de *transfer molding*. Dentro desse processo, existem vários fatores que podem gerar defeitos de fabricação. Neste

trabalho foi avaliado o modo de falha *wire sweep*, suas causas e a utilização de simulação para otimização dos parâmetros do processo de moldagem por transferência no encapsulamento de memórias de DRAM.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, através de modelos de simulação, os principais fatores que implicam em falhas por *wire sweep* no processo de moldagem por transferência em encapsulamentos que utilizem materiais poliméricos de BGA do tipo BOC.

Além disso, este trabalho também tem como objetivo:

- Realizar a modelagem do processo de moldagem por transferência de uma memória DRAM tipo BOC com um *die*;
- Avaliar a influência dos principais parâmetros do processo de moldagem por transferência na ocorrência do arraste de fios;
- Comparar resultados obtidos na simulação com o processo real, produzindo componentes nas condições simuladas.

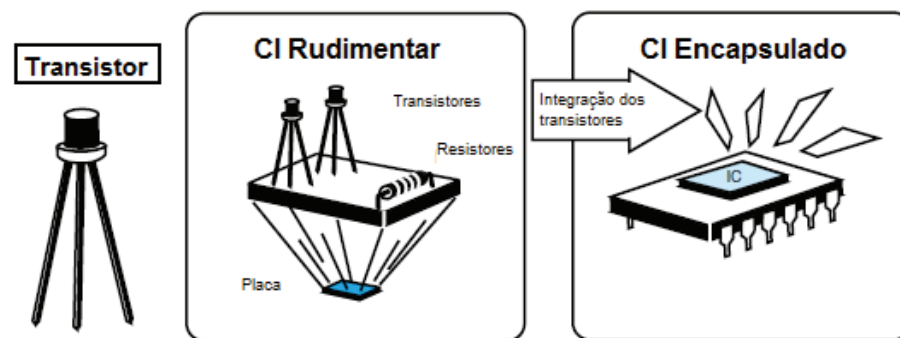
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados os conceitos que fundamentam este trabalho, que são as características e materiais utilizados durante o processo de moldagem de componentes do tipo BGA (*Ball Grid Array*) e métodos de simulação.

2.1 Encapsulamento de Semicondutores

A microeletrônica iniciou com a invenção do transistor por Schockley, em 1949, o desenvolvimento da tecnologia planar por Robert Noyce, em 1959 e a fabricação do primeiro circuito integrado, desenvolvido por Jack Kilby, também em 1959. (TUMMALA, 2001). A Figura 1 ilustra essa evolução.

Figura 1 – Invenção do circuito integrado.



Fonte: Adaptado de Tummala (2001).

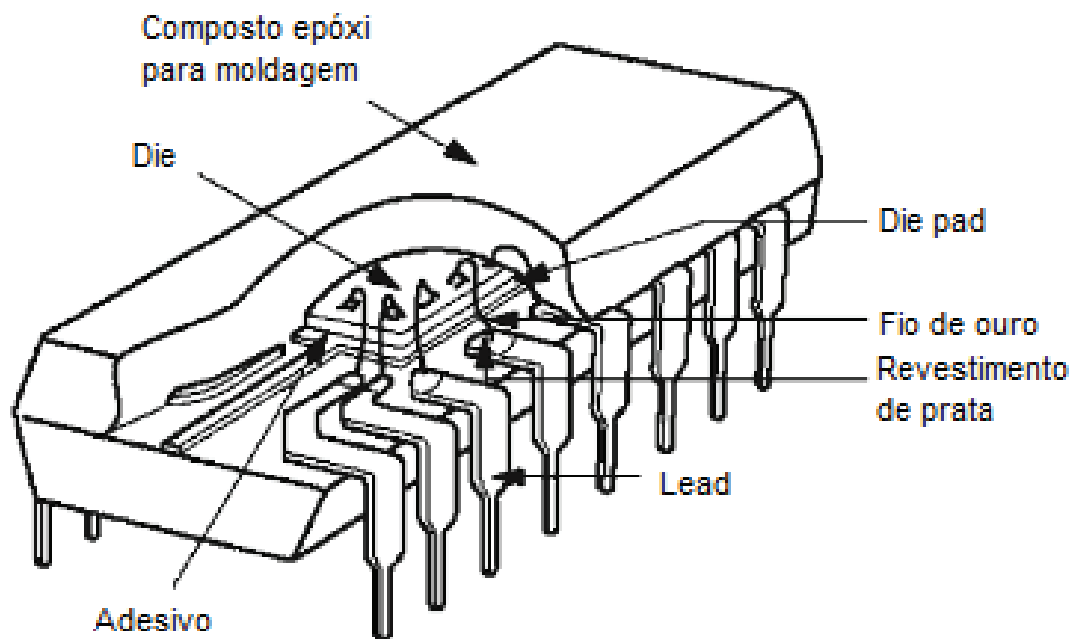
Os principais objetivos do encapsulamento de semicondutores são a proteção do die, a interconexão do die com outros componentes eletrônicos, dissipação de calor, proteção contra absorção de umidade e contaminações iônicas, proteção contra radiação, redução do estresse térmico e mecânico e para sustentação mecânica do componente (ARDEBILI; PECHT, 2009).

O processo de encapsulamento tradicional se inicia no processamento do wafer, realizando-se as etapas de polimento e corte. Quando o die está preparado para ser encapsulado (singularizado), o mesmo é fixado na base do encapsulamento, que pode ser um *lead frame*, base metálica para sustentação do *die* com os terminais, ou substrato de PCI. Na sequência, são conectados os terminais desta base com o *die*, utilizando-se normalmente de fios. Após, o componente é moldado com material polimérico, como resina epóxi, ficando totalmente protegido e selado. Os processos seguintes se distinguem a partir do tipo de encapsulamento empregado (TUMMALA, 2001).

A classificação do encapsulamento de semicondutores é baseada nos seguintes fatores: projeto do encapsulamento, tecnologia e formato da interconexão com a PCI e forma de distribuição das conexões (ARDEBILI; PECHT, 2009).

a) *Through Hole*: É a tecnologia mais antiga, e está sendo gradualmente substituída por *surface mount*, que é a montagem dos componentes sobre a superfície da PCI, nas aplicações atuais. Para sua montagem, são utilizados lead frames, onde o die é fixado e as conexões são realizadas através de condutores. As famílias mais comuns são SIP (*Single In-line Package*), DIP (*Dual In-line Package*) e PGA (*Pin Grid Array*). Na Figura 2 observa-se um exemplo de circuito integrado *through hole* (ARDEBILI; PECHT, 2009). Esse formato possui baixo custo em comparação com os demais, porém com produtividade e confiabilidade baixa, já que esse padrão não permite montagem automática. Os componentes podem ser transportados em tubos, sem contato com os pinos (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997).

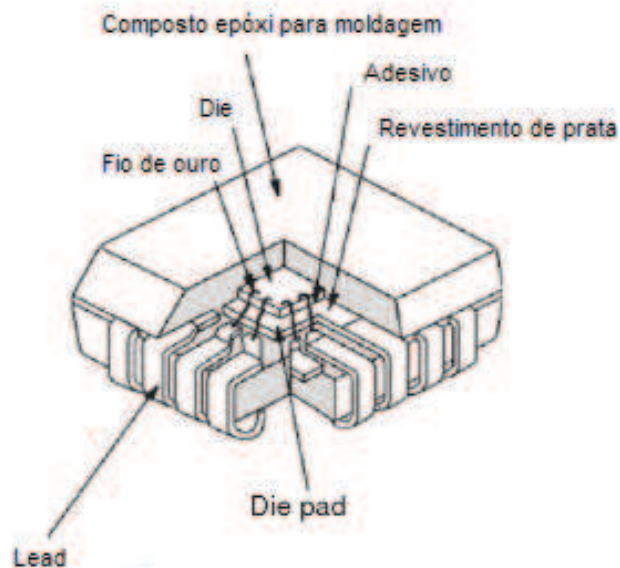
Figura 2 – Componente da família DIP.



Fonte: Adaptado de Ardebili (2009).

b) *Surface Mount*: Existem muitas variedades de encapsulamento que são utilizadas em montagem de superfície, devido a maior densidade de pinos e a possibilidade de montagem nos dois lados da PCI. As principais famílias são SOP (*Small Outline Package*), QFN (*Quad Flat No leads*) e QFP (*Quad Flat Package*). Na Figura 3 se observa um exemplo de componente para montagem em superfície (TUMMALA, 2001). A principal diferença para o *through hole* está nos terminais, dobrados em formato de "L", permitindo a montagem nas duas faces da PCI. Neste tipo de encapsulamento, também são utilizados *lead frames* como base para sustentação do *die* (ARDEBILI; PECHT, 2009).

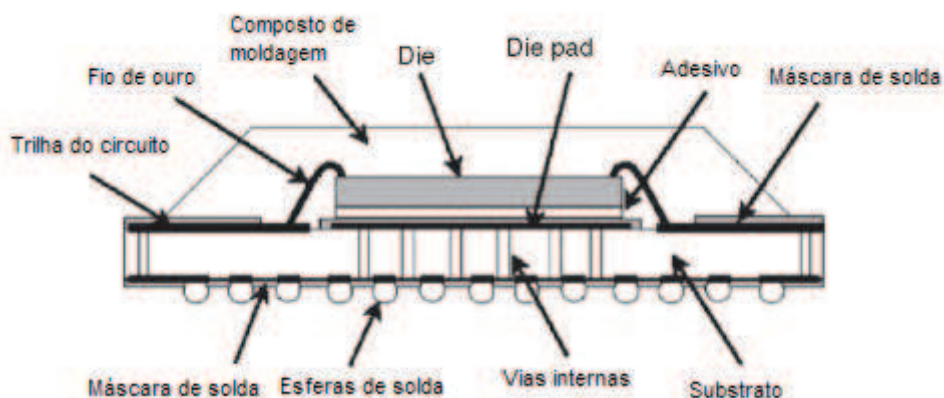
Figura 3 – Componente da família QFN.



Fonte: Adaptado de Ardebili (2009).

c) Encapsulamento com Substrato: Para componentes do tipo BGA (*Ball Grid Array*) são utilizados substratos em detrimento aos *lead frames*. Os *dies* são montados sobre esse substrato e o contato com a placa é feito através de uma matriz de esferas, soldados na parte inferior do substrato. As principais variações dos BGAs são PBGA (*Plastic Ball Grid Array*), FC-PBGA (*Flip-Chip Plastic Ball Grid Array*) e CSP (*Chip Scale Package*). Na Figura 4 se observa a estrutura de um componente montado sobre um substrato (ARDEBILI; PECHT, 2009). Esse tipo de encapsulamento permite uma maior densidade de conexões, pois pode utilizar toda a área do componente para conexões de entradas e saídas (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Figura 4 – Componente da família FBGA.



Fonte: Adaptado de Ardebili (2009).

2.2 Encapsulamento Hermético e Não-Hermético

Um componente é definido como encapsulado hermeticamente quando o mesmo é selado de forma a estar totalmente protegido da umidade do ambiente e gases corrosivos. Neste tipo de encapsulamento são utilizados materiais com alta impermeabilidade, como metais e cerâmica. É criado um ambiente seco no encapsulamento e após uma tampa é soldada a base do encapsulamento, formando um componente totalmente selado (ARDEBILI; PECHT, 2009). Os primeiros encapsulamentos microeletrônicos utilizavam metais, especificamente uma liga chamada de Kovar, composta de níquel, cobalto e ferro. Com a evolução dos materiais, passou a ser utilizada uma liga metálica composta por níquel e cobre, conhecida como Alloy 42 (ARDEBILI; PECHT, 2009). Encapsulamentos herméticos metálicos são muito utilizados em aplicações militares devido a necessidade de altas taxas de confiabilidade em ambientes com condições severas (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997).

Já os materiais cerâmicos são utilizados no encapsulamento de semicondutores devido às suas excelentes propriedades de hermeticidade, boas propriedades térmicas e isolamento elétrico. Analisando apenas funcionalidade, pode-se dizer que materiais cerâmicos são ideais para o encapsulamento, entretanto analisando demais fatores, como custo e dificuldade de processamento, esse material passa a ser utilizado apenas em aplicações específicas (GILLES, 2002). Um circuito integrado cerâmico pode custar até dez vezes mais do que o mesmo componente encapsulado com material plástico. Devido a esse fator, sua aplicação acaba sendo restringida a aplicações militares e sistemas especializados, de baixo volume e alta performance (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Em contra-partida, existem os encapsulamentos não-herméticos, também conhecidos como encapsulamentos poliméricos, onde é aceito algum nível de absorção de umidade, sendo utilizados os seguintes materiais na fabricação de componentes eletrônicos: epóxi, silicone, poliimida, entre outros (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997). Encapsulamentos poliméricos oferecem diversas vantagens sobre o encapsulamento hermético, em relação ao tamanho, peso, custo, desempenho e disponibilidade. Além disso, a produtividade de encapsulamentos que usam materiais poliméricos é muito mais alta. A principal desvantagem no uso desta tecnologia sempre esteve na confiabilidade do circuito encapsulado, porém nas últimas décadas houve grandes avanços nos materiais utilizados no encapsulamento polimérico, aumentando significantemente a sua qualidade. Estudos realizados por diferentes fabricantes mostram que a taxa de falhas de componentes encapsulados com materiais poliméricos é similar a de componentes herméticos, conforme pode ser visualizado na Tabela 1 (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Tabela 1 – Confiabilidade térmica e mecânica.

Estudo	Encapsulamento	Taxa de falhas
Grigg (Rockwell, Collins)	Plástico	0,0016%/1000 h
Grigg (Rockwell, Collins)	Hermético	0,0061%/1000 h
Lidback (Motorola SPS)	Plástico	0,083%/1000 ciclos
Lidback (Motorola SPS)	Hermético	0,099%/1000 ciclos
Villalobos (Motorola TED)	Plástico	0,44%/1000 ciclos
Villalobos (Motorola TED)	Hermético	0,38%/1000 ciclos

Fonte: (ARDEBILI; PECHT, 2009)

2.3 O Processo de Moldagem

Nos primórdios da fabricação de semicondutores, os materiais mais utilizados para encapsulamento eram vidro, cerâmicas e metais, que oferecem hermeticidade para o componente e consequentemente aumentam a confiabilidade. Os aspectos negativos da utilização destes materiais no encapsulamento são o custo e a dificuldade de industrialização, fato que motivou a pesquisa para utilização dos materiais poliméricos no processo de encapsulamento (GOOSEY, 1985).

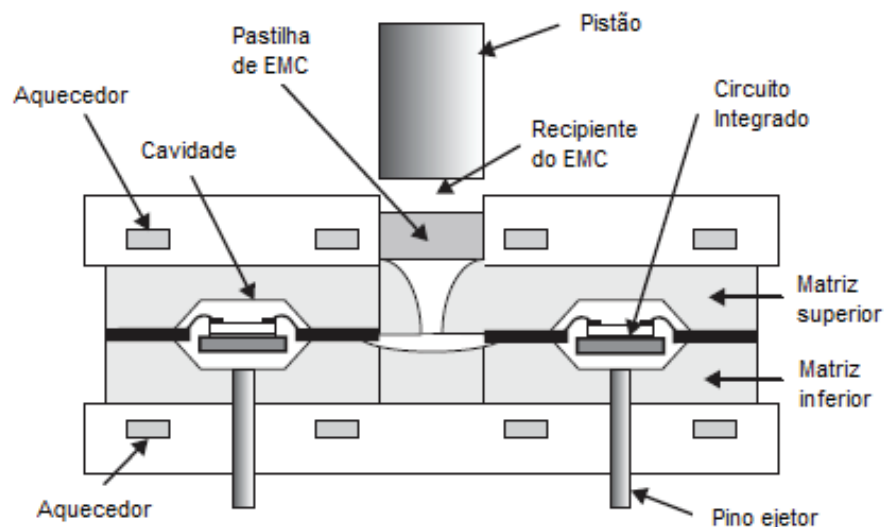
As principais dificuldades encontradas no desenvolvimento desses materiais estavam relacionadas com os altos níveis de impureza dos polímeros. Aspectos como adesão inadequada, contaminação em diversas escalas, incompatibilidade térmica entre os materiais, com coeficientes de expansão térmica muito destoantes, além da dificuldade de aceitação de encapsulamentos não-herméticos por parte da indústria explicam a demora para utilização destes materiais em larga escala de produção (TUMMALA, 2001).

O encapsulamento utilizando materiais plásticos surgiu no mercado nos anos 1950, sendo que no início dos anos 60 emergiu como alternativa simples e barata comparada aos encapsulamentos cerâmicos e metálicos. Nos anos 90, o encapsulamento utilizando como base materiais plásticos correspondia a 97% da produção mundial. Diversas técnicas podem ser utilizadas no encapsulamento de semicondutores, sendo as três principais a moldagem por transferência, por injeção e por compressão (ARDEBILI; PECHT, 2009), descritas a seguir:

a) **Moldagem por Transferência:** É o principal método utilizado para encapsulamento de circuitos integrados, devido a simplicidade para utilização em processos de produção em massa e o baixo custo na maioria das famílias de encapsulamento (TUMMALA, 2001). Neste processo, o componente a ser encapsulado é inserido em uma matriz de moldagem e o EMC é transferido sob pressão. Este método oferece muitas vantagens em relação às outras técnicas pois não se utiliza valores muito elevados de pressão, diminuindo a probabilidade de danos e trincas (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Como pode ser observado na Figura 5, os componentes a serem moldados (circuitos integrados) são inseridos na matriz de moldagem, assim como as pastilhas de EMC. O EMC é preformado, ou seja, possui tamanho e peso definidos, e é inserido em uma cavidade específica

Figura 5 – Esquema de moldagem por transferência



Fonte: Adaptado de Ardebili (2009).

chamada de *pot*. O composto é pré-aquecido antes de ser transferido para as cavidades. Na sequência, o pistão empurra o composto de moldagem, aplicando a pressão necessária para que o composto percorra os *runners* até que faça o completo preenchimento das cavidades, sendo mantida a pressão de aperto durante todo esse ciclo (TUMMALA, 2001).

Neste processo é necessário ter o controle de diversos parâmetros para garantir o resultado desejado ao final da etapa de moldagem, dentre os quais podem ser citados a temperatura, pressão de fechamento, pressão de transferência e o tempo de transferência. Para controle de temperatura, o método mais usual é aquecimento elétrico, através de resistências. A temperatura da prensa deve ser alta o suficiente para realizar rapidamente a cura do material, mas não tão alta a ponto de solidificar o composto de moldagem antes do completo preenchimento das cavidades. Já a pressão de aperto das matrizes deve ser suficiente para o completo fechamento da matriz, de forma a prevenir vazamentos, também chamados de *mold flash* (ARDEBILI; PECHT, 2009).

A pressão de transferência é a pressão exercida pelo pistão sobre o composto de moldagem, que irá forçar o fluxo deste material a percorrer as cavidades e contê-lo até a polimerização. Basicamente, existem duas fases para o processo de preenchimento da cavidade. A fase 1 consiste em liquefazer o composto e preencher a cavidade, enquanto na fase 2 o composto é curado, refrigerado e solidificado. Quando o molde é preenchido é iniciada a reação do material, que tem sua viscosidade aumentada, até que o material se transforme em um gel. No final do processo, o composto é solidificado e dada continuidade ao processo químico de ligações cruzadas entre as moléculas (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Em processos produtivos é desejável um alto rendimento, portanto quanto mais rápido for executado esse processo, melhor em termos de manufatura, porém isso pode significar uma

maior pressão de transferência. Este aumento da pressão de transferência pode causar diversos problemas no processo, como o arraste de fios (*wire sweep*), gerando falhas de curto circuito e circuito aberto. (ARDEBILI; PECHT, 2009).

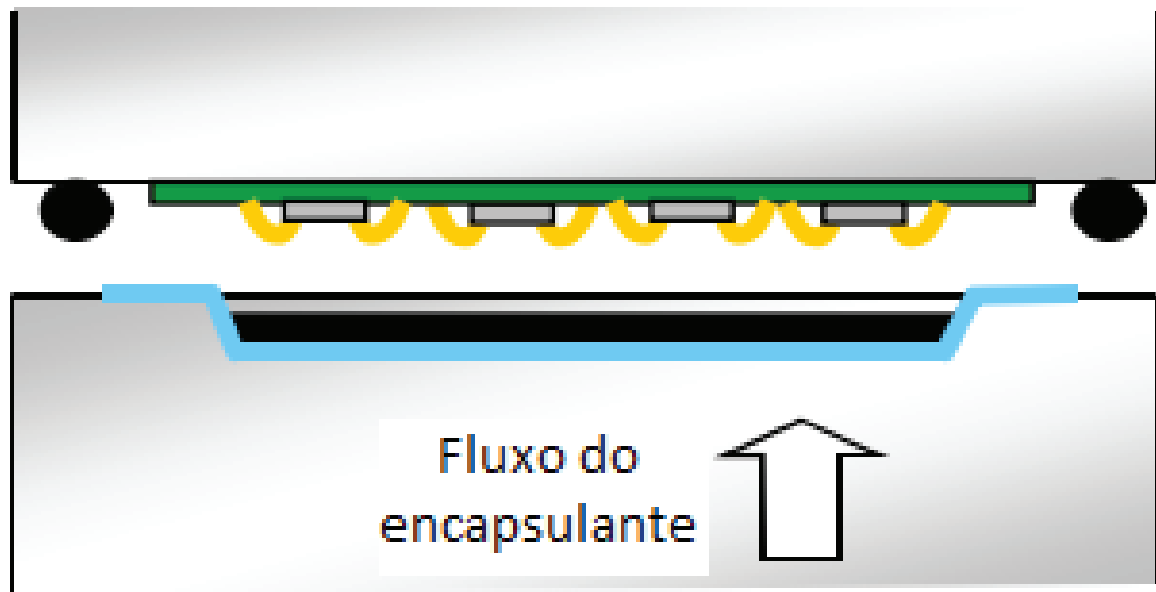
b) Moldagem por Injeção: Este método foi desenvolvido inicialmente para injeção de materiais termoplásticos, mas que pode ser adaptado para utilização de materiais termofixos. É um processo que exige altos valores de pressão, fator que encarece o maquinário necessário (ARDEBILI; PECHT, 2009). A principal vantagem dessa tecnologia é a velocidade do processo, em comparação com a moldagem por transferência. O material encapsulante é aquecido e amolecido para ser injetado. Como o molde não possui aquecimento, o material é refrigerado de forma acelerada, sendo por isso indicado para materiais termoplásticos (MAYS; HUBENKO, 1998). O material de moldagem é movimentado por um mecanismo em formato de parafuso e é plastificado dentro de um tambor durante essa movimentação. Após é injetado no molde em alta pressão. Essa tecnologia de encapsulamento normalmente é mais suscetível ao arraste de fios. (ARDEBILI; PECHT, 2009).

c) Moldagem por Compressão: Com a miniaturização dos componentes eletrônicos surge a necessidade de novas tecnologias de encapsulamento de semicondutores, para evitar danos em sua montagem e problemas de confiabilidade. A tecnologia de moldagem por compressão visa resolver algumas dificuldades no uso da moldagem por transferência para encapsulamentos modernos, como 2,5D, 3D, MEMS e demais componentes com interconexão utilizando fios finos (MIURA, 2016). Essa tecnologia é adequada para encapsulamentos extremamente finos e com vários *chips*, já que deposita uma quantidade pré-determinada de encapsulante, tendo grande precisão no preenchimento da cavidade de moldagem (ARDEBILI; PECHT, 2009).

O componente a ser moldado é inserido na parte superior da matriz, com a parte ativa virada para a parte inferior, conforme pode ser visto na Figura 6. O composto de moldagem é granulado e inserido na parte inferior da matriz, sobre um filme. Com isso, o encapsulante não entra em contato com a matriz, diminuindo a contaminação e problemas de preenchimento do encapsulamento, sendo esse filme substituído a cada ciclo de moldagem. Após, a matriz é fechada e é aplicada a força de compressão necessária para que o processo seja executado conforme o esperado, preenchendo toda área do componente com o encapsulante. (MIURA, 2016)

O componente a ser moldado é inserido na parte superior da matriz, com a parte ativa virada para a parte inferior, conforme pode ser visto na Figura 6. O composto de moldagem é granulado e inserido na parte inferior da matriz, sobre um filme. Com isso, o encapsulante não entra em contato com a matriz, diminuindo a contaminação e problemas de preenchimento do encapsulamento, sendo esse filme substituído a cada ciclo de moldagem. Após, a matriz é fechada e é aplicada a força de compressão necessária para que o processo seja executado conforme o esperado, preenchendo toda área do componente com o encapsulante. (MIURA, 2016)

Figura 6 – Esquema de moldagem por compressão



Fonte: Adaptado de Miura (2016).

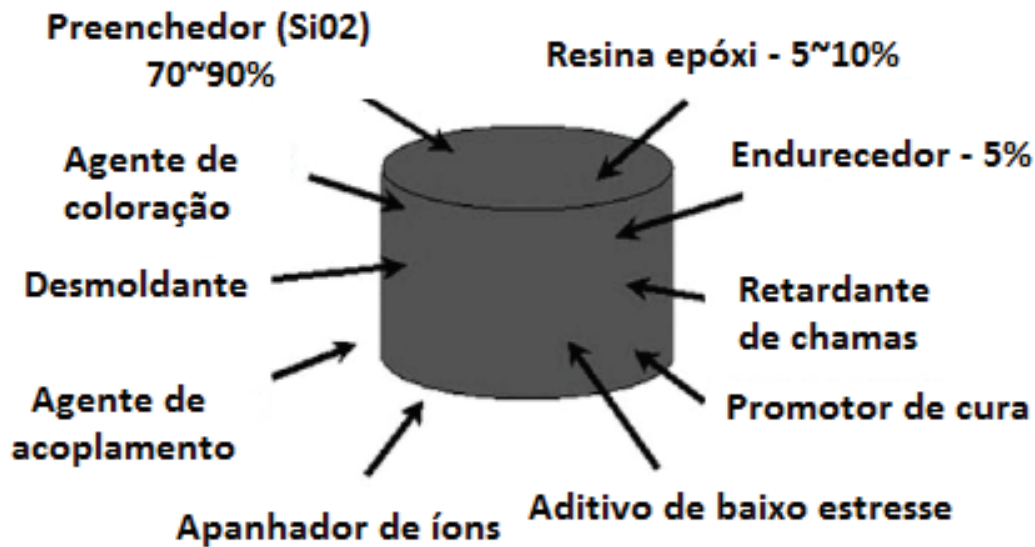
As principais vantagens deste método estão na redução do desperdício de material encapsulante, já que não existe sobra da injeção ou transferência do material e a redução de deslocamento de fios e a formação de *voids*, que são bolsões de ar que podem dar origem a defeitos, uma vez que não há preenchimento através de fluxo de resina. Como desvantagens, ainda é uma tecnologia nova e não consolidada como a moldagem por transferência e os custos de maquinário e produção, que embora estejam caindo ainda são superiores aos da moldagem por transferência. (MIURA, 2016)

2.4 Materiais para Encapsulamento Polimérico

Os compostos epóxi para moldagem (EMC) podem ser classificados em termoplásticos, termofixos e elastômeros. Termoplásticos são os materiais que podem ser fundidos sempre que aquecidos. Já os polímeros termofixos possuem cadeias com ligações cruzadas que fazem com que o material se funda apenas uma vez. Os elastômeros também são polímeros termofixos, porém com alta elasticidade. Nos processos industriais a grande maioria dos encapsulantes são termofixos, à base de resina epóxi (ARDEBILI; PECHT, 2009).

No processo de fabricação do EMC termofixo são utilizadas diversas matérias primas, de forma a atingir todas as características necessárias relacionadas a confiabilidade, propriedades físicas e moldabilidade. Alguns exemplos dos componentes do EMC são resinas epóxi, resinas fenólicas, sílica fundida (carga), agentes de acoplamento, promotores de cura e agente desmoldante. Na Figura 7 pode-se observar a composição típica de um EMC utilizado no encapsulamento de semicondutores (LU; WONG, 2008).

Figura 7 – Composição típica de um EMC



Fonte: Adaptado de Lu (2008).

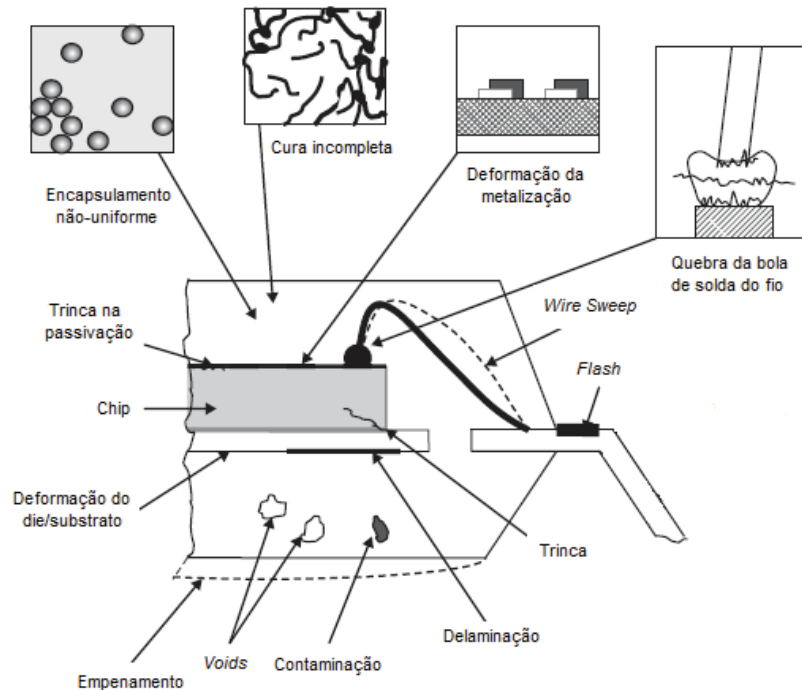
O uso de resinas a base de epóxi é muito vantajoso devido ao balanceamento das propriedades físicas, como alta adesão, pequeno grau de encolhimento, resistência química, resistência a umidade, resistência a temperaturas relativamente altas e boas propriedades elétricas (LU; WONG, 2008). As cargas são utilizadas para modificar as propriedades e características do epóxi, como ajuste do coeficiente de expansão térmica e reduzir a absorção de umidade do EMC. A microestrutura, formato da partícula, tamanho e distribuição do material escolhido como carga ditam a reologia do composto fundido (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997).

Resinas de fenol novolac são comumente empregadas como endurecedores devido suas propriedades térmicas, elétricas, de cura e estabilidade de armazenamento. (LU; WONG, 2008) Outros itens importantes nos encapsulantes poliméricos são os agentes de cura, que promovem a reação entre a resina epóxi, o endurecedor e os aceleradores que auxiliam na redução do tempo de cura. Outros aditivos utilizados são os agentes de coloração, como negro de fumo, e o desmoldante, composto de cera natural ou sintética (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997).

2.5 Defeitos e Falhas Durante o Processo de Moldagem por Transferência

Durante o processo de moldagem podem ocorrer situações que danifiquem o produto, relacionadas com o material ou parâmetros de processo. Na Figura 8 pode-se observar os principais modos de falha relacionados com o encapsulamento polimérico (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Figura 8 – Principais modos de falha durante o encapsulamento



Fonte: Adaptado de Ardebili (2009).

Os defeitos relacionados de forma direta ao material encapsulante são causados principalmente pela baixa adesão do composto ao substrato. Entre esses defeitos podem ser citados a delaminação, ou seja, uma lacuna entre o EMC e o substrato ou a *die* fazendo com que o encapsulamento se desprenda ou que absorva umidade, e o empenamento, que é uma curvatura que se forma ao longo do substrato, gerando estresse mecânico e problemas de confiabilidade (CHEN; LO, 2016). Segundo Tummala, Rymaszewski e Klopfenstein (1997), trincas no *die* podem ser causadas devido a diferença de coeficientes de expansão térmica (mesmo mecanismo que gera o empenamento).

Outros modos de falha não estão relacionados apenas com o material, sendo que um conjunto de fatores deve ser levado em consideração em sua análise de causa. O estresse durante o preenchimento da cavidade, imposto pelo EMC, pode causar trincas na passivação e consequentemente defeitos de curto-circuito, circuito aberto e fuga de corrente. Neste caso, os parâmetros do processo, assim como a estrutura da carga do EMC estão relacionados com esse defeito. (TUMMALA; RYMASZEWSKI; KLOPFENSTEIN, 1997)

Outros defeitos do processo de encapsulamento são os *voids*, que são bolhas de ar na parte interna do encapsulamento. As principais causas deste modo de falha estão associadas ao processo, uma vez que os mesmos podem ser reduzidos utilizando vácuo durante o preenchimento da cavidade ou as chamadas armadilhas de ar, no projeto da matriz, onde o ar é capturado durante o preenchimento da cavidade. Este defeito é o principal gerador da falha por *popcorning*, que

são trincas no encapsulamento após o processo de refusão, onde o ar dentro do encapsulamento aquece muito rapidamente e não consegue expandir, gerando essas trincas (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Já o *mold flash*, que é o vazamento do composto, como um escorrimento do mesmo para áreas externas à cavidade, está relacionado à parâmetros não otimizados na pressão de fechamento da matriz de moldagem. Se esse vazamento ocorrer sobre os terminais de solda pode gerar falhas por contato, fazendo com que o componente perca a sua funcionalidade. Ainda podem ser citados defeitos por contaminação, relacionados ao método e manuseio, causando corrosão e problemas de confiabilidade (ARDEBILI; PECHT, 2009)

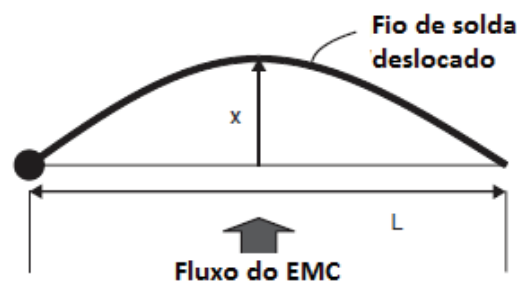
Segundo Tummala, Rymaszewski e Klopfenstein (1997) e Ardebili e Pecht (2009), o defeito de *wire sweep* está relacionado aos parâmetros de processo, às características do material encapsulante, ao projeto do encapsulamento e às etapas anteriores. Este defeito, por ser o alvo deste trabalho, será detalhado na próxima seção.

2.6 Wire Sweep

Segundo Tummala (2001), o *wire sweep*, ou arraste dos fios, é definido como a deformação dos fios de solda resultante do fluxo viscoso do EMC durante o encapsulamento, típico do processo de *transfer molding*. Este defeito tende a ocorrer em fios que estão orientados de forma perpendicular a direção do fluxo do encapsulante durante o preenchimento da matriz de moldagem.

O *wire sweep* é uma causa comum de defeitos de fabricação durante o processo de *transfer molding*. Quando a resina epóxi entra na cavidade de moldagem, pode existir força suficiente para danificar os frágeis fios de solda. Sob condições adequadas, esse movimento é reduzido e não gera danos ao componente, porém, quando são usadas taxas de transferência mais elevadas, o fluxo induzido pode ser forte o suficiente para fazer com que os fio se encostem, e conseqüentemente, gerando falhas de curto-circuito ou fuga de corrente. (NGUYEN, 1988)

Figura 9 – Definição de *wire sweep*



Fonte: Adaptado de Ardebili (2009).

O arraste dos fios pode ser medido pela razão de deslocamento, através do ponto máximo lateral do fio em função de seu comprimento. Na Figura 9, está ilustrada essa forma de medição, onde a linha mais fina representa a forma esperada do fio de solda, o x mede a maior distância entre o formato esperado e o real e L se refere ao comprimento do fio (ARDEBILI; PECHT, 2009). Na Equação 1 está definida a razão de *wire sweep*.

$$\text{WireSweep}[\%] = x/L \quad (1)$$

Segundo Tummala, Rymaszewski e Klopfenstein (1997), o arraste de fios pode ocorrer por uma ou várias causas combinadas, desde características do encapsulante, parâmetros do processo ou problemas na máquina. Entre as principais causas raízes, podem ser listados:

- Viscosidade do EMC: O tablete de EMC, no processo de pré-aquecimento, pode ter desbalanceamento de temperatura, ou seja, sua região externa que fica em contato com o êmbolo está mais quente que o seu interior, e a viscosidade do composto durante o preenchimento da cavidade é afetada, causando o arraste dos fios.
- Velocidade de transferência: Esse parâmetro pode gerar problemas de wire sweep se a transferência estiver muito lenta ou muito rápida. Quando o EMC é forçado a atravessar rapidamente, o fluxo alto gera um momento nos fios dos componentes mais próximos ao dos pistões e do recipiente de EMC. Se o EMC atravessa a cavidade muito lentamente, a viscosidade do material se altera durante o preenchimento, causando arraste nos últimos componentes a serem moldados, devido a moldagem ocorrer para um substrato com vários componentes, distribuídos na forma de matriz.
- Fluxo desbalanceado nas cavidades: Neste caso, será afetada a estabilidade dos fios de solda, já que aumenta a tendência de existir o efeito "racetrack", onde algumas cavidades são preenchidas antes de outras, prendendo ar dentro do encapsulamento.
- Movimentação dos voids: No preenchimento da cavidade, pequenos voids se movendo entre os fios podem gerar oscilações na posição de equilíbrio dos fios.
- Choque mecânico com o material de carga: Os fabricante de EMC utilizam como principal carga a sílica, em diferentes granulações e percentuais. Uma grande quantidade dessas partículas colidindo com fios de solda, pode gerar deformação plástica no fio.

2.7 Simulação do Processo de Moldagem por Transferência

Segundo Tummala, Rymaszewski e Klopfenstein (1997), o processo de moldagem por transferência é mais complicado de se tratar analiticamente do que outras formas de extrusão de termoplásticos ou moldagem por injeção, devido o comportamento dependente do tempo do

composto de moldagem, as irregularidades dos caminhos por onde o composto flui e a geometria das cavidades. Entretanto, existe alguns modelos para simulação deste processo que já foram provados, economizando tempo e dinheiro para realização de ajustes.

A modelagem normalmente envolve a descrição química e reológica do EMC combinada com um modelo de simulação de escoamento de fluidos. Um fator chave para um bom resultado é caracterizar corretamente o composto, para determinar seu comportamento cinético e reológico. Ao reunir as informações do material e aplicar em um modelo de molde com várias cavidades, pode-se verificar as características de preenchimento de um composto particular (ARDEBILI; PECHT, 2009).

Para modelagem do sistema de moldagem, a reação de cura do epóxi pode ser descrita através de uma expressão autocatalítica, enquanto a viscosidade dinâmica é coberta pelo modelo de Castro–Macosko. Para simulação de *wire sweep*, um modelo analítico da deformação dos fios pode ser acoplado com as informações cinéticas e reológicas. (ARDEBILI; PECHT, 2009)

A utilização de *softwares* do tipo CAE (Engenharia assistida por computador) e CFD (Fluidodinâmica computacional) enriquecem as pesquisas e desenvolvimento na área de encapsulamento de circuitos integrados. Existem diversas ferramentas que atualmente são utilizadas para essa aplicação, entre as quais podemos citar: PLICE-CAD, FLUENT, C-Mold, Moldex3D, Autodesk Moldflow, ANSYS e COMSOL. Para a simulação são criados modelos 3D, de acordo com as dimensões e características físicas do CI e são utilizadas as equações de conservação de massa, momento e energia para cálculo das interações entre fluidos e sólidos (FSI). Essas equações são solucionadas através de métodos numéricos de discretização, como método das diferenças finitas, método dos volumes finitos e método dos elementos finitos. (KHOR et al., 2014)

Para descrição do comportamento do composto de moldagem durante o encapsulamento, são utilizadas as propriedades do material e o modelo de viscosidade, se utilizando de premissas como fluxo laminar, fluido incompressível, fluido Newtoniano generalizado (GNF), fluido não-Newtoniano, densidade constante e processos não-isotérmico. (KHOR et al., 2014)

2.7.1 *Softwares* de simulação multifísica

Entre os principais *softwares* de CAE utilizados para simulação de mecânica dos fluidos e interação com sólidos podem ser listados:

- ABAQUS: Utiliza o método dos elementos finitos (FEM) e é utilizado em diversos trabalhos para simular a deformação dos fios e sendo integrado a outros programas que realizam a simulação do escoamento, como o ANSYS FLUENT, apesar de possuir elementos de simulação de problemas chamados multifísicos. Possui uma versão acadêmica sem custos.
- ANSYS: Também utiliza FEM para análises estruturais (deformação dos fios de solda) e

método dos volumes finitos (FVM) para simulação da mecânica dos fluidos, através da ferramenta ANSYS FLUENT.

- Autodesk Moldflow: Possui uma ferramenta de análise para encapsulamento de componentes eletrônicos, onde simula o preenchimento da cavidade de moldagem, que é recomendada para predição de *wire sweep*, deformação dos fios de ligação, entre outros defeitos de encapsulamento.
- COMSOL Multiphysics: Possui módulo de FSI (interação Fluido-estrutura), indicada para observar a interação do fluido com as estruturas mecânicas. Essa interface utiliza um método arbitrário Lagrangiano-Euleriano (ALE) combinando as equações de Euler para o fluido com uma descrição de Lagrange para os sólidos.
- Moldex3D: É um *software* de CAE, com foco em simulação de injeção de plásticos (moldagem). Utiliza FVM como método para solução das simulações. Pode ser utilizado combinado com as principais ferramentas de desenho assistido por computador (CAD). Possui um modelo específico para encapsulamento plástico.

2.7.2 Método Arbitrário Lagrangiano–Euleriano

Este método é aplicado na simulação numérica de problemas multidimensionais em dinâmica de fluidos e mecânica de sólidos e tem como principal diferencial a possibilidade de lidar com grandes níveis de distorção e fornecer resultados precisos quando existe interface entre materiais e interação entre componentes fixos e móveis. É baseado na descrição de Lagrange e na descrição euleriana, sendo desenvolvido para combinar as vantagens dessas duas descrições cinemáticas clássicas e minizar as desvantagens. Algoritmos lagrangeanos são usados principalmente na mecânica estrutural, uma vez que permitem rastrear superfícies livres e interfaces entre diferentes materiais, tendo como ponto negativo a incapacidade de seguir grandes distorções, que é o ponto forte dos algoritmos eulerianos, sendo esses aplicados na dinâmica de fluidos. (STEIN; BORST; HUGHES, 2004).

2.8 Trabalhos Similares

Existem diversos estudos já publicados buscando métodos para realizar a caracterização do processo de *transfer molding* e suas influências na ocorrência de *wire sweep*, visando a otimização do processo. Em Ali, Hian e Ang (2013), é proposta a caracterização do *wire sweep* para um encapsulamento LQFP, de 24x24 mm, com 176 terminais e fios de solda de 20 μm e espaçamento de 50 μm . Neste trabalho não foi utilizada simulação, optando-se pela realização de um projeto de experimentos (DOE), onde foram utilizados quatro fatores (tempo de transferência, tempo de pré-aquecimento do composto, pressão de fechamento da prensa e pressão de transferência) e três níveis (atual, um abaixo e um acima). Após, foram avaliadas as respostas com auxílio de um *software* estatístico para cada um dos fatores e suas correlações. As

conclusões foram que havia uma região mais propensa ao arraste dos fios e o principal fator é o tempo de transferência. Além disso, foram encontrados problemas de moldabilidade que podem ser melhorados a partir do ajuste de temperatura para melhor fluidez do composto, diminuição da altura do fio de solda e otimização dos parâmetros do processo.

O trabalho de Han et al. (2011a) consiste em avaliar os efeitos do encapsulamento e estrutura das cavidades do molde no aparecimento de *wire sweep* em encapsulamento SOT. Para isso, foi desenvolvido um modelo numérico híbrido, que utilizava o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas, validado através de trabalhos experimentais e utilizado para análise do arraste dos fios de solda. Foram avaliados os efeitos da altura da cavidade e da altura do *die* no comportamento dos fios de solda, e após a velocidade de transferência e a viscosidade do EMC, onde concluiu-se que a velocidade é o fator mais relevante no *wire sweep* para o componente estudado.

Em um trabalho similar de Han et al. (2011b), também com encapsulamentos do tipo SOT, foram criados dois modelos de simulação, sendo o primeiro com análise 3D e o segundo com análise em dois domínios, para verificação do padrão do fluxo de EMC e prever o arraste dos fios durante o processo de *transfer molding* utilizando o modelo híbrido de elementos finitos e diferenças finitas do *software* comercial Autodesk Moldflow Insight. Os dois modelos obtiveram resultados satisfatórios, porém o modelo com análise em dois domínios atingiu maior precisão, na comparação com as observações experimentais. Foram avaliados os parâmetros como temperatura da superfície de moldagem, tempo de injeção, tempo de cura, pressão de transferência e concluiu-se que o aumento da velocidade é a principal razão para ocorrência do *wire sweep*.

No trabalho de Han e Huh (2000) são estudados métodos de análise de *wire sweep* em encapsulamento de semicondutores, utilizando soluções numéricas e analíticas. Para realização da análise do fluxo global (ao longo dos caminhos e cavidades) é utilizado o *software* C-Mold Reactive Molding. Já para a análise local e cálculos de deformação dos fios de solda, são utilizadas as seguintes combinações:

1. Equação de Lamb associada a fórmula de Nguyen.
2. Equação de Takaisi associada a fórmula do arco circular.
3. Análise numérica associada com cálculo numérico utilizando a ferramenta ABAQUS.

Os resultados mostraram que o modelo número 3 apresenta valores do índice de *wire sweep* muito similares aos experimentais, enquanto o número 1 tem resultados consistentemente superiores e o número 2 inferiores.

Em Khor e Abdullah (2012), é avaliada a interação do EMC e as demais estruturas do *chip* em relação a deformações e tensões mecânicas. São utilizados modelos de Castro-Macosko para

simular o comportamento dinâmico do EMC, integrando a equação de Kamal para considerar o efeito de cura. É utilizado também um modelo de FSI, que consiste na análise da estrutura e sua interação com o fluido. São utilizados os *software* FLUENT, baseado no método dos volumes finitos, e o ABAQUS, que utiliza o método dos elementos finitos, para execução da análise. Foram realizadas 29 rodadas, visando otimização do processo de encapsulamento, através da redução das tensões entre o EMC e as demais estruturas do componente. Como resultado, foi possível realizar a otimização do processo com os resultados obtidos na simulação.

O trabalho de Ramdan et al. (2012) apresenta a simulação de *wire sweep* em componentes BGA com encapsulamento polimérico considerando efeitos reológicos, utilizando a técnica de interação entre fluidos e sólidos. Para modelar o comportamento do fluxo do EMC foi utilizado o modelo de Castro-Macosko incluindo o efeito de cura e a técnica de volume do fluido. O modelo de viscosidade foi simulado no FLUENT enquanto o comportamento dos fios de solda foi simulado no ABAQUS. Foi utilizada a interface para fenômenos físicos MpCCI (Interface de acoplamento com código paralelo baseado em malhas) para integração dos modelos. Foram utilizados três modelos de EMC, sendo que o caso 2, com menor viscosidade, apresentou a menor distribuição de pressão e conseqüentemente menos deformação nos fios de solda. Além disso, ficou comprovada a robustez da utilização do MpCCI para solução de problemas envolvendo FSI. Em uma derivação deste trabalho, Ramdan et al. (2016) confirmam bons resultados utilizando esta interface (MpCCI) entre a análise do fluido e da estrutura, obtendo um desvio máximo de 6,5% nos perfis de arrastamento dos fios.

No trabalho de Subramanian et al. (2011), é estudado um modelo para predição de *wire sweep* durante o preenchimento da cavidade. Um modelo 3D é utilizado como alternativa aos softwares comerciais, visando reduzir as discrepâncias, utilizando a técnica de elementos finitos. O modelo proposto foi simulado com diversas malhas e avaliou diferentes perfis de solda, composto de moldagem e velocidade de transferência, comparando os resultados simulados com medições reais, atingindo resultados similares na correlação com os dados experimentais, utilizando como base a média e desvio padrão das medições.

O trabalho de Tanaka et al. (1994) apresenta uma análise do escoamento do material encapsulante no processo de *transfer molding*. Neste estudo, foi utilizado o *software* C-SET para simulação do escoamento do composto termofixo. As variáveis utilizadas foram as características do EMC, alterando também a velocidade de transferência e a temperatura da superfície da matriz de moldagem. A simulação auxiliou os pesquisadores a esclarecerem as causas da formação de *voids*, porém conclui-se que os parâmetros de escoamento espiral, tempo de gelificação e viscosidade são insuficientes para explicar esse fenômeno, uma vez que está fortemente relacionado com a pressão de entrada no caminho até a cavidade.

O estudo proposto por Tay e Lee (2002) apresenta uma simulação tridimensional de transiente do preenchimento da cavidade de moldagem e análise de *wire sweep*. Este tipo de simulação não é comumente empregado devido a sua complexidade e aos altos custos computa-

cionais. Foi utilizado o modelo de Hele-Shaw, válido para cavidades finas, onde se assume que não existe variação na temperatura e velocidade na direção da espessura do componente. Foi utilizado um encapsulamento do tipo BGA com 173 fios de solda, colocando o *gate* em duas posições distintas. Foi utilizado o método dos elementos finitos para análise da deformação da estrutura dos fios de ouro, assumindo que não havia estresse inicial nos mesmos em um primeiro momento. Após, foram utilizados os valores de estresse inicial, baseados no formato do fio. Foram utilizados três valores de velocidade de transferência e concluído que quanto menor a velocidade de transferência, maior o impacto do estresse residual.

O trabalho de Tong, Kwong e Ip (2003) visa a otimização das condições de processamento para o encapsulamento de componentes eletrônicos utilizando *transfer molding*. Para tal, foram realizadas simulações com os softwares C-Mold Reactive Molding e C-Mold Microchip Encapsulation conforme o método de Taguchi. O modelo matemático utilizado é baseado no de Hele-Shaw e foram avaliados parâmetros como tempo de transferência, temperatura do molde, pressão de fechamento, entre outros. Os resultados das simulações alimentaram um algoritmo que avalia índices de qualidade para identificação das condições ótimas do processo. Foram realizados dois testes para verificação dos resultados que ficaram muito próximos das simulações.

No estudo dos pesquisadores Wu et al. (1998), é desenvolvido um modelo tridimensional para simulação de *wire sweep* no processo de moldagem por transferência no encapsulamento de circuitos integrados. Neste modelo, são utilizadas as leis básicas de conservação como a equação de continuidade, equação do momento e a equação da conservação de energia, enquanto para a parte cinética da taxa de conservação química da resina epóxi é utilizada a equação de Nguyen. O método numérico empregado para simulação do escoamento na cavidade é o dos elementos finitos. Como objeto da simulação é utilizado um componente retangular com 26 ligações. As conclusões obtidas foram que a deflexão dos fios de solda varia de acordo com o ângulo de orientação do fio na cavidade e que o tempo de cura tem impacto, principalmente quando muito curto, assim como a temperatura do molde.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Proposta de Pesquisa

Para o desenvolvimento deste estudo, a metodologia empregada está dividida em duas etapas, sendo a primeira o desenvolvimento e validação de um modelo computacional que visa simular o comportamento do *wire sweep* em processo de moldagem por transferência e a segunda avaliar este fenômeno em função da variação dos parâmetros de moldagem.

Para o desenvolvimento do modelo foram considerados os trabalhos similares, listados na revisão bibliográfica deste trabalho. Nestes trabalhos foram apresentados diversos modelos para simulação da dinâmica de fluidos e sua interação com os fios de solda e os resultados obtidos.

Para validação do modelo, foram encapsulados componentes utilizando parâmetros simulados. Foi utilizada a técnica de projeto de experimentos (DOE) para se montar uma matriz com os parâmetros mais significativos para o *wire sweep* e assim realizar o processo de moldagem dos circuitos integrados.

Para avaliação do arraste dos fios, foi utilizado um equipamento de raio-x, para visualização do estado dos fios após o processo de moldagem. Com base nas medições deste experimento, os resultados entre a simulação e a prática foram comparados para avaliação da acuracidade do modelo simulado.

3.2 Escolha do *Software* de Simulação

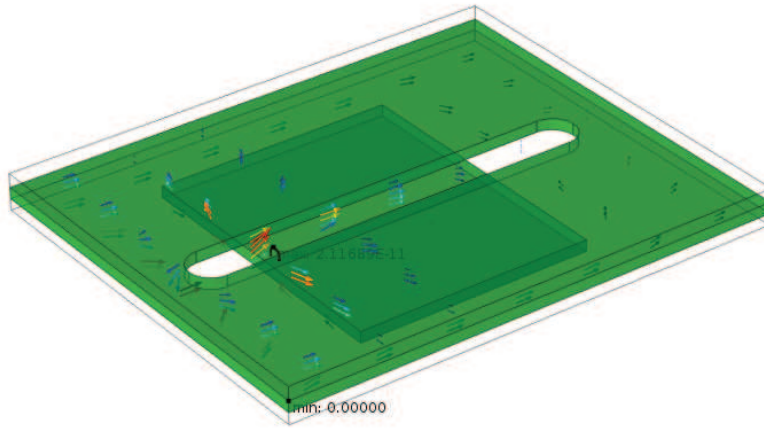
Após alguns ensaios de simulação com modelos simples, optou-se pela utilização do software COMSOL Multiphysics devido ao mesmo possuir um módulo de FSI (Interação Fluido-Estrutura) que contempla as diferentes variáveis físicas do processo de moldagem por transferência.

Foram avaliadas questões como acesso a informação, como tutoriais e exemplos, interface do programa, estudos similares utilizando o software, além de questões de licença e contratuais.

Para validação desse módulo foram analisados exemplos com alguma similaridade com o problema de *wire sweep* obtidos da biblioteca do *software*. O *software* escolhido é largamente utilizado para simulação de dinâmica de fluidos e deformações estruturais, alguns com o módulo de FSI e outros com simulações separadas.

As primeiras análises foram realizadas com apenas um fio e uma geometria 2-D, para verificar se o programa era capaz de resolver esse formato de simulação. Com o avanço do trabalho, foi se desenvolvendo o modelo completo, em 3-D, com a adição de elementos e peculiaridades da arquitetura BOC, conforme pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Geometria simulada nas primeiras análises.

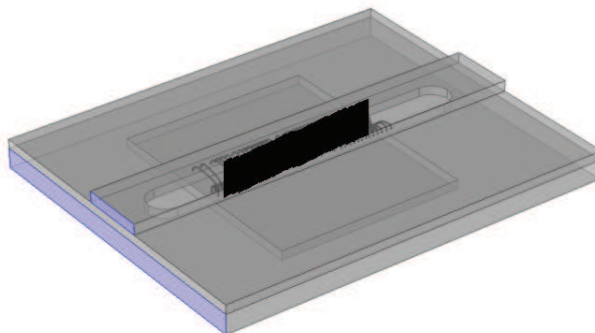


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Desenvolvimento da Geometria

O desenho do componente eletrônico foi realizado no próprio *software* COMSOL, utilizando os valores nominais de dimensão de cada componente do encapsulamento. Os valores dimensionais foram obtidos dos desenhos de especificação deste componente. Na Figura 11, pode-se observar a geometria simulada. Foi adicionada uma tarja sobre os fios por questão de segredo industrial.

Figura 11 – Geometria simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

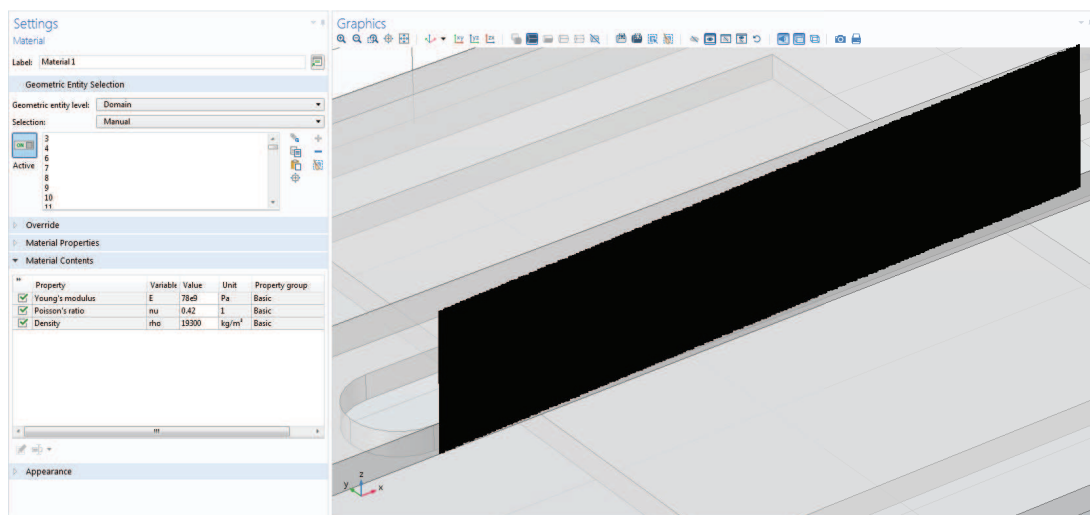
Para que o escoamento do fluido simulado represente as condições reais da maneira mais precisa possível, o diâmetro, a altura do *loop* e a posição de início e final de cada um dos fios de solda foram cuidadosamente inseridos na geometria, assim como o canal no substrato, visto que a parte alvo do estudo está definida nesta região.

Com o circuito integrado desenhado, o passo seguinte é realizar a associação dos materiais com cada domínio. No caso do encapsulamento em estudo, os principais materiais são:

- Placa de circuito impresso composta de resina epóxi e fibra de vidro;
- *Chip* de silício;
- Fios de ouro;
- Composto epóxi para moldagem, sendo composto de epóxi e sílica, majoritariamente.

As propriedades desses materiais foram inseridas no modelo, selecionando e aplicando cada domínio composto pelo material. É fundamental que as propriedades dos materiais estejam corretas para que o modelo simulado tenha comportamento esperado. Os valores inseridos foram obtidos de certificados de conformidade dos fornecedores e folha de dados do materiais. Na Figura 12 observa-se a tela de inserção do material nos domínios selecionados. Foi adicionada uma tarja sobre os fios por questão de segredo industrial.

Figura 12 – Parametrização dos materiais (fio de ouro) no modelo



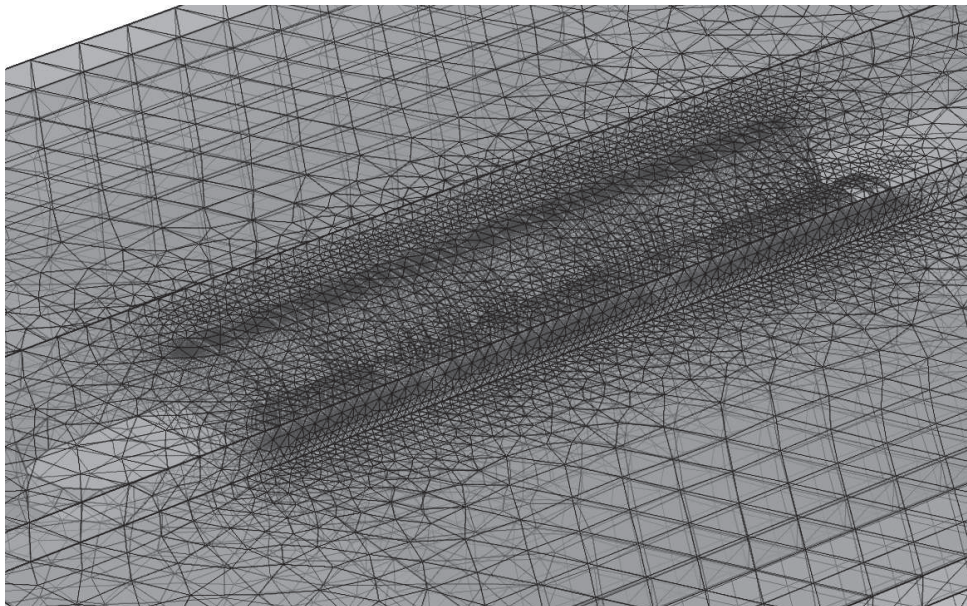
Fonte: Elaborado pelo autor.

Também se faz necessário configurar as restrições do modelo e o software trata de maneira distinta a parte de escoamento e de deformação mecânica. Na dinâmica dos fluidos, os primeiros itens que devem ser configurados são o tipo do escoamento e do fluido, nesse caso um fluido incompressível com fluxo laminar. Após deve-se definir os domínios de entrada e saída

do fluido, informando a velocidade e pressão durante o escoamento. A velocidade é um dos fatores de avaliação deste estudo e será alterada conforme a tabela do projeto de experimentos, enquanto a pressão é mantida constante. Já para o estudo mecânico foram definidos os engastes, ou seja, restrições de movimento, nas pontas de todos os fios, considerando que os mesmos estão firmemente soldados nos terminais do *chip* e da PCI.

Com todas configurações realizadas, é necessário gerar a malha de elementos, item crítico para uma simulação. Os resultados da simulação estão diretamente ligados a qualidade da malha, ou seja, se a malha não possuir elementos de tamanho e formato adequados e distribuídos de forma coerente, a simulação pode não convergir ou gerar resultados incorretos ou sem a precisão desejada. Na Figura 13 observa-se a malha utilizada na simulação.

Figura 13 – Malha do modelo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

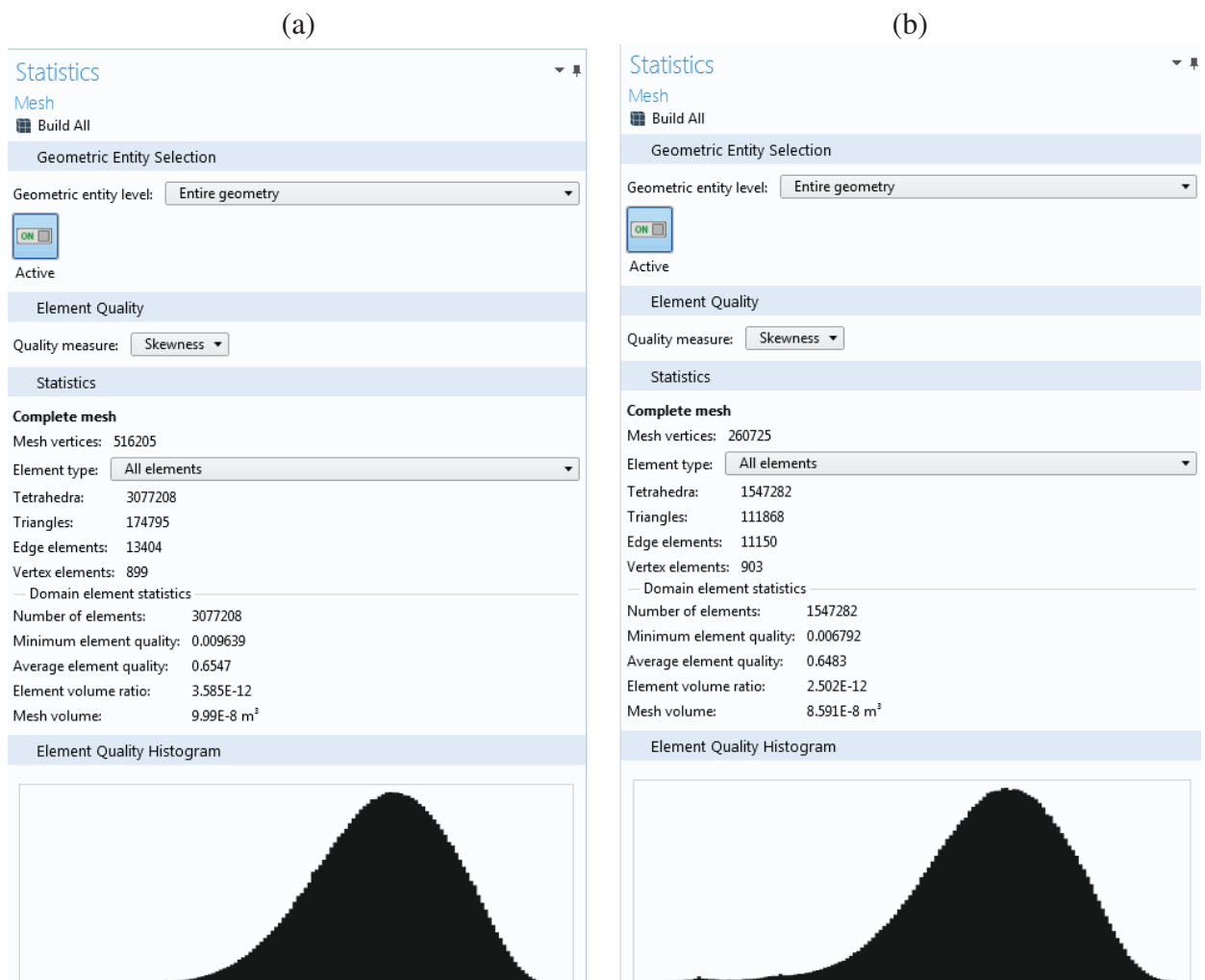
As primeiras simulações apresentavam erros de convergência devido ao tamanho inadequado dos elementos da malha, sendo assim foram criadas regiões com diferentes tamanhos de elementos: a região do canal, onde estão os fios de interconexão do *die* com a PCI possui elementos menores por ser a área de interesse e a região de menor interesse, onde não existem fios, que utiliza elementos maiores, uma vez que a quantidade de elementos está diretamente ligada ao custo computacional para processamento da simulação. A malha utilizada é calibrada para dinâmica dos fluidos.

Após a primeira adequação da malha, foi verificado que o número de elementos continuava muito alto, sendo necessárias 7 horas para finalizar uma rodada de simulação. Buscando aprimorar a malha, foram realizados novos ajustes na distribuição dos elementos, buscando resultados iguais a simulação com maior custo computacional. Para isso, foi aumentado o elemento na região de conexão do fio com o *die*, uma vez que a área foi definida como um engaste. Com

esse novo padrão de malha, foi possível reduzir o tempo de simulação em aproximadamente 53%, diminuindo de 7 para 3 horas.

Para avaliação da qualidade da malha, foram utilizadas as ferramentas estatísticas que o próprio *software* disponibiliza. Esta avaliação é feita com base na proporcionalidade dos elementos ao longo da geometria. Cantos e bordas possuem, muitas vezes, elementos distorcidos, ou seja, a relação entre as arestas dos mesmos não é fixa, e esse fator influencia na acuracidade simulação, pois em um modelo ideal, todos os elementos deveriam ser iguais. Como pode ser visto na Figura 14, houve uma redução de aproximadamente 50% no número de elementos e a qualidade média dos elementos manteve-se praticamente constante, reduzindo de 65,47% para 64,83%. Os resultados obtidos na simulação para essas duas malhas foram os mesmos, confirmando que essa simplificação não gerou impactos na simulação.

Figura 14 – Comparação entre a malha utilizada na primeira simulação com resultados (a) e a malha final (b).

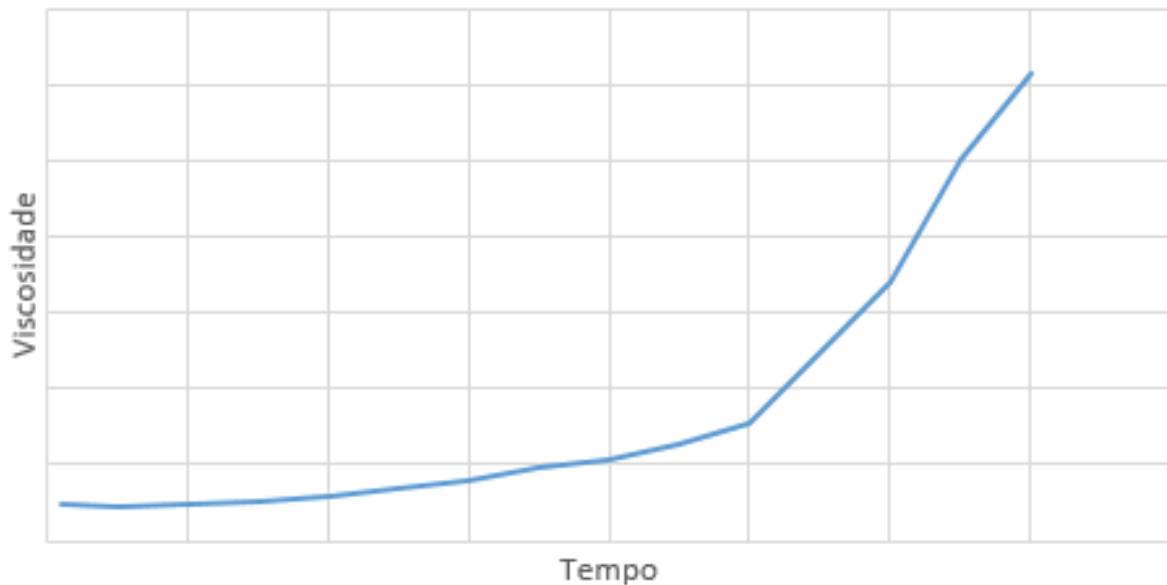


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a simulação foram consideradas algumas premissas e simplificações, devido ao alto custo computacional necessário para simulação de uma geometria tão complexa:

- Foi simulado apenas um componente do painel, considerando que o mesmo está posicionado na coluna mais afastada da injeção do composto epóxi, ou seja, no ponto mais crítico para ocorrência de *wire sweep*. Neste ponto, por ser o final da cavidade, a resina pode estar com a viscosidade mais alta, propiciando o arraste dos fios, se o tempo de injeção for da mesma ordem de grandeza do tempo de gel do EMC.
- Foi realizada uma simulação estacionária, com a reologia do EMC sendo considerada no parâmetro de viscosidade do material. Sabendo a velocidade do fluido e o tamanho da PCI, se determina a viscosidade em função do tempo no momento em que o material está fluindo pelos fios de ouro. Como pode-se observar na Figura 15, o composto possui um comportamento onde a viscosidade aumenta conforme o tempo o passa. A Figura está fora de escala devido a segredo industrial. Para a simulação, foi computado o tempo de transferência e utilizado o valor de viscosidade de acordo com o momento em que o fluido escoava pelos fios.

Figura 15 – Gráfico da viscosidade do EMC em função do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

- A transferência de calor do molde para a resina não será adicionada ao modelo, devido ao tempo de pré-aquecimento do EMC, que ocorre na mesma matriz de moldagem.
- Na simulação por FSI, é considerado que a cavidade já estava preenchida com o fluido, que irá se mover pelo componente. Essa simplificação pode ser utilizada devida a posição do componente a ser simulado.

3.4 Projeto de Experimentos (DOE)

Segundo Antony (2014), projeto de experimentos é uma técnica utilizada para conhecer novos processos ou aumentar o conhecimento para otimização de processos existentes. Alguns conceitos importantes para execução e compreensão de um DOE são:

- Fatores: Variáveis que se deseja verificar a influência;
- Níveis: Quantidade de valores que as variáveis vão receber ao longo do estudo;
- Variável resposta: É o resultado de acordo com as condições dos fatores;
- Aleatorização: Realização das corridas ou experimentos de uma maneira em que sua ordem não interfira nos resultados.

Para utilização da simulação com o propósito de se obter o grau de influência dos parâmetros simulados e conseqüentemente otimizar os parâmetros de moldagem, foi realizado um projeto de experimentos de dois fatores e três níveis, objetivando avaliar os fatores predominantes na ocorrência do *wire sweep*. Os dois fatores de estudo são a velocidade de transferência e a temperatura da matriz.

A velocidade de transferência está ligada diretamente ao arraste, pois o movimento do fluido gera um momento no fio, causando a movimentação do mesmo. Quanto maior a velocidade, maior o momento. Foram avaliadas três velocidades de injeção do fluido, aqui tratadas como -1, 0 e 1 por questão de segredo industrial.

Os coeficientes do DOE significam:

- -1: Valor mínimo para a variável;
- 0: Valor intermediário para a variável;
- 1: Valor máximo para a variável;

Já a viscosidade do fluido está diretamente ligada a temperatura. O EMC, por ser um termofixo, se liquefaz por um determinado período, com uma viscosidade específica. Ao submeter o material a diferentes temperaturas, será alterada a viscosidade do mesmo, bem como o tempo em que este material permanece líquido. Também foram avaliadas três temperaturas, dentro dos limites sugeridos pelo fabricante, também tratadas neste estudo por -1, 0 e 1.

A Tabela 2 apresenta a distribuição dos experimentos propostos. A simulação foi realizada de ordem aleatória, conforme gerado pelo *software* estatístico utilizado e ilustrado na coluna nomeada como Corridas na Tabela 2.

A simulação foi realizada de ordem aleatória, conforme gerado pelo *software* estatístico utilizado e ilustrado na coluna nomeada como Corridas na tabela 2.

Tabela 2 – Projeto de experimentos.

Corridas	Ordem	Velocidade de transferência	Temperatura
1	1	-1	-1
3	2	1	-1
9	3	1	1
8	4	0	1
7	5	-1	1
6	6	1	0
2	7	0	-1
5	8	0	0
4	9	-1	0

3.5 Validação do Modelo

Para validação do modelo foram produzidas quatro amostras, duas com ajuste de parâmetros 1 e outras duas com o ajuste de parâmetros 2:

- Ajuste de parâmetros 1: Valor intermediário de velocidade e temperatura onde a viscosidade é mínima;
- Ajuste de parâmetros 2: Valor máximo de velocidade e temperatura onde a viscosidade é mínima.

A viscosidade não foi considerada diretamente como variável por não ser um parâmetro de máquina, ou seja, não é possível ajustar a viscosidade desejada na receita do produto e sim a temperatura da injeção, que foi utilizada como parâmetro no DOE.

As amostras foram verificadas antes do processo de moldagem com o intuito de garantir a integridade dos fios de solda para que erros do processo de solda de fios não afetassem os resultados do estudo. Esta verificação foi realizada com auxílio de microscópio de alta magnificação e medição.

Após a moldagem, foram realizadas as medições utilizando a interface do equipamento de Raio-X, conforme pode ser visualizado na Figura 16. Para essa medição, a peça é inserida no equipamento e se utiliza de cursores para definir o início e o final do fio. Com isso, o software automaticamente cria uma linha reta, ou seja, o comportamento ideal do fio de solda. Após, deve-se mover o cursor até o máximo desvio do fio, ou seja, o ponto mais afastado. O resultado da taxa de *wire sweep* pode ser visualizado na tela do software.

Figura 16 – Medição da taxa de *wire sweep* utilizando o equipamento de Raio-X



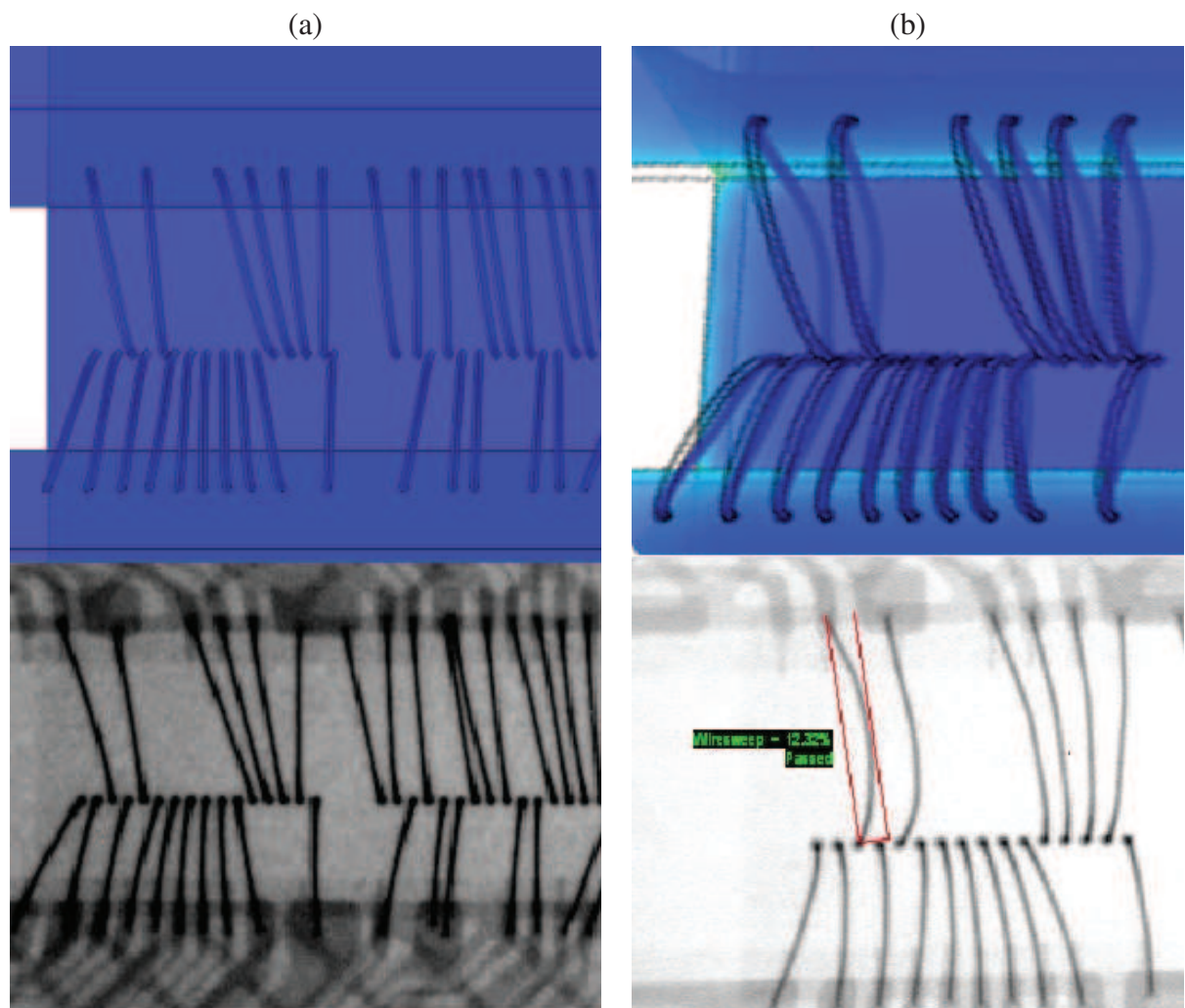
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS

4.1 Correlação Entre Simulação e Dados Reais

Para validação da simulação, foram comparados seus resultados com peças produzidas nas mesmas condições. Na Figura 17 pode se observar a simulação em comparação com uma imagem obtida com uso da máquina de Raio-X, para verificação do *wire sweep*.

Figura 17 – Comparação entre a simulação e uma peça produzida nas condições simuladas 1 (a) e 2 (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para tal, foram moldados componentes usando duas configurações existentes na simulação:

1. Velocidade de transferência intermediária e temperatura onde a viscosidade do fluido é

mínima.

2. Velocidade de transferência máxima e temperatura onde a viscosidade do fluido é mínima.

Optou-se por não alterar a temperatura devido restrições de tempo e disponibilidade de máquina, uma vez que é necessário aguardar a estabilização desta temperatura cada vez que é feita alguma modificação. A análise realizada manteve a premissa da simulação, sendo realizadas as medições nas memórias posicionadas na coluna mais afastada da entrada da injeção.

Foram medidos 3 fios com o auxílio da máquina de Raio-X, sendo o fio 1 mais à esquerda, o fio 2 centralizado e o fio 3 à direita, de 1 substrato (25 componentes) e calculada a média e o desvio padrão de cada uma das amostras. Foram utilizados fios mais longos pela maior propensão ao *wire sweep* desses fios.

A Tabela 3 apresenta a comparação dos resultados obtidos para Velocidade de transferência intermediária e temperatura onde a viscosidade do fluido é mínima. A coluna referente a *Taxa de wire sweep* representa o valor médio para as amostras reais e para os valores simulados essa medição é única, por isso a coluna Desvio padrão é preenchida com N/A (Não Aplicável). A coluna Percentual de erro indica a diferença percentual entre o valor simulado e a média dos valores medidos, portanto, só é aplicável para os fios simulados, sendo preenchida com N/A nos campos referentes aos fios reais.

Tabela 3 – Comparação entre os dados reais e simulados do experimento 1.

Amostra	Razão de <i>wire sweep</i>	Desvio padrão	Percentual de erro
Fio 1 Real	5,21%	1,88%	N/A
Fio 1 Simulado	5,14%	N/A	1,23%
Fio 2 Real	4,09%	1,00%	N/A
Fio 2 Simulado	4,57%	N/A	11,66%
Fio 3 Real	6,03%	1,47%	N/A
Fio 3 Simulado	6,25%	N/A	3,66%

Como o método de medição depende da precisão no momento de definir o início e o final do fio, existe uma parcela de erro correspondente a essa variável. Além disso, o comportamento dos fios ao longo de uma PCI não será igual, podendo ter uma variação de componente para componente, natural do processo. Apesar disso, o desvio padrão obtido da análise das medições se manteve conforme o esperado, ou seja, não superando 30% da média do valor medido. Todos os valores simulados estão dentro de um desvio padrão, ou seja, pode-se considerar que a simulação representa o processo real.

Da mesma forma, foi realizada a verificação para Velocidade de transferência máxima e temperatura onde a viscosidade do fluido é mínima. A Tabela 4 apresenta a comparação dos resultados obtidos. Nas medições realizadas em peças produzidas nessa condição, a razão de *wire*

sweep aumentou e a proporção do desvio padrão das medidas se manteve. Os valores simulados também se inserem dentro da média, com um desvio padrão para mais ou para menos, dos valores medidos.

Tabela 4 – Comparação entre os dados reais e simulados do experimento 2.

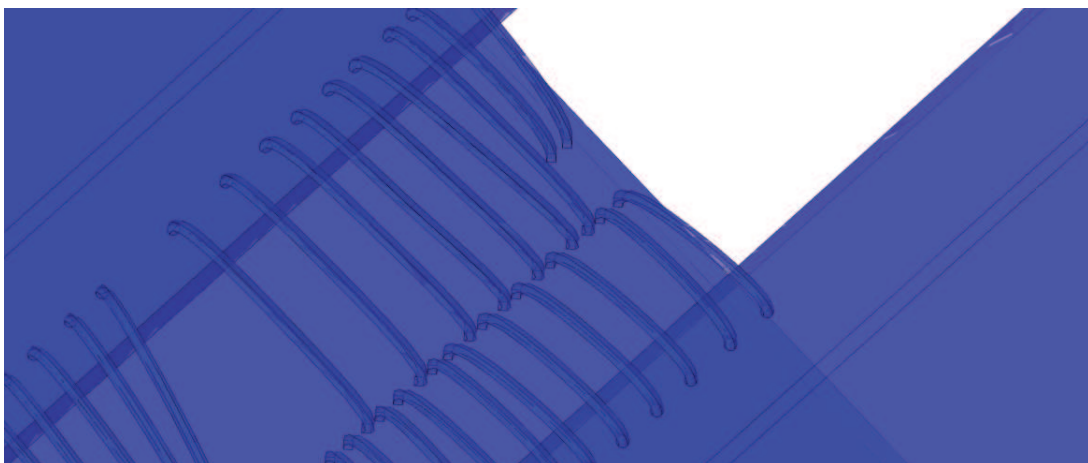
Amostra	Razão de <i>wire sweep</i>	Desvio padrão	Percentual de erro
Fio 1 Real	11,63%	3,66%	N/A
Fio 1 Simulado	13,40%	N/A	15,26%
Fio 2 Real	10,01%	3,31%	N/A
Fio 2 Simulado	9,90%	N/A	1,08%
Fio 3 Real	8,85%	1,17%	N/A
Fio 3 Simulado	8,20%	N/A	7,34%

4.2 Resultados da Simulação

Com as definições dos experimentos realizada, foram iniciadas as simulações de acordo com o projeto. Com o resultado da simulação, foram medidos os 33 fios mais longos e calculada a média e desvio padrão de cada experimento.

a) Experimento 1: Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é mínima:

Figura 18 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é mínima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

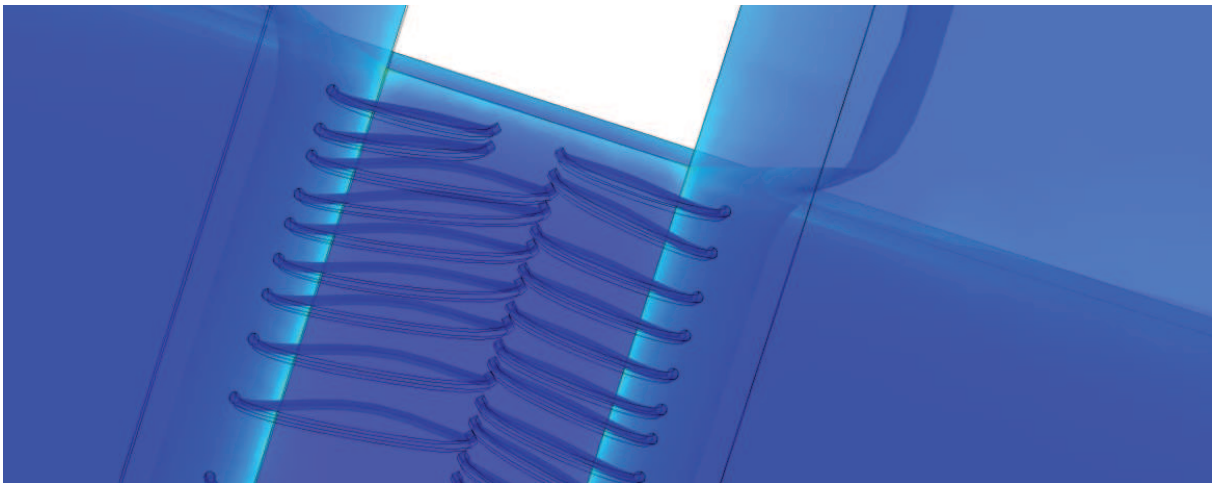
Neste experimento, foi utilizada a menor velocidade de transferência do composto epóxi aliada a temperatura onde o fluido possui a menor viscosidade. Apesar da velocidade baixa, o tempo de injeção está compreendido no período estável (menor que o tempo de gel) e mínimo de viscosidade do composto.

Com esta configuração, a razão de *wire sweep* se manteve próxima a zero, confirmando que quanto mais baixa a velocidade, menor o arraste dos fios, conforme Figura 18. Nesta simulação resultado médio foi de 0,28%.

b) Experimento 2: Velocidade de Transferência máxima e Temperatura onde a viscosidade é mínima:

Na segunda simulação, foi utilizada a maior velocidade de transferência do composto epóxi aliada a temperatura onde o fluido possui a menor viscosidade. Com estes parâmetros, a injeção se torna mais rápida (aproximadamente 5,5s).

Figura 19 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é mínima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

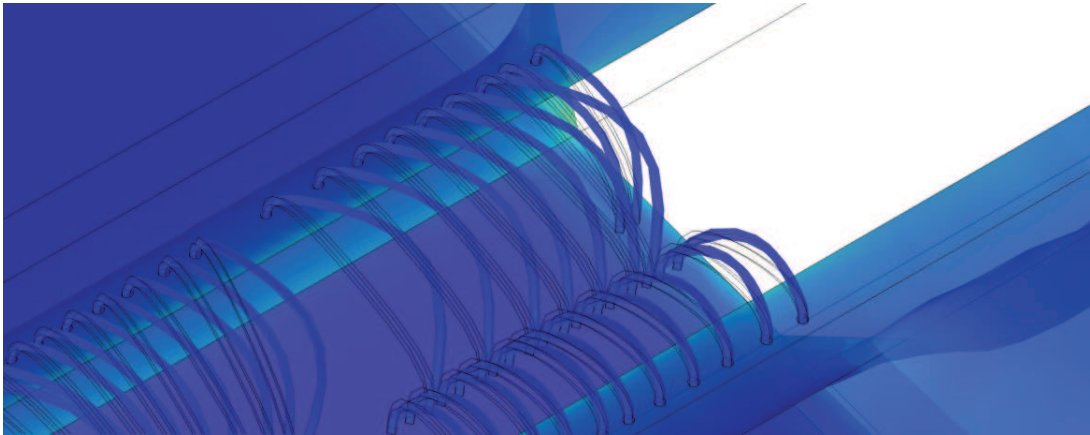
Com o sistema parametrizado desta forma, a razão de *wire sweep* aumentou, conforme esperado. Maior velocidade implica em um maior arraste dos fios, visualizando-se na Figura 19. O resultado médio desta rodada foi de 12,36%. Com essa taxa de *wire sweep* ainda não são encontrados curto-circuitos na estrutura do circuito integrado.

c) Experimento 3: Velocidade de Transferência máxima e Temperatura onde a viscosidade é máxima:

Na terceira rodada da simulação, foi utilizada a maior velocidade de transferência do composto epóxi aliada a temperatura a maior viscosidade. Com estes parâmetros, é esperado a maior taxa de *wire sweep*, pois são as condições mais favoráveis para o aparecimento desse fenômeno.

O resultado médio desta rodada foi de 29,67%, ou seja, acima da especificação máxima para este tipo de produto, que é de 20%. Foram observados curto-circuitos, causados pelos fios mais longos do encapsulamento, conforme Figura 20. Essa condição é a mais extrema que foi simulada neste estudo, ou seja, é esperada que a maior razão de *wire sweep* ocorra com essa parametrização.

Figura 20 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência máxima e Temperatura onde a viscosidade é máxima.

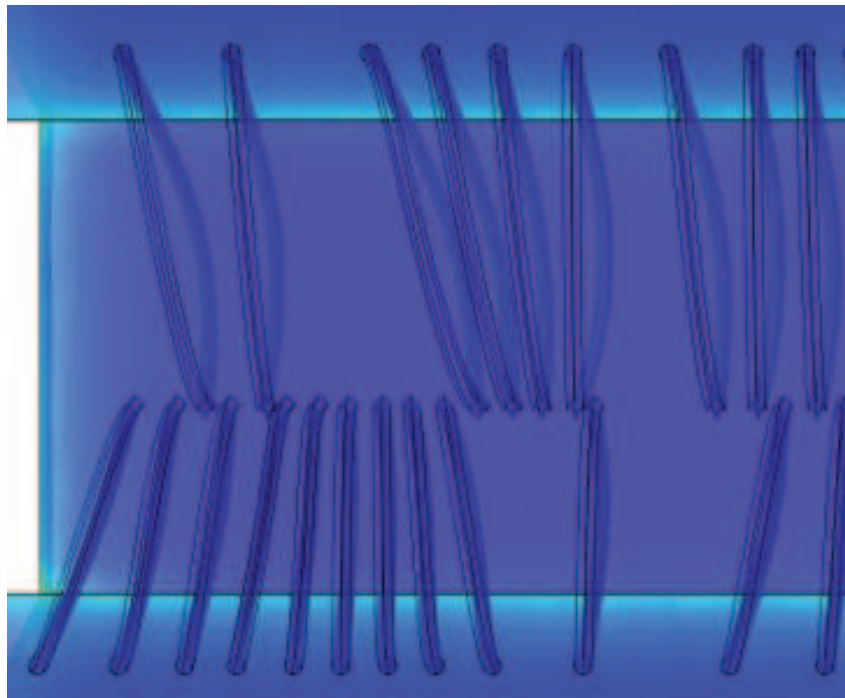


Fonte: Elaborado pelo autor.

d) Experimento 4: Velocidade de Transferência média e Temperatura onde a viscosidade é máxima:

Nesta rodada da simulação, foi utilizada uma velocidade intermediária aliada a temperatura a maior viscosidade.

Figura 21 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência média e Temperatura onde a viscosidade é máxima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

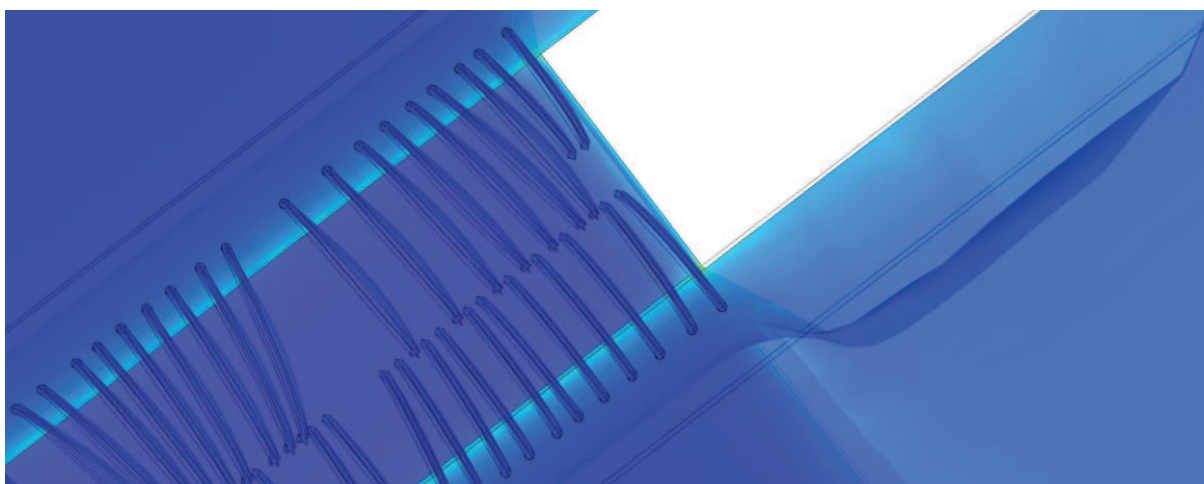
O resultado médio desta rodada foi de 7,85%, onde não são causados danos ao componente, devido a distância e diâmetro dos fios. Visualiza-se na Figura 21 a condição dos fios após

o escoamento do fluido.

e) Experimento 5 - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é máxima:

Na quinta rodada do experimento, foi utilizada a velocidade mais baixa com a temperatura de maior viscosidade. Com esta velocidade, o tempo total de injeção leva aproximadamente 16s, abaixo do limite da especificação do *gel time*, ou seja, com a viscosidade estável.

Figura 22 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é máxima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado médio desta rodada foi de 5,90%, valor que está de acordo com as especificações de processo. A baixa velocidade de injeção contribui de maneira significativa com esse resultado. Na Figura 22 pode-se visualizar o resultado da simulação.

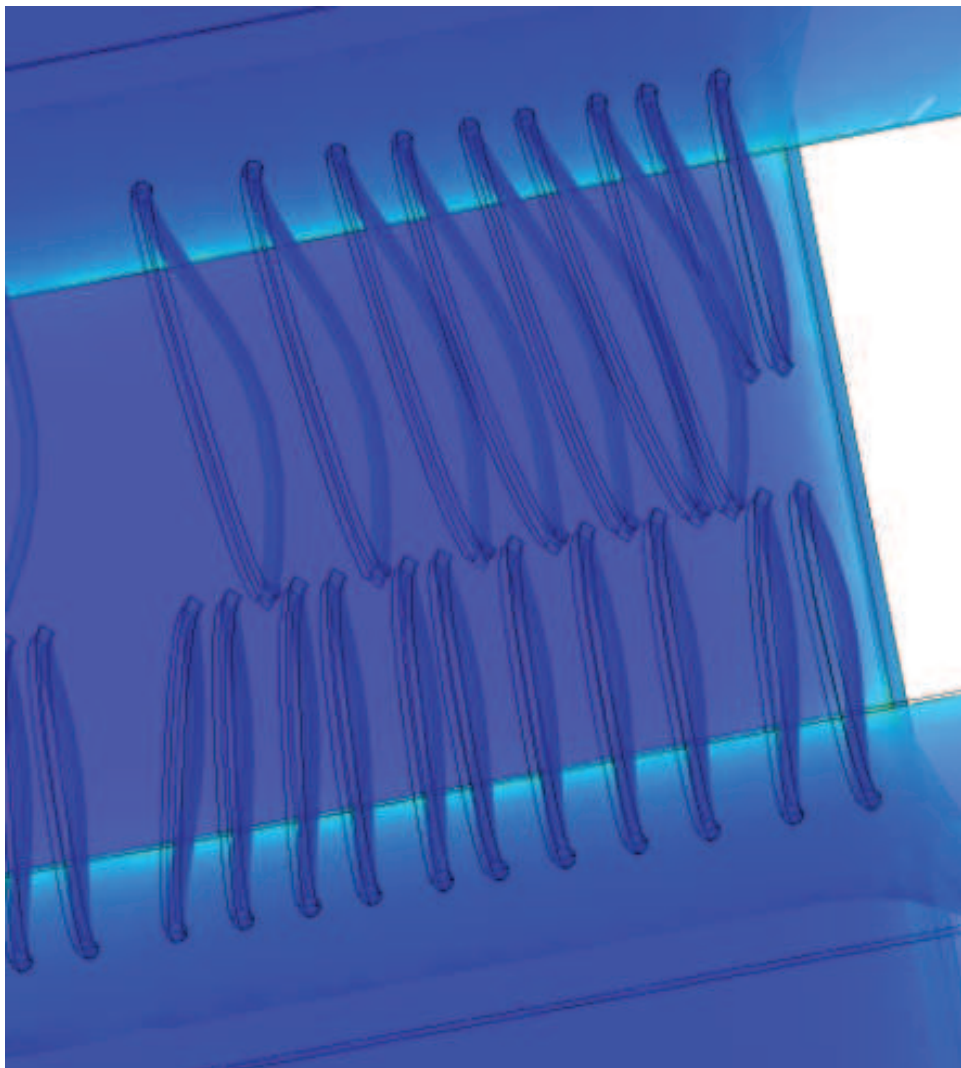
f) Experimento 6 - Velocidade de Transferência máxima e Temperatura onde a viscosidade é média:

Nesta rodada da simulação, foi utilizada a velocidade mais alta com a temperatura onde a viscosidade do fluido é intermediária.

O resultado médio desta rodada foi de 18,15%, considerada uma alta razão de arraste dos fios, que pode ser visualizada na Figura 23. Este resultado está muito próximo do limite de especificação, o que representa risco de danos elétricos irreversíveis ao componente.

Esse resultado é muito importante para o entendimento de cada fator na análise e prevenção do fenômeno de *wire sweep*, pois pode-se medir a parcela de contribuição da velocidade de transferência em relação à viscosidade, comparando com o experimento de número 3. Aumentar a velocidade de transferência pode estar associada com ganhos de capacidade de máquina, porém deve-se tomar todo cuidado na parametrização para evitar a injeção de falhas no processo e a consequente redução de desempenho.

Figura 23 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência máxima e Temperatura onde a viscosidade é média.



Fonte: Elaborado pelo autor.

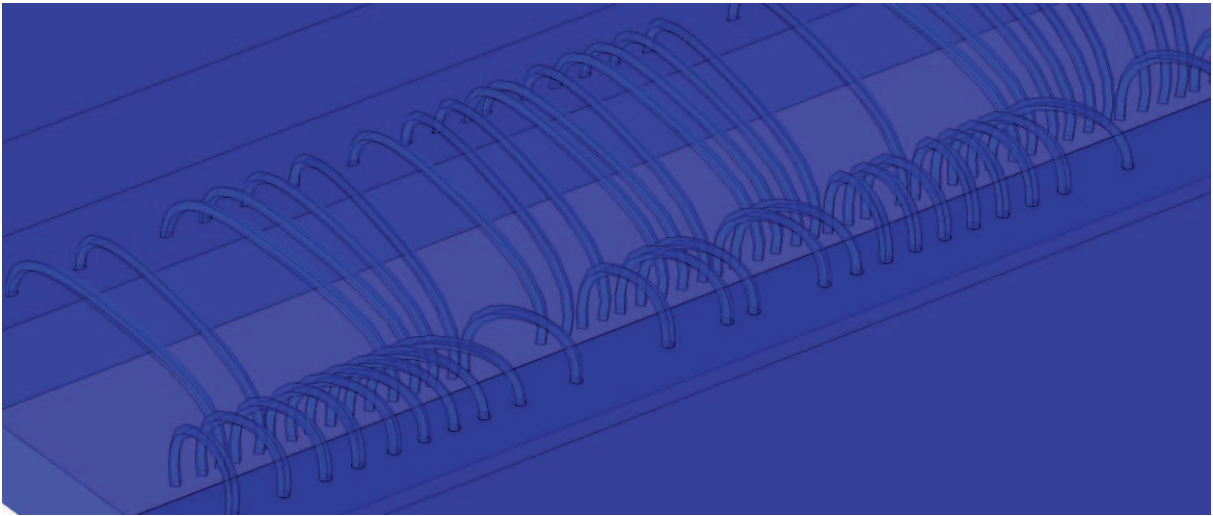
g) Experimento 7 - Velocidade de Transferência média e Temperatura onde a viscosidade é mínima:

Na sétima rodada do experimento, foi utilizada a velocidade média com a temperatura onde a viscosidade do fluido é mínima.

O resultado médio desta rodada foi de 4,21%, o que não representa riscos de falha devido ao *wire sweep*. Conforme pode ser observado na Figura 24, o resultado apresenta fios pouco distorcidos, sem curto-circuito ou deformação acentuada.

Esses parâmetros apresentam uma boa relação entre capacidade e desempenho do processo, pois a razão de *wire sweep* não gera riscos ao produto e o tempo de processamento é aceitável (tempo de injeção aproximado de 10 s). Os fios permanecem muito próximos a posição ideal teórica .

Figura 24 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência média e Temperatura onde a viscosidade é mínima.

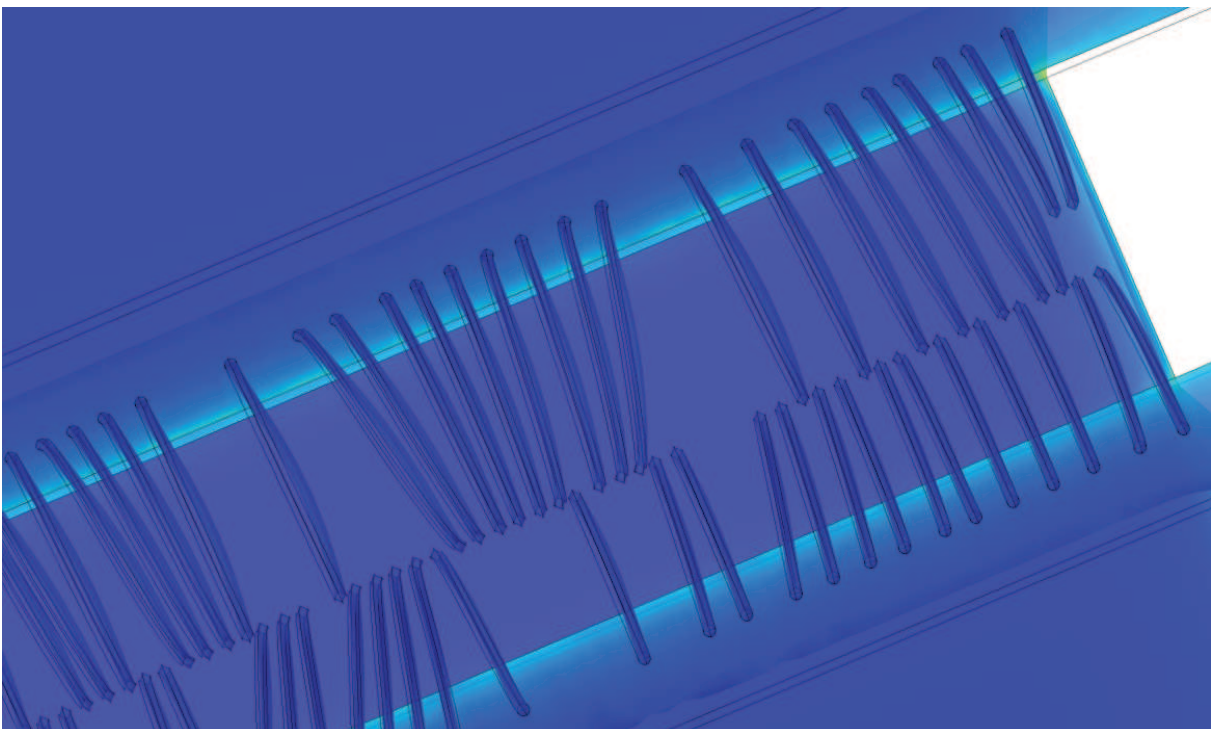


Fonte: Elaborado pelo autor.

h) Experimento 8 - Velocidade de Transferência intermediária e Temperatura onde a viscosidade é média:

Na oitava rodada do experimento, foi utilizada a velocidade média com a temperatura onde a viscosidade do fluido é intermediária.

Figura 25 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência intermediária e Temperatura onde a viscosidade é média.



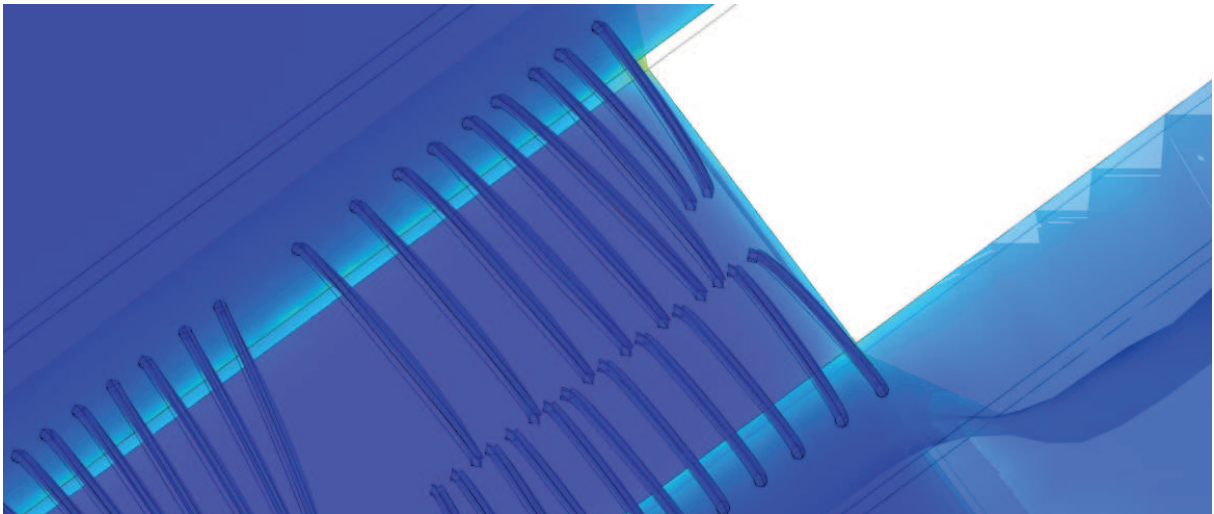
Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado médio desta rodada foi de 5,69%, também não representando riscos ao processo. O resultado pode ser observado na Figura 25.

i) Experimento 9 - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é média:

Na última rodada de simulações, foi utilizada a velocidade de transferência mais baixa com a temperatura onde a viscosidade do fluido é intermediária.

Figura 26 – Resultado da simulação - Velocidade de Transferência mínima e Temperatura onde a viscosidade é média.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado médio desta rodada foi de 3,34%. Pode-se observar a condição dos fios na Figura 26.

4.3 Resultados do Projeto de Experimentos (DOE)

Após completar todas as rodadas da simulação, os valores obtidos foram utilizados para realimentar a análise do projeto de experimentos. Nesta análise, os resultados são compilados de forma a se obter a parcela de contribuição de cada variável, além da contribuição relacionada a interação das variáveis em estudo. A Tabela 5 apresenta a sequência dos experimentos e o resultado obtido em cada um deles.

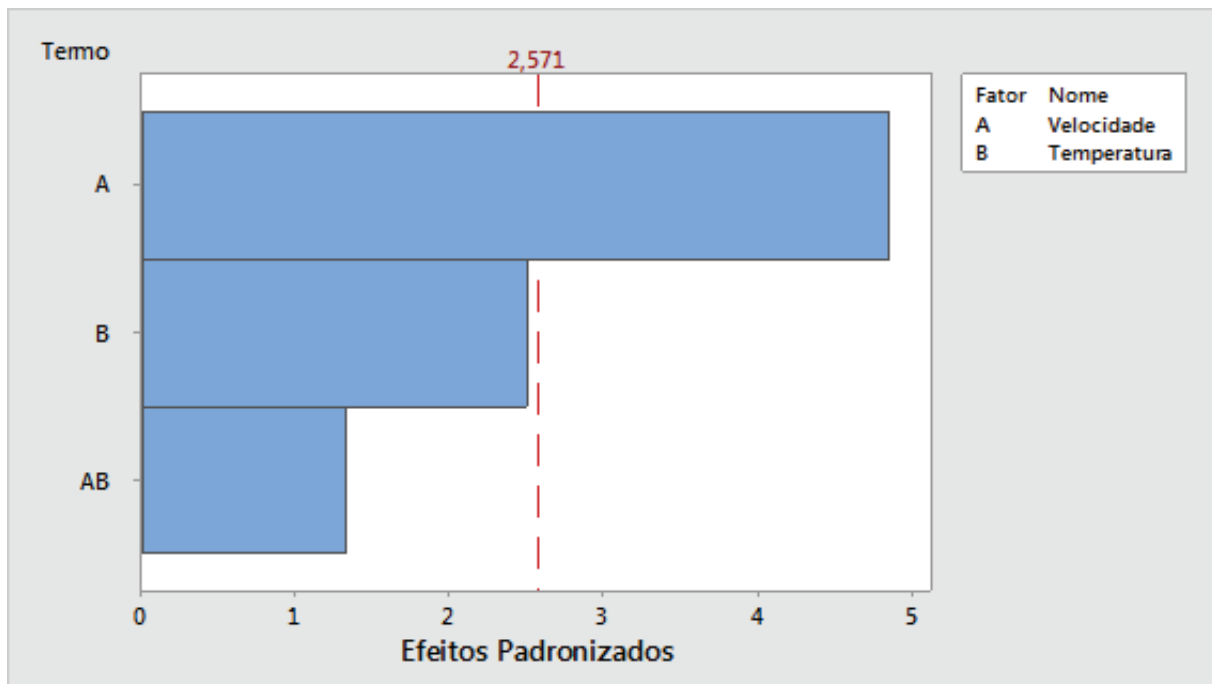
Através do gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, Figura 27 é possível visualizar que a maior contribuição para o *wire sweep* está na variável velocidade de transferência. Em segundo lugar, está a contribuição do fator temperatura. Já o efeito combinado dessas duas variáveis aparece em último lugar, o que indica que a correlação desses dois fatores para o aparecimento do fenômeno de *wire sweep* é baixa.

Com essa análise pode-se concluir que a variação da velocidade de transferência é o principal fator para ocasionar o arraste de fios de solda, no escopo deste estudo.

Tabela 5 – Projeto de experimentos.

Corridas	Ordem	Velocidade de transferência	Temperatura	Razão de <i>wire sweep</i>
1	1	-1	-1	0,28%
3	2	1	-1	12,36%
9	3	1	1	29,67%
8	4	0	1	7,85%
7	5	-1	1	5,90%
6	6	1	0	18,15%
2	7	0	-1	4,21%
5	8	0	0	5,69%
4	9	-1	0	3,34%

Figura 27 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.

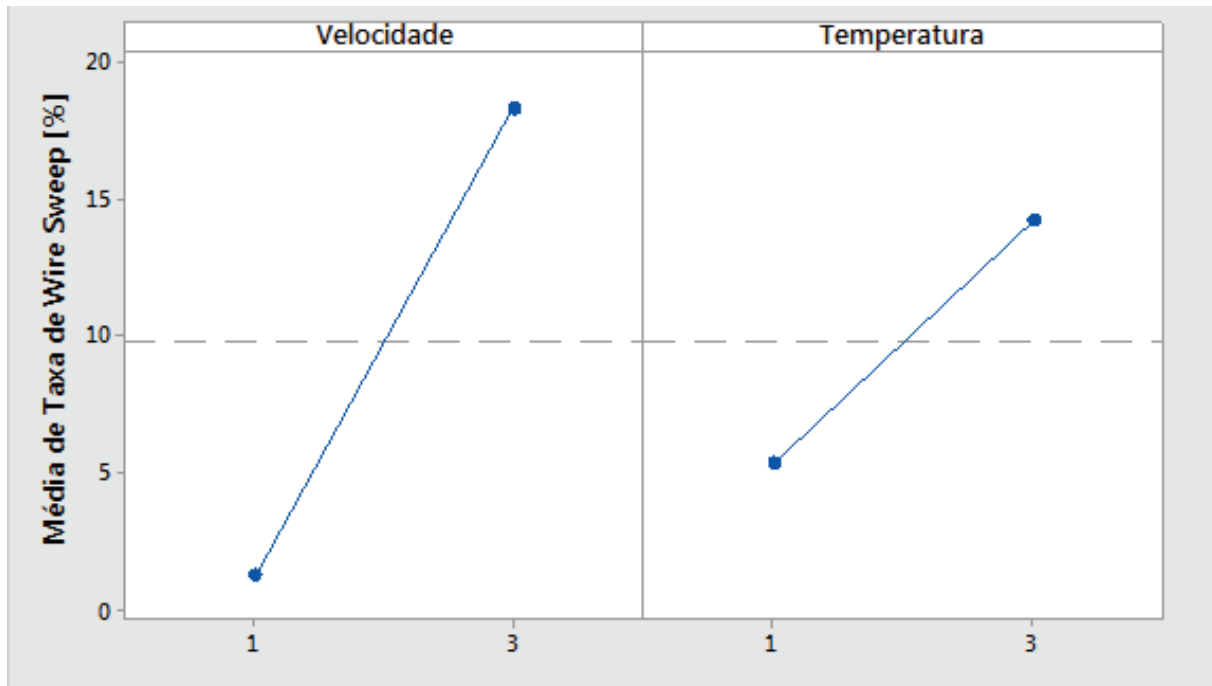


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 28 podem ser visualizadas as contribuições de cada variável para o aparecimento de *wire sweep*. Analisando o gráfico de efeitos principais para razão de *wire sweep* é fácil de visualizar que a inclinação da reta da velocidade é muito maior que o coeficiente da temperatura, ou seja, a velocidade possui um maior impacto no arraste dos fios de solda.

Enquanto a temperatura contribui com aproximadamente 10% da variação do *wire sweep*, considerando os extremos, a alteração na velocidade de transferência nos valores mínimo e máximo propostos nesse estudo implica em quase 20% de variação na taxa de *wire sweep*.

Figura 28 – Gráfico de Efeitos Principais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados experimentais é possível obter uma equação da taxa de *wire sweep*:

$$Wire_{sweep}[\%] = -4,6 + 2,78 * V - 1,33 * T + 2,86 * V * T \quad (2)$$

Onde V é a velocidade de transferência e T é a temperatura.

Com essa equação é possível calcular a taxa de *wire sweep* para o modelo simulado, inserindo valores de temperatura e velocidade dentro dos limites utilizados.

5 CONCLUSÃO

De acordo com o trabalho realizado, pode-se concluir que o modelo simulado atende o objetivo proposto, ou seja, de ser uma alternativa a predição do modo de falha *wire sweep*, com custo computacional relativamente baixo e precisão adequada.

Com este modelo foi possível avaliar os dois principais fatores que causam o arraste dos fios durante o processo de moldagem por transferência, que são a velocidade de transferência do composto epóxi e a viscosidade do fluido. Ao longo das simulações realizadas os resultados foram coerentes com a teoria, ou seja, alterando os parâmetros para uma situação mais suscetível ao fenômeno de *wire sweep* se observava o agravamento do mesmo.

Durante o desenho da geometria se fez necessário observar uma série de detalhes, para que o modelo simulado trouxesse respostas o mais próximo possível da realidade. Para que a malha fosse gerada com sucesso, os fios devem ser o mais perpendicular possível em relação aos *pads* que estão conectados. O refinamento da malha nas regiões de interesse também é fundamental para redução do custo computacional e precisão nos resultados. Utilizando elementos menores na área da interação entre fluido e estrutura e elementos maiores no resto do modelo, se obteve um expressivo ganho de tempo, reduzindo a simulação de 7 para 3 horas.

Na análise do projeto de experimentos ficou evidente que, entre os parâmetros avaliados, a velocidade de transferência é o que mais impacta no *wire sweep*, seguida da temperatura durante a injeção. Esses parâmetros possuem influência um sobre o outro, porém sem maior impacto do que as contribuições individuais.

Durante a validação do modelo, comparando a simulação com peças produzidas nas condições simuladas, observou-se que todos os resultados da simulação ficaram dentro do intervalo da média com um desvio padrão para menos ou para mais das peças medidas. Nas amostras produzidas sob duas condições simuladas, o erro máximo ficou em 15,26%.

5.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho foram observadas oportunidades para melhoria ou continuidade do mesmo:

- Avaliação dos parâmetros e especificação de processos anteriores ao molde na predição do *wire sweep*, como espessura do *die* ou altura do *loop* no processo de soldagem de fios.
- Realização de simulação de transiente, considerando a reologia do composto de moldagem no modelo.
- Avaliar parâmetros do material, relacionados a sua composição.

- Ajustar e aplicar o modelo para simulação do processo de moldagem por compressão.

REFERÊNCIAS

- ALI, S. S. S.; HIAN, S. T. S.; ANG, B. C. Wire sweep characterization of multi-tier palladium-copper (Pd-Cu) wire bonding on LQFP package using low alpha green mold compound. 2013. Citado na página 31.
- ANTONY, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 2. ed. [S.l.]: Elsevier Science, 2014. 220 p. ISBN 9780080994192. Citado na página 41.
- ARDEBILI, H.; PECHT, M. *Encapsulation Technologies for Electronic Applications*. Elsevier Science, 2009. (Materials and Processes for Electronic Applications). ISBN 9780815519706. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=RV2vuK6ccjgC>>. Citado 14 vezes nas páginas 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29 e 30.
- CHEN, A.; LO, R. H. Y. *Semiconductor Packaging: Materials Interaction and Reliability*. CRC Press, 2016. ISBN 9781439862070. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=MPDRBQAAQBAJ>>. Citado na página 27.
- GILLES, K. *Area array packaging handbook*. McGraw-Hill, 2002. (McGraw-Hill packaging and electronics books). ISBN 9780071374934. Disponível em: <<https://books.google.com.mx/books?id=CAfTAAAAMAAJ>>. Citado na página 21.
- GOOSEY, M. T. *Plastics for electronics*. Elsevier Applied Science Publishers, 1985. ISBN 9780853343387. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4g9TAAAAMAAJ>>. Citado na página 22.
- GUTIERREZ, R. M. V.; LEAL, C. F. C. ESTRATÉGIAS PARA UMA INDÚSTRIA DE CIRCUITOS INTEGRADOS NO BRASIL. 2004. Citado na página 15.
- HAN, J. et al. Effects of package and mold cavity structures on the wire sweep behavior during package array transfer molding. In: *2011 IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2011*. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 9781457719837. Citado na página 32.
- HAN, J. et al. Wire Sweep Study for SOT Package Array Matrix Molding with Simulation and Experimental Analysis. 2011. Citado na página 32.
- HAN, S.-J.; HUH, Y.-J. A Study of Wire Sweep During Encapsulation of Semiconductor Chips. *Journal of the Microelectronics & Packaging Society*, v. 7, p. 17–22, 2000. Citado na página 32.
- INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS (ITRS). Assembly And Packaging RoadMap. 2011. Citado na página 15.
- KHOR, C. Y.; ABDULLAH, M. Z. Optimization of IC encapsulation considering fluid/structure interaction using response surface methodology. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 29, p. 109–122, 2012. Citado na página 32.
- KHOR, C. Y. et al. *Recent fluid-structure interaction modeling challenges in IC encapsulation - A review*. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 30.
- LU, D.; WONG, C. *Materials for Advanced Packaging*. 1st. ed. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. ISBN 0387782184, 9780387782188. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

- MAYS, L. L.; HUBENKO, A. An Evaluation of Thermoplastic Materials and Injection Molding as a Discrete Power Semiconductor Packaging Alternative. *International Microelectronics And Packaging Society Intl. Journal of Microcircuits and Electronic Packaging The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging First Quarter*, v. 21, n. 1, 1998. Citado na página 24.
- MIURA, M. Compression Molding solutions for various high end package and cost savings for standard package applications. In: *2016 International Conference on Electronics Packaging, ICEP 2016*. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 9784904090176. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- NGUYEN, L. T. Wire Bond Behavior During Molding Operations. 1988. ISSN 00323888. Citado na página 28.
- NGUYEN, L. T.; LIM, F. J. Wire Sweep During Molding of Integrated Circuits. 1990. Citado na página 16.
- RAMDAN, D. et al. FSI simulation of wire sweep PBGA encapsulation process considering rheology effect. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012. ISSN 21563950. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 33.
- RAMDAN, D. et al. Fluid Structure Interaction Numerical Simulation of Wiresweep in Electronics Packaging. *TELKOMNIKA*, v. 14, n. 1, 2016. Citado na página 33.
- SANDGREN, G.; ROTH, L. Wire Encapsulation. v. 27, n. 11, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 7, 8 e 16.
- STEIN, E.; BORST, R. de; HUGHES, T. *Encyclopedia of computational mechanics*. [S.l.]: John Wiley, 2004. 672 p. ISBN 9780470846995. Citado na página 31.
- SUBRAMANIAN, N. R. et al. Improving predictability of wire-sweep in cavity filling analysis. In: *2011 IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference, EPTC 2011*. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 9781457719837. Citado na página 33.
- TANAKA, A. et al. Flow Analysis of Semiconductor Encapsulating Material. 1994. Citado na página 33.
- TAY, A. A. O.; LEE, W. H. Transient Three Dimensional Simulation of Mold Filling and Wire Sweep in an Overmold BGA Package. *Electronic Components and Technology Conference*, 2002. Citado na página 33.
- TONG, K. W.; KWONG, C. K.; IP, K. W. Optimization of process conditions for the transfer molding of electronic packages. In: *Journal of Materials Processing Technology*. [S.l.: s.n.], 2003. ISSN 09240136. Citado na página 34.
- TUMMALA, R. *Fundamentals of Microsystems Packaging*. McGraw-Hill Education, 2001. ISBN 9780071418072. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VHXoAwAAQBAJ>>. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 22, 23 e 28.
- TUMMALA, R.; RYMASZEWSKI, E. J.; KLOPFENSTEIN, A. G. *Microelectronics Packaging Handbook: Semiconductor Packaging*. Springer US, 1997. (Microelectronics Packaging Handbook). ISBN 9780412084416. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xjPyN9GD9EkC>>. Citado 6 vezes nas páginas 19, 21, 26, 27, 28 e 29.

WU, J. H. et al. A three-dimensional modeling of wire sweep incorporating resin cure. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part B*, 1998. ISSN 10709894. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 34.