

Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Caracterização do “warpage” e sua variabilidade no processo produtivo de encapsulamento de circuitos integrados

Tese de Mestrado

Desenvolvida no âmbito do Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Nuno André Rodrigues Diogo Peixoto

Nanium, S.A.

Departamento de Física

Orientadores no ISEP: Doutor Paulo Fernandes e Doutor Cristiano Abreu

Orientador na empresa: Engenheiro Vitor Chatinho

Outubro de 2014

Agradecimentos

Aos orientadores Doutor Paulo Fernandes e Doutor Cristiano Abreu, agradeço a disponibilidade, na orientação e na transmissão de conhecimentos durante a realização da dissertação.

Ao Engenheiro Vitor Chatinho, pelo acompanhamento do trabalho na empresa assim como ao Engenheiro Domingos Pinto e Engenheiro Nuno Vieira, formadores da Metodologia Taguchi, pelo apoio na resolução dos diversos problemas.

Aos membros da equipa do projeto, nomeadamente a Engenheira Marta Santos e o Engenheiro Rui Fernandes que contribuíram para a realização da dissertação.

Agradeço especialmente há minha família pela compreensão, pela paciência e pelo suporte manifestados durante este período de tempo.

Resumo

Nos últimos anos a indústria de semicondutores, nomeadamente a produção de memórias, tem sofrido uma grande evolução.

A necessidade de baixar custos de produção, assim como de produzir sistemas mais complexos e com maior capacidade, levou à criação da tecnologia WLP (*Wafer Level Packaging*).

Esta tecnologia permite a produção de sistemas mais pequenos, simplificar o fluxo do processo e providenciar uma redução significativa do custo final do produto.

A WLP é uma tecnologia de encapsulamento de circuitos integrados quando ainda fazem parte de *wafers* (bolachas de silício), em contraste com o método tradicional em que os sistemas são individualizados previamente antes de serem encapsulados.

Com o desenvolvimento desta tecnologia, surgiu a necessidade de melhor compreender o comportamento mecânico do *mold compound* (MC - polímero encapsulante) mais especificamente do *warpage* (empeno) de *wafers* moldadas.

O *warpage* é uma característica deste produto e deve-se à diferença do coeficiente de expansão térmica entre o silício e o *mold compound*. Este problema é observável no produto através do arqueamento das *wafers* moldadas.

O *warpage* de *wafers* moldadas tem grande impacto na manufatura. Dependendo da quantidade e orientação do *warpage*, o transporte, manipulação, bem como, a processamento das *wafers* podem tornar-se complicados ou mesmo impossíveis, o que se traduz numa redução de volume de produção e diminuição da qualidade do produto.

Esta dissertação foi desenvolvida na Nanium S.A., empresa portuguesa líder mundial na tecnologia de WLP em *wafers* de 300mm e aborda a utilização da metodologia Taguchi, no estudo da variabilidade do processo de *debond* para o produto X. A escolha do processo e produto baseou-se numa análise estatística da variação e do impacto do *warpage* ao longo do processo produtivo. A metodologia Taguchi é uma metodologia de controlo de qualidade e permite uma aproximação sistemática num dado processo, combinando gráficos de controlo, controlo do processo/produto, e desenho do processo para alcançar um processo robusto. Os resultados deste método e a sua correta implementação permitem obter poupanças significativas nos processos com um impacto financeiro significativo.

A realização deste projeto permitiu estudar e quantificar o *warpage* ao longo da linha de produção e minorar o impacto desta característica no processo de *debond*. Este projeto permitiu ainda a discussão e o alinhamento entre as diferentes áreas de produção no que toca

ao controlo e a melhoria de processos. Conseguiu-se demonstrar que o método Taguchi é um método eficiente no que toca ao estudo da variabilidade de um processo e otimização de parâmetros. A sua aplicação ao processo de *debond* permitiu melhorar ou a fiabilidade do processo em termos de garantia da qualidade do produto, como ao nível do aumento de produção.

Palavras-chave (Tema): WLP, *Warpage*, *Mold Compound*, Taguchi, *debond*

Abstract

In the last years semiconductor industry, including memories production, made great developments. The need to reduce production costs, as well as to produce more complex and products with more capacity, led to the creation of WLP (*Wafer Level Packaging*) technology. This technology enables the production of smaller systems, simplifies the production flow and provides a cost reduction of the final product.

WLP is a packaging technology for integrated circuits in silicon *wafers* in contrast with traditional methods in which the systems were individualized after *mold* process. With this development a better understanding of the mechanical behavior of MC (encapsulation polymer), more specifically the *warpage* of molded *wafers*, is needed.

The *warpage* is a characteristic of this type of products and it is created due to the coefficient of thermal expansion mismatch between *mold compound* and *silicon*. The *warpage* of molded *wafers* could cause big manufacturing problems. Depending on the amount and direction of the *warpage*, the handling and production processes could be difficult. These issues could bring a reduction in quality of manufacturing products and production decrease.

This thesis applies the Taguchi methodology, in the study of the variability of *debond* process to produce the product X. The choice of this product and process was based on the statistical study of *warpage* phenomenon during the production line. Taguchi's methodology is related to quality control and allows the systematic approach of a process, combining control charts, process control, products and process design in order to achieve a robust process. The results of this method and its correct implementation, allows significant savings in production processes with therefore an important financial impact.

Since 2010, Nanium S.A., has been a leading Portuguese company in the 300 mm WLP technology. This work was carried out in Nanium S.A. under the master's degree of Engineering in Instrumentation and Metrology.

The aim of this work is to better understand *warpage* during the production line and improve the processes that have problems to work with this characteristic.

This project also enables the discussion and the alignment between production areas in terms of production process development and control. The project team as also successful on improvement of the *debond* process reliability.

Índice

Índice	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas	xi
Glossário.....	xii
1 Introdução.....	1
1.1 Apresentação da Empresa	1
1.2 Enquadramento e Apresentação do Projeto	3
1.3 Contributos do Trabalho.....	4
1.4 Organização da Tese	4
2 Estado da Arte.....	6
2.1 O processo de eWLB.....	6
2.1.1 Fluxo produtivo.....	6
2.1.2 Materiais	9
2.1.3 O processo de <i>debond</i>	10
2.1.3.1 Variáveis críticas e controlo do processo de <i>debond</i>	12
2.2 Warpagem em eWLB	14
2.2.1 Definição de <i>warpagem</i>	14
2.2.2 Causas para o <i>warpagem</i>	17
2.2.3 Alteração do <i>warpagem</i> ao longo do processo produtivo.....	19
2.2.4 Método de medição.....	20
2.3 A metodologia Taguchi.....	24
2.3.1 Introdução ao método Taguchi.....	25
2.3.1.1 Perspetiva histórica	25
2.3.1.2 Planeamento de experiências	26
2.3.1.3 Perspetiva da qualidade	27
2.3.2 Etapas do método Taguchi.....	28
2.3.2.1 Definição da experiência	29

2.3.2.2	Matrizes ortogonais.....	30
2.3.2.3	Definição de fatores	31
2.3.2.4	Definição de interações	32
2.3.2.5	Graus de liberdade	33
2.3.2.6	Escolha da matriz.....	34
2.3.2.7	Alocação de fatores e interações à matriz ortogonal	34
2.3.2.8	Fatores de ruído	35
3	Descrição Técnica e Discussão dos Resultados	36
3.1	Definição da experiência	36
3.1.1	Análise estatística	36
3.1.2	Definição da equipa e objetivo	43
3.1.3	Validação da capacidade do método de medida	44
3.1.4	Classificação do tipo de resposta.....	46
3.1.5	Identificação e escolha dos fatores, níveis e interações	46
3.1.6	Escolha da matriz OA.....	47
3.2	Realização da experiência	49
3.3	Resultados obtidos.....	51
3.3.1	Resultados do <i>warpage</i> no DOE	51
3.3.2	Tratamento estatístico dos resultados.....	53
3.3.3	Resultados de <i>warpage</i> em todo o processo	55
4	Conclusões	57
5	Avaliação do trabalho realizado.....	58
5.1	Objetivos realizados.....	58
5.2	Limitações e Trabalho Futuro	58
	Referências	59
Anexo 1	Fluxograma do processo RDL (Recon).....	61
Anexo 2	<i>Matrizes Ortogonais - Orthogonal Arrays (OA)</i>	62
Anexo 3	Diagrama Ishikawa	63
Anexo 4	Exemplo da alocação dos fatores à matriz	64

Anexo 5	Matriz ortogonal e gráficos lineares	65
Anexo 6	Procedimento de medição do <i>Warpagem</i>	66
Anexo 7	Procedimento dos estudos de GR e GR&R.....	67
Anexo 8	Conversão da matriz ortogonal associando os fatores, interações e níveis....	68

Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Percurso da Nanium S.A. [1].</i>	1
<i>Figura 2 - Layout da Nanium S.A [1].</i>	2
<i>Figura 3 - Visualização das principais áreas da Nanium S.A [1].</i>	3
<i>Figura 4 - Exemplo do processo de mold [1].</i>	7
<i>Figura 5 - Esquema do processo RDL (Redistribution layer) [1].</i>	7
<i>Figura 6 - Wafer reconstruída após o processo de colocação das bolas (ball attach) [1].</i>	8
<i>Figura 7 - Esquema de um corte transversal da tecnologia eWLB e dois exemplos de chips de memória [4].</i>	9
<i>Figura 8 - Vista panorâmica do interior do equipamento de debond e identificação dos principais componentes [2].</i>	12
<i>Figura 9 - Imagem de uma wafer com warpage após debond.</i>	14
<i>Figura 10 - Esquema de medição do bow numa wafer [6].</i>	14
<i>Figura 11 - Esquema de medição do warp numa wafer [6].</i>	15
<i>Figura 12 - Convenção de sinal do warpage de wafers [7].</i>	16
<i>Figura 13 - Cálculo do sinal do warpage de um package [7].</i>	16
<i>Figura 14 - Esquema de uma wafer eWLB com warpage [2].</i>	17
<i>Figura 15 - Representação gráfica da dependência do volume específico com a taxa de arrefecimento [2].</i>	18
<i>Figura 16 - Representação gráfica do comportamento do warpage e a influência da ocupação de silício numa wafer de mold compound [2].</i>	19
<i>Figura 17 - Representação do comportamento do warpage ao longo do fluxo produtivo. A parte ativa da wafer está voltada para cima [2].</i>	20
<i>Figura 18 - Esquema da técnica de reflexão laser e intensidade laser no sensor [8].</i>	21
<i>Figura 19 - Representação 3D do warpage (μm) de uma wafer reconstruída [10].</i>	22
<i>Figura 20 - Configuração do equipamento Nanofocus μscan [10].</i>	23
<i>Figura 21 - Equipamento Nanofocus μscan preparado para medição de warpage em wafers de MC. ...</i>	24
<i>Figura 22 - Esquema do mapa de um processo [12].</i>	26
<i>Figura 23 - Fluxograma de etapas do método Taguchi [15].</i>	29
<i>Figura 24 - Exemplo de diagrama causa-efeito (Ishikawa) [16].</i>	32

<i>Figura 25 - Fluxo de processo eWLB com os processos de medição do warpagem. A rosa estão indicados os processos de controlo do warpagem usando o equipamento Nanofocus.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 26 - Gráfico da distribuição global média do warpagem.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 27 - Gráfico do warpagem médio por produto</i>	<i>40</i>
<i>Figura 28 - Gráfico do warpagem médio por processo de inspeção. A vermelho estão identificados os steps medidos no Nanofocus</i>	<i>40</i>
<i>Figura 29 - Gráficos representando o número de wafers partidas por processo.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 30 - Gráficos representando o número de wafers partidas por produto.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31 - Valor do warpagem por processo e produto.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 32 - Gráficos com os resultados do estudo GR e GR&R no processo de debond.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 33 - Exemplo da associação de fatores e interações a uma matriz ortogonal [13].</i>	<i>48</i>
<i>Figura 34 - Gráfico linear associado (esquerda); Gráfico pretendido (direita).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 35 - Cabeçalho do SWR usado na realização da experiência.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 36 - Fotografia de uma wafer reconstruída com dies BS (Blank Silica).</i>	<i>50</i>
<i>Figura 37 - Valor do warpagem e processamento após debond e formato da wafer.</i>	<i>52</i>
<i>O valor do slot corresponde à posição da wafer no transportador de 25 wafers. As wafers encontram-se em slots pares para evitar problemas de manuseamento no equipamento. Ex: wafer 1 (slot 2), Wafer 2 (slot 4), etc.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 38 - Análise das médias da experiência realizada.</i>	<i>53</i>
• <i>Temperatura de post mold cure: 130 °C.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 39 - Análise das médias e cálculo do valor esperado.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 40 - Valores de warpagem ao longo de todo o processo produtivo.</i>	<i>56</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Critérios de aceitação padrão (Standard acceptability criteria) dos estudos GR e GR&R [17]</i>	44
<i>Tabela 2 - Resultado dos estudos de capacidade realizados no equipamento Nanofocus e na debonder</i>	46
<i>Tabela 3 - Resumo dos fatores e níveis escolhidos para a realização da experiência</i>	47
<i>Tabela 4 - Associação dos fatores e interações à matriz L8</i>	49
<i>Tabela 5 - Associação dos fatores e interações à matriz L8.</i>	50
<i>Tabela 6 - Parâmetros do processo de mold e do mold compound</i>	51
<i>Tabela 7 - Resultados de warpagem obtidos no DOE (design of experiments).....</i>	52

Glossário

T _g	Temperatura de transição vítrea
G _L	Graus de liberdade
WLP	Wafer-level Packaging
MC	Mold Compound
LMC	Liquid Mold Compound
CTE	Coefficient of thermal expansion
eWLB	Embedded Wafer Level Ball Grid Array
SIP	System in Package
JEDEC	Joint Electron Device Engineering Council standard
FOWLP	Fan-out Wafer Level Package
FOUP	Front Opening Unified Pod
WBS	Wafers Blank Silica
DoE	Design of experiments
SPC	Software process control
OA	Orthogonal array
GR&R	Gage repeatability and reproducibility
ANOVA	Analysis of variance
PMC	Post Mold Cure
CC1	Cool chuck 1
SWR	Special Work Request
RDL	Redistribution layer

1 Introdução

1.1 Apresentação da Empresa

A Nanium S.A. é uma empresa independente no mercado de semicondutores que fornece serviços de engenharia e montagem de WLP (*Wafer level Packaging*), montagem, assemblagem e teste de circuitos integrados.

Tendo em conta os 18 anos de experiência no negócio de semicondutores (começou como Siemens, em 1996), a Nanium S.A. possui uma equipa altamente qualificada e instalações e equipamentos de vanguarda. Na figura abaixo, é possível analisar o percurso da empresa desde 1996.



Figura 1 - Percurso da Nanium S.A. [1].

É também uma empresa líder na tecnologia eWLB (*Embedded Wafer Level Ball Grid Array*), uma tecnologia de *packaging* (encapsulamento) que permite SIP (*system in package*) flexíveis e soluções heterogéneas integradas de *packaging*. Ou seja, é possível adicionar *chips* de várias tipos e dimensões produzindo unidades mais complexas e produtos mais versáteis.

A superior capacidade elétrica e térmica da tecnologia eWLB deve-se à maior exatidão das ligações, assim como à redução de camadas de materiais, especialmente recomendada pelas aplicações de alta frequência, que tem associadas maiores valores de impedância.

A grande capacidade instalada, já permitiu a produção de 300 milhões de componentes, atingindo os padrões de qualidade exigidos pela JEDEC.

A Nanium S.A. possui uma fábrica de produção em Vila do Conde, perto do Porto, Portugal. O planeamento e construção das instalações foram suportados pela equipa de engenharia, de

acordo com as normas internacionais mais rigorosas e com a tecnologia de salas limpas avançadas.

As instalações produtivas incluem mais de 20,000 m² de sala limpa, sendo monitorizados todos os espaços importantes. O sistema de gestão global do edifício tem mais de 10,000 pontos de monitorização e controlo ambiental.

Na figura seguinte encontra-se uma imagem virtual das instalações da Nanium S.A. A planta baseia-se no conceito borboleta: os dois módulos de produção estão unidos pelo edifício de suporte.

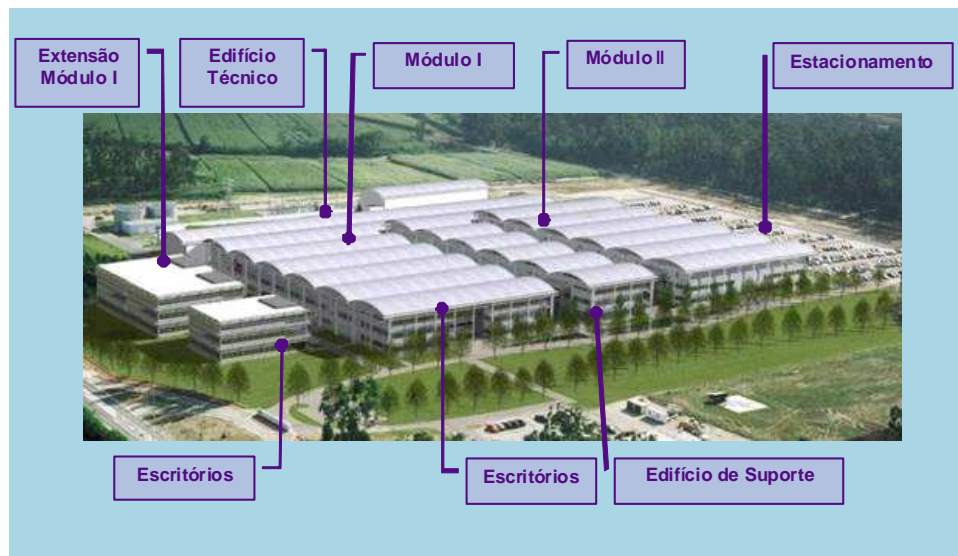


Figura 2 - Layout da Nanium S.A [1].

As áreas funcionais da empresa (figura 3) dividem-se da seguinte forma:

- *Labs e Product Engineering*, onde são feitas as análises detalhadas ao produto usando equipamentos para caracterização de materiais;
- *WLP (Wafer Level Packaging) e RDL (Redistribution layer)*, onde é feito o desenvolvimento do produto, composta pelas principais áreas da linha de produção;
- *Wafer Test*, onde são realizados testes elétricos às *wafers*;
- *Package Assembly*, área de produção e montagem de componentes;

- *Final Test*, onde são realizados os testes finais ao produto: sistemas de inspeção, e teste aos módulos (componente montado numa placa de circuito impresso) e ao produto antes de o colocar em produção (*Burn In test*).

- *Shipping*, área de expedição do material e respetivo acondicionamento.



Figura 3 - Visualização das principais áreas da Nanium S.A [1].

1.2 Enquadramento e Apresentação do Projeto

O arranque da empresa Nanium S.A., apoiou-se no desenvolvimento e implementação de uma nova tecnologia de produção de memórias - WLP. Este tipo de tecnologia permite maximizar custos de produção e criar produtos de elevada complexidade.

No entanto, existem dificuldades que necessitam de ser ultrapassadas, como é o caso do *warpage* (empeno), uma das características mais comuns do fabrico de circuitos integrados que se deve sobretudo à grande diferença entre os coeficientes de expansão térmica da *silício* e do polímero utilizado no encapsulamento do circuito integrado. O *warpage* é designado como sendo um desvio à planeza de uma *wafer* não fixa. Devido aos ciclos térmicos que as *wafers* moldadas sofrem ao longo da linha de produção, esta característica sofre significativas

alterações, tornando muito complicado o manuseamento automático das *wafers* em alguns equipamentos.

É fundamental compreender esta característica do produto, de modo a evitar custos de produção desnecessários.

A Nanium S.A. tem vindo a formar os seus colaboradores na metodologia Taguchi como ferramenta para desenvolver os processos produtivos. O método Taguchi permite olhar para os processos de uma forma mais estruturada, estudando a influência de várias variáveis em simultâneo. Deste modo, é possível obter resultados e conclusões de uma forma mais eficiente e conseqüentemente reduzir os custos de fabrico inerentes à realização de experiências.

O projeto empresarial descrito nesta dissertação enquadra-se no projeto final do mestrado em instrumentação e metrologia do ISEP.

1.3 Contributos do Trabalho

A redução do *warpagem* no processo de *debond* (descolagem da *wafer* de *mold* do transportador metálico) contribuiu significativamente para uma melhoria do processo de *debond* e, por consequência, para um aumento da qualidade do produto X.

Reduzindo a variabilidade, o processo tornou-se mais robusto e mais controlado, permitindo alcançar a excelência operacional e melhorar ainda mais a competitividade da indústria de semicondutores.

Este trabalho também possibilitou uma maior divulgação interna da metodologia Taguchi e conseqüentemente um aumento da sua utilização.

1.4 Organização da Tese

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos. No capítulo 1 é feita uma introdução do trabalho. No capítulo 2, é definida a tecnologia WLP, onde é descrito em detalhe o fluxo produtivo, os materiais usados e o processo de *debond*. Posteriormente, é explicado detalhadamente o problema do *warpagem*, bem como as causas para o seu aparecimento e método de controlo. Por fim, é apresentada a metodologia Taguchi adotada. No capítulo 3,

são apresentados o procedimento experimental, assim como a análise estatística que foi realizada e que permitiu a definição de produto/processo e os cálculos efetuados. No capítulo 4, são demonstrados os resultados obtidos em cada fase do processo. No capítulo 5, são expostas as conclusões do projeto, limitações e sugestões para investigações futuras.

2 Estado da Arte

2.1 O processo de eWLB

2.1.1 Fluxo produtivo

O projeto descrito nesta dissertação foi desenvolvido na área de *Wafer Level Package*. O processo começou a ser desenvolvido no início de 2008, mas só em 2010 foi considerado um processo inovador para o mundo da microeletrónica. Este processo é visto como o futuro dos *chips* (pequenos blocos de silício, também conhecidos como *dies*, no qual um circuito funcional é fabricado), por permitir baixar o custo de produção aumentando o número de ligações sem comprometer a fiabilidade da placa de circuito impresso e por permitir a transição para componentes 3D.

O processo eWLB divide-se em quatro grandes áreas:

1. Reconstrução;
2. Redistribuição;
3. Aplicação das bolas de solda e singularização;
4. Inspeção e expedição.

Na área de reconstrução, o processo inicia-se com o desbaste e *corte* da *wafer* (bolacha de silício, constituída por vários *dies*). Após a obtenção dos *dies*, procede-se às fases de reconstituição da *wafer* num transportador metálico. Esta fase consiste no posicionamento dos *dies* num suporte metálico previamente revestido com adesivo (folha de cola). No final deste processo, todo o conjunto faz uma cura com vista a melhorar a sua adesão e é de seguido moldado. A etapa de *mold* consiste em depositar o *mold compound* (resina polimérica), em estado líquido, na *wafer* reconstruída, através de compressão e vácuo. Apesar de existir uma pré-cura durante esta fase, a cura é concluída posteriormente num forno para onde o conjunto é transferido.

Após arrefecimento do sistema, ocorre o processo de *debond*, onde o adesivo e o suporte metálico são removidos, obtendo-se assim uma *wafer* reconstruída (figura 4), em que os *dies* de silício se encontram embebidos numa matriz de *mold compound* [2].

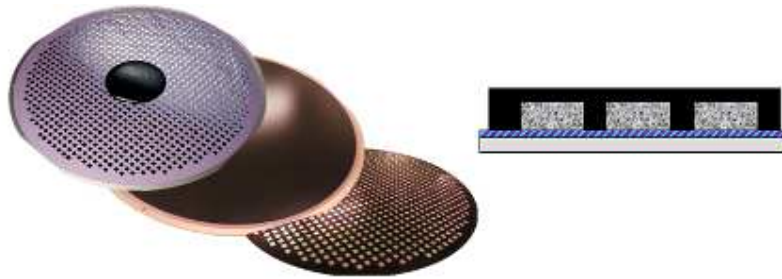


Figura 4 - Exemplo do processo de *mold* [1].

Após estas etapas, entramos na fase de redistribuição de camadas (RDL), que consiste na deposição de várias camadas de material foto-resistente, denominado de dielétrico, que permitem a redistribuição das ligações iniciais do *die* de silício para zonas exteriores, como demonstra a figura 5. Estas novas zonas irão assegurar a ligação às bolas de solda.

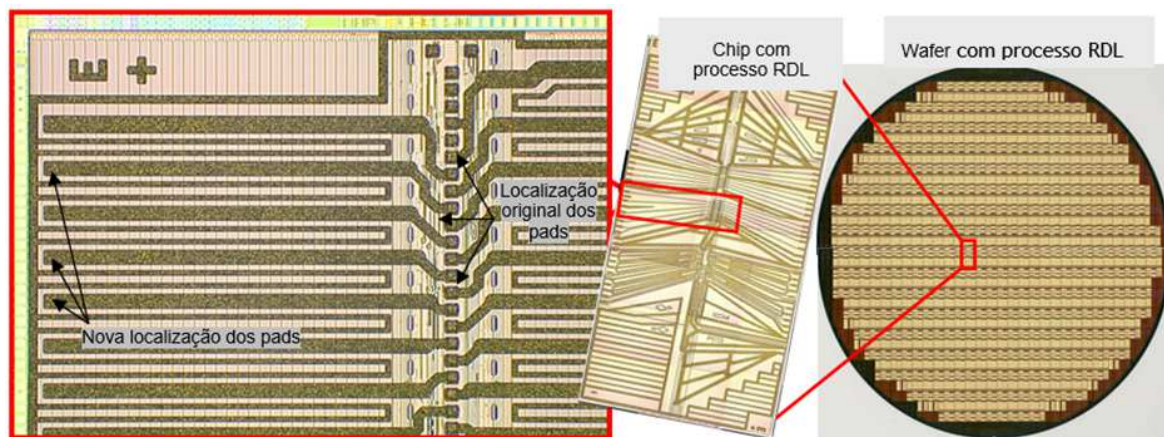


Figura 5 - Esquema do processo RDL (*Redistribution layer*) [1].

Inicialmente, é realizado um processo de cura para retirar humidade da *wafer* reconstruída. Após este processo, a superfície é limpa através de um ataque por plasma (*plasma etching*), de modo a remover possíveis impurezas que podem dificultar a adesão das camadas superiores. A partir deste momento, inicia-se o processo de litografia, que começa com a deposição de material dielétrico e fotosensível, através de um processo de deposição sobre uma *wafer* em rotação (*spin coating*). Posteriormente, esta fina camada é exposta à radiação UV, que alterará as suas propriedades. A configuração das pistas elétricas é obtida graças a

uma máscara alinhada com a *wafer*, que permite expor o dielétrico apenas em áreas bem definidas. Dependendo da polaridade do material, as áreas expostas ou protegidas são removidas posteriormente por um processo de revelação. Nesta fase a *wafer* é submetida a mais um processo de cura, para aumentar a robustez do dielétrico que permanece sobre a *wafer*. Os processos seguintes consistem na deposição de uma camada de crescimento (*seedlayer*), por pulverização catódica e na deposição de cobre por eletrodeposição. A *seedlayer* consiste numa dupla camada de titânio e cobre, que permite tornar a superfície condutora de modo a ser possível a eletrodeposição de cobre. No final, é repetido a primeira etapa de litografia mas desta vez para escavar a zona dos *ball pads*, onde as bolas de solda irão ser soldadas. Toda a área restante encontra-se isolada com o material dielétrico. Posteriormente à cura do material dielétrico, é iniciada a etapa de aplicação das bolas e singularização. Neste processo, são colocadas bolas de solda em zonas específicas do *die* através de uma máscara apropriada (*Stencil*). A elevação da temperatura permite a soldadura da bola de solda ao contato de cobre exposto (figura 6).

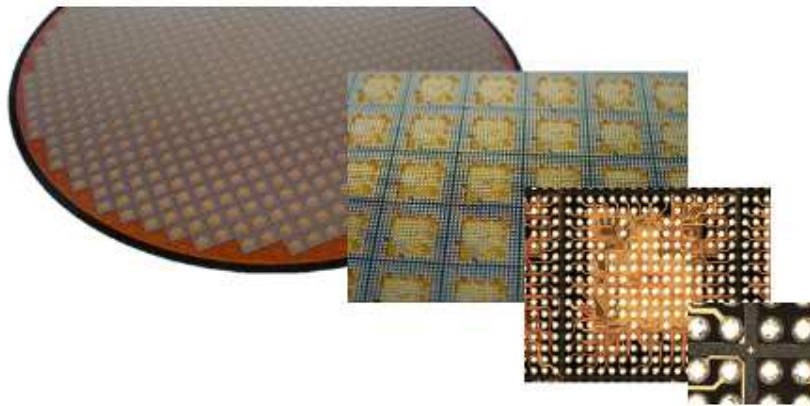


Figura 6 - *Wafer* reconstruída após o processo de colocação das bolas (*ball attach*) [1].

Posteriormente, é realizada a marcação laser na parte de trás do componente (zona do *mold compound*), para identificação do produto, seguida da etapa de singularização, onde os *chips* da *wafer* são individualizados. Trata-se de um processo mecânico de corte usando pequenas lâminas em forma de disco. A *wafer* é colocada numa mesa de corte que serve de suporte durante o processo. No final, os *chips* singularizados são automaticamente colocados em tabuleiros específicos para poderem ser transportados. Por fim, é realizada uma etapa final de inspeção automática de modo a controlar a correta colocação das bolas. São ainda realizados testes para verificação da qualidade do produto, nomeadamente, testes de

verificação da soldadura das bolas. Por último, é realizada o processo de empacotamento e expedição do material.

2.1.2 Materiais

Os *chips* de memória são componentes microeletrónicos muito complexos e compostos por vários materiais: silício, MC (*mold compound*), titânio e cobre, cobre eletrolítico, e materiais fotoresistentes (figura 7). Em seguida, será explicado mais em detalhe a constituição do MC que é, em conjunto com o silício, um dos principais constituintes da *wafer* reconstruída. É devido a diferenças nas características destes dois componentes, que se encontra a origem do empeno do conjunto [3].

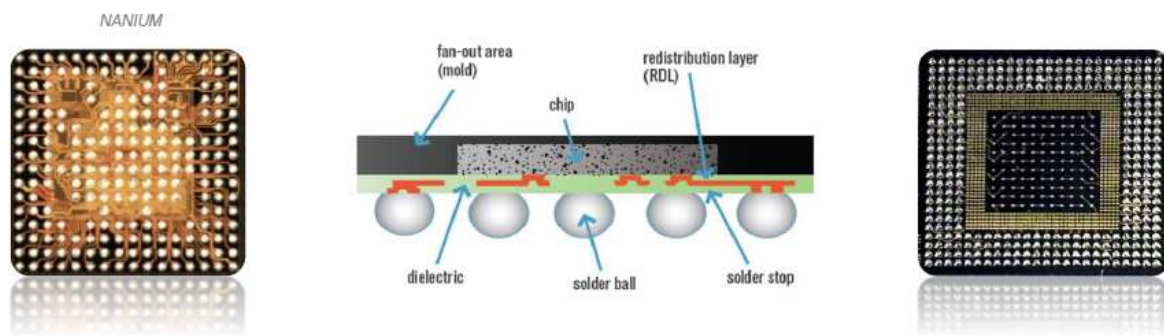


Figura 7 - Esquema de um corte transversal da tecnologia eWLB e dois exemplos de *chips* de memória [4].

No processo de *mold*, o *mold compound* usado, é conhecido como LMC (*liquid mold compound*), tal como o nome indica, é assim designado por estar em estado líquido à temperatura ambiente, ao contrário do processo tradicional de *mold*, onde o *mold compound* era colocado no equipamento ainda em estado sólido.

O LMC tem a finalidade de cobrir os *chips* de silício colocados na matriz, de forma a protegê-los de agressões ambientais e choques mecânicos, assim como permitir o manuseamento de todo o conjunto de modo a poder realizar as etapas seguintes do fluxo produtivo [3].

O LMC é constituído por resina epoxídica (4%), partículas de sílica (89%), endurecedor (5%) e outros aditivos (2%) [5]. Cada um destes constituintes tem uma finalidade e conferem ao LMC as seguintes propriedades:

- As partículas garantem as propriedades básicas, resistência mecânica e a condutividade térmica;
- O catalisador tem por finalidade acelerar o processo de cura;
- A resina epoxídica, conjuntamente com o endurecedor, confere a molhabilidade (capacidade de um líquido manter-se em contato com uma superfície sólida), propriedades mecânicas, elétricas e estabilidade térmica;
- Os aditivos são diversos, abrangendo desde retardadores de chama a agentes colorantes.

Os parâmetros críticos do LMC são: a viscosidade, a temperatura de transição vítrea (T_g), o coeficiente de expansão térmica (CTE), a resistência mecânica, o módulo de elasticidade, a condutividade térmica e elétrica e a absorção de humidade. Estes parâmetros são considerados críticos por motivos distintos. No caso da viscosidade e temperatura de transição vítrea, essas são características essenciais para que o processo de *mold* possa ocorrer sem haver arrastamento dos *dies* ou formação de bolhas de ar dentro do *mold*. A expansão térmica é extremamente crítica para o *warpage* da *wafer*. No que diz respeito à resistência mecânica e módulo de elasticidade, estes têm influência direta na robustez do produto. Valores fora de especificação destas características poderão causar fissuras nos componentes. Os três últimos parâmetros são essenciais para que não haja uma destruição do componente ao nível térmico e elétrico. O componente pode mesmo deixar de funcionar, se atingir determinada temperatura ou resistência elétrica [3].

2.1.3 O processo de *debond*

Dado que o método Taguchi descrito nesta dissertação incide maioritariamente no processo de *debond*, apresenta-se neste sub-capítulo uma descrição mais detalhada do mesmo de forma a proporcionar um melhor enquadramento do projeto. No anexo 1, é possível observar o fluxo produtivo da área de *Recon* (*Reconstitution*) onde o processo de *debond* está inserido. A área de *Recon* é assim designada, por ser a área onde a *wafer* é reconstituída. Nesta área, estão presentes os processos de *mold*, *pick & place* e *debond*.

O processo de *debond* tem como objetivo a separação do suporte metálico da *wafer* moldada. Na figura 8, é possível analisar uma vista panorâmica do interior do equipamento de *debond*.

A etapa inicia-se com a transferência do conjunto suporte metálico moldado mais *wafer*, para um sistema de leitura do suporte. Após a leitura, o número do suporte e a identificação da *wafer* são associados ao lote através de um sistema informático. Este processo servirá para a posterior marcação da *wafer* moldada.

A fase seguinte consiste na etapa de pré-aquecimento numa mesa de vácuo (ponto 3). Posteriormente, o suporte metálico é rodado, ficando a zona do *mold compound* virada para baixo e colocada num prato aquecido. O processo de aquecimento começa pela zona do MC até terminar no suporte metálico. Nesta etapa o suporte metálico é retirado da *wafer* através de um robot e usando vácuo. Posteriormente, a *wafer* é transferida através de uma mesa de ar, para o primeiro prato de arrefecimento (*cooling chuck*), que está a uma temperatura mais baixa (ponto 4). Após passar por um segundo prato de arrefecimento (ponto 5), chega finalmente à zona de marcação (ponto 6). Nesta área, é realizada a marcação laser, do número do lote e código de barras, na parte ativa da *wafer*. Subsequentemente é feita a leitura do código para controlo de qualidade da marcação, sendo as *wafers* colocadas num transportador de 25 *wafers* (ponto 7) [2].

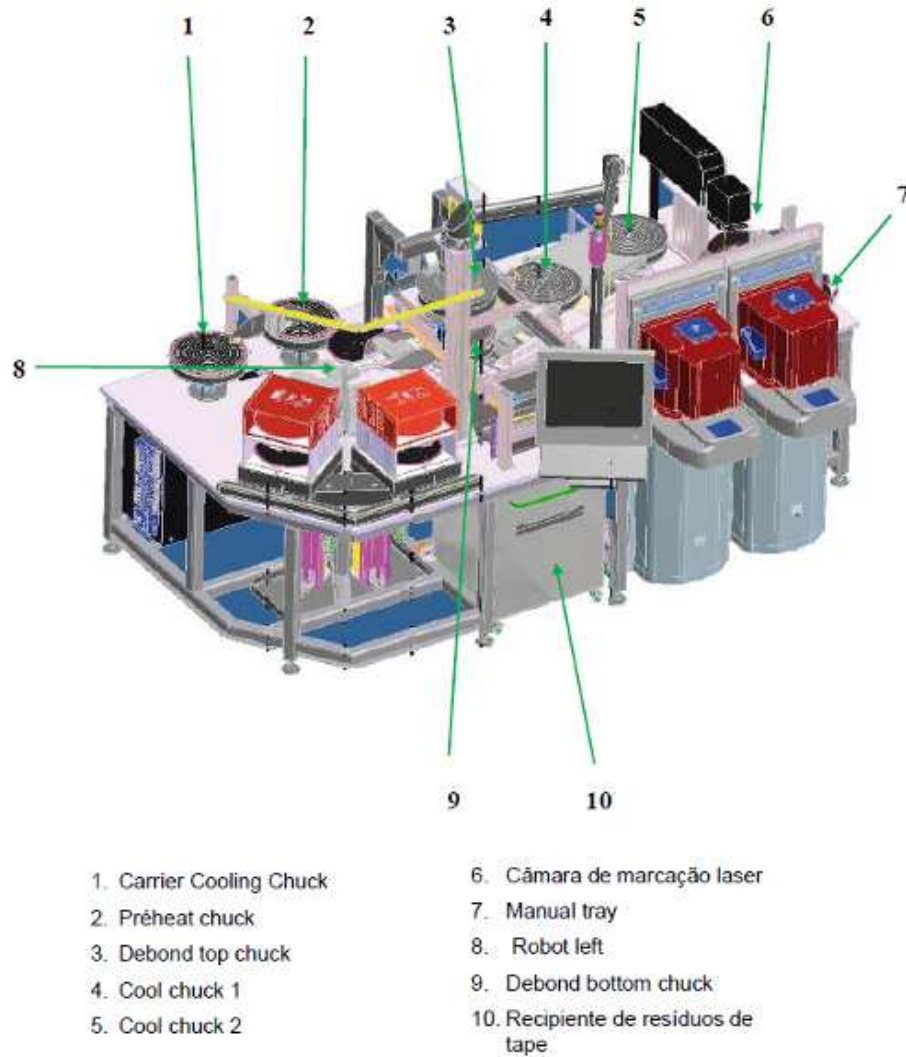


Figura 8 - Vista panorâmica do interior do equipamento de *debond* e identificação dos principais componentes [2].

2.1.3.1 Variáveis críticas e controlo do processo de *debond*

No que diz respeito aos parâmetros de entrada, os mais relevantes são os descritos abaixo:

- Temperatura da *chuck* de pré-aquecimento;
- Duração do pré-aquecimento;
- Temperatura do *top plate*;
- Duração do *top plate* (*tempo de delaminação*);

- Temperatura da *chuck* inferior;
- Duração na *chuck* inferior;
- Temperatura da *chuck* de transferência;
- Temperatura da *cool chuck* 1;
- Duração na *cool chuck* 1;
- Temperatura da *cool chuck* 2;
- Duração na *cool chuck* 2;
- Temperatura da *chuck* de transferência 1;
- Intervalo de tempo entre os processos de *bond* e *debond*;
- Intervalo de tempo entre o processo de *debond* e o processo de inspeção.

No que toca às características críticas do produto, o *warpagem* constitui o maior desafio em termos de controlo de processo. Embora sejam exploradas novas configurações de diagramas de *bond*, existe uma grande dificuldade em processar certos produtos em modo automático. Os diagramas de *bond*, consistem em esquemas com a descrição do número de *dies* e a sua disposição na *wafer* de 300 mm de diâmetro. A configuração do equipamento, relacionado com a transferência de *wafers* em mesas de ar, exige que as *wafers* sejam o mais planas possível de modo a não causar problemas no deslizamento da *wafer*. Esse requisito constitui um foco de preocupação na engenharia de processo.

No processo de *debond*, o valor do *warpagem* é medido com recurso a um feixe laser. O equipamento realiza 6 medições ao longo da *wafer*, sendo que o valor do *warpagem* registado é o valor máximo menos o valor mínimo obtido.

Para além do *warpagem*, são também factores importantes a qualidade da marcação, a análise de resíduos de adesivo e ainda o controlo da colocação dos *dies* na parte de trás da *wafer* (*wafer backside*).

2.2 Warpage em eWLB

2.2.1 Definição de *warpage*

O *warpage* (empeno) de *wafers* é definido como sendo um desvio de forma da planaridade de uma *wafer* não fixa (figura 9).



Figura 9 - Imagem de uma *wafer* com *warpage* após *debond*.

O *warpage* das *wafers* é normalmente caracterizado como *bow* e *warp*, na literatura anglo-saxónica. Segundo a norma ASTM F534 3.1.2., o *bow* é conhecido como o desvio do ponto central de uma superfície média de uma *wafer* não fixa, à superfície média de um plano de referência definido por três pontos igualmente espaçados, num círculo com um diâmetro inferior ao diâmetro nominal da *wafer* (figura 10).

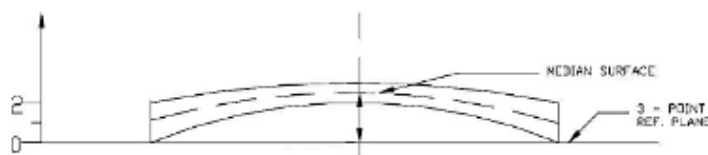


Figura 10 - Esquema de medição do *bow* numa *wafer* [6].

O *warp*, também designado em sentido lato como *warpage*, é definido como a diferença entre o ponto de altura máxima e o ponto mínimo de uma *wafer*, medidos relativamente à superfície média, de uma *wafer* não fixa (figura 11).

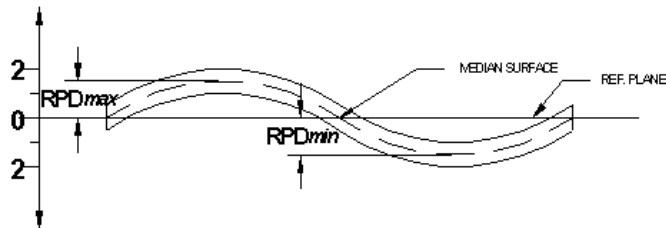


Figura 11 - Esquema de medição do *warp* numa *wafer* [6].

No entanto, o *warp* utiliza a superfície média completa, enquanto no caso do *bow*, só é utilizado o ponto central. Ao analisar toda a superfície da *wafer*, o *warp* fornece uma medição mais representativa e ajustada ao verdadeiro formato da *wafer*. Para a determinação do *warp*, existem duas opções para a construção de um plano de referência. A primeira é a definição de três pontos de referência na extremidade da *wafer*. A segunda, através da realização de um ajuste de mínimos quadrados aos dados do cálculo de uma superfície média adquirida durante o varrimento de uma medição. O *warpage* é então calculado através do desvio máximo do plano de referência (RPDmax) e a diferença mínima do plano de referência (RPDmin). Por este motivo, o sinal do RPDmax é positivo, enquanto o do RPDmin é negativo. Isto é, se considerarmos o RPDmin como ponto de referência, o *warpage* é o valor máximo de altura.

$$Warp = RPDmax - RPDmin$$

Cálculo do valor do *warp* no exemplo da figura 11:

$$Warp = 1,5 - (-1,5) = 3 (\mu m)$$

Analisando a mesma figura, podemos também concluir que o valor do *warp* nos dá mais informação que o valor do *bow*. Neste caso em concreto, enquanto o valor do *warp* seria de 3, o do *bow* seria nulo. O cálculo do valor do *warp* é mais útil, neste caso, e ainda nos fornece informação sobre a irregularidade da superfície.

Dependendo da orientação da curvatura, o *warpage* de *wafers* é também designado por positivo ou negativo, tendo em conta se tem uma forma convexa ou côncava respetivamente (figura 12).

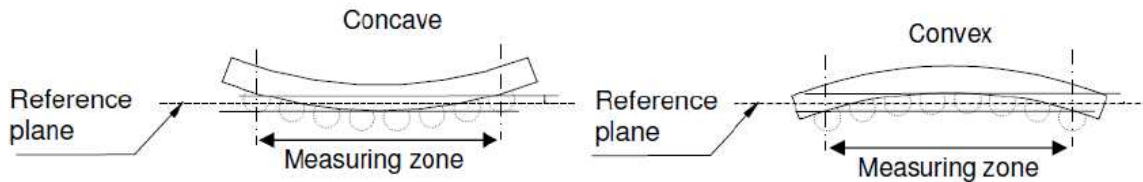


Figura 12 - Convenção de sinal do *warpage* de *wafers* [7].

No entanto, nem todos os empenos adquirem estas duas formas, *i.e.* podem ter comportamento misto, como o exemplo da figura 11. Nestes casos, a norma JEITA ED-7306, define que o sinal do empeno é determinado pela soma da maior deformação positiva e negativa de *packages* BGA (*Ball Grid Array*), medido nas diagonais do mesmo (figura 13). *Ball Grid Array* (BGA) é um modelo de encapsulamento utilizado em circuitos integrados, como por exemplo: *chips*, memórias e microprocessadores. A ligação entre o circuito integrado e a placa é feita por pequenos pontos de solda, que estão em contato com o *chip* de silício, dispensando pinos externos como é o caso de outros *packages*.

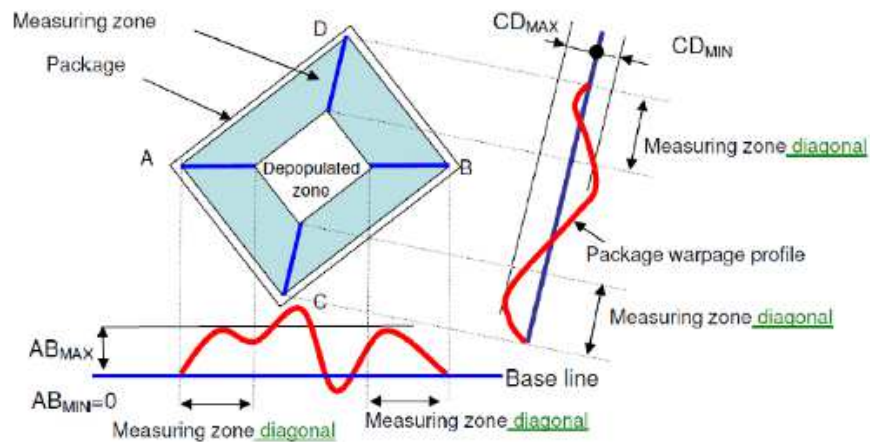


Figura 13 - Cálculo do sinal do *warpage* de um *package* [7].

Sendo assim, o sinal do *warpage* é calculado da seguinte forma:

$$AB_{max} + AB_{min} + CD_{max} + CD_{min}$$

Assim, o AB_{max} é a deformação máxima com sinal positivo, na diagonal AB, e por consequência, AB_{min} a deformação mínima com sinal negativo. O mesmo conceito é aplicado à diagonal DC. A medição da deformação nas diagonais, deve ser realizada numa zona onde haja bolas de solda [7].

2.2.2 Causas para o *warpage*

O *warpage* de *wafers* moldadas é causado pela diferença de CTE entre o *mold compound* e o silício (figura 14). Devido à diferença de CTE, o *mold compound* na parte inferior da *wafer* provoca tensões no conjunto, que pode dar origem a *warpage* negativo ou positivo, dependendo do processo de arrefecimento.

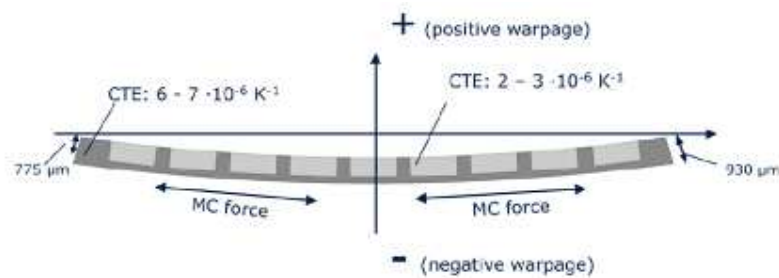


Figura 14 - Esquema de uma *wafer* eWLB com *warpage* [2].

No estudo de polímeros e das suas aplicações, é importante perceber o conceito da temperatura de transição vítrea, T_g . À medida que a temperatura de um polímero desce abaixo de T_g , este comporta-se de uma forma cada vez mais frágil. À medida que a temperatura sobe acima da T_g , o polímero torna-se mais maleável e semelhante a uma borracha. Em geral, os valores de T_g bem abaixo da temperatura ambiente definem o domínio dos elastómeros (borrachas) e valores acima da temperatura ambiente definem polímeros rígidos estruturais.

No que diz respeito às tensões internas da *wafer* de *mold* reconstruída, esta pode ser influenciada pela temperatura dos processos porque o volume específico do polímero depende da taxa de arrefecimento da *wafer*. Acima da temperatura de transição vítrea (T_g), o *mold compound* encontra-se na fase líquida, e após o arrefecimento o material adquire um comportamento frágil.

Se a taxa de arrefecimento for muito brusca, é possível alterar as características do material, resultando num aumento do T_g , bem como do volume específico (figura 15).

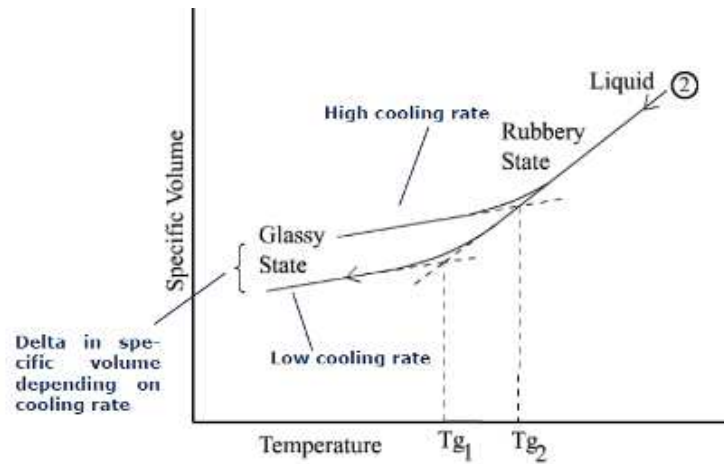


Figura 15 - Representação gráfica da dependência do volume específico com a taxa de arrefecimento [2].

Por este motivo, é possível alterar o *warpage* das *wafers* em *debond*, alterando as taxas de aquecimento e arrefecimento associadas aos processo. Além disso, é possível também alterar o empeno das *wafers* através da proporção de *mold compound* e tamanho dos *chips* de silício dentro da matriz. A figura abaixo, representa o *warpage* de *wafers* eWLB em função da relação vertical entre o *mold* e a espessura de silício, bem como a relação horizontal entre o espaçamento dos *chips* e a dimensão dos *chips*. É possível verificar que há um aumento do *warpage* com o aumento da relação vertical enquanto no sentido horizontal o comportamento é o oposto, *i.e.* aumento do *warpage* com a diminuição da relação horizontal.

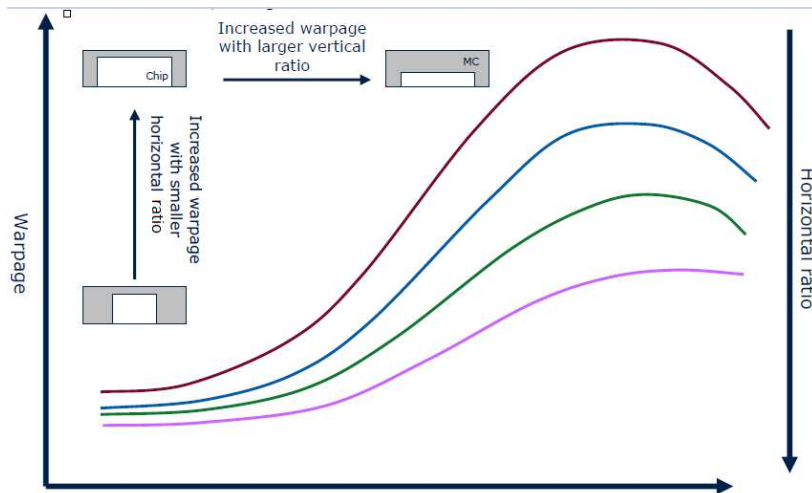


Figura 16 - Representação gráfica do comportamento do warpage e a influência da ocupação de silício numa *wafer* de mold compound [2].

2.2.3 Alteração do *warpage* ao longo do processo produtivo

No fluxo do processo produtivo, o *warpage* é definido pela primeira vez durante a fase de *debond*, em que o suporte metálico é separado da *wafer* de *mold*. Nesta altura, uma camada intermédia é criada devido à ligação do MC com o adesivo na parte de trás da *wafer*. Neste momento, o T_g na parte ativa da *wafer* é ligeiramente superior ao T_g na parte de trás da *wafer*. Devido a uma diferença na taxa de arrefecimento da parte frontal e traseira da *wafer*, existe também uma diferença no volume específico de ambas as partes, o que dá origem ao *warpage* da *wafer*. Este processo de arrefecimento é realizado pelos pratos de arrefecimento presentes no equipamento de *debond*.

Após o processo de desbaste, o *warpage* aumenta tornando-se positivo devido à adição de tensões internas na zona de ligação. O próximo processo consiste no processo de *warpage annealing* (recozimento) num forno em que a temperatura máxima é 185 °C. Esta temperatura permite a pré-cura do MC, acima da T_g , com o objetivo de reduzir as tensões internas do *mold*. Esta diminuição de tensões é conseguida pelo arrefecimento relativamente lento, após se atingir a temperatura máxima. Após este processo, o *warpage* aproxima-se de 1 mm positivo. Nos processos seguintes do fluxo produtivo, são depositados na zona ativa da *wafer*, várias camadas de material fotoresistente, *seed layer* (fina camada de Cu e Ti) e cobre depositado de forma eletrólítica, que restringem a *wafer* e contrariam o *warpage* positivo. O objetivo é que o *warpage* se aproxime de zero depois da cura da última camada de material fotoresistente (figura 17). O *warpage* sofre uma grande variação se, após este processo, for

efetuado um processo de desbaste do MC, como explicado anteriormente. Em todos os casos em que o *warpagem* esteja fora dos limites fixados, é necessário realizar um processo de correção de *warpagem*. Este procedimento consiste no aquecimento do MC até 170 °C, e no arrefecimento com duas mesas de arrefecimento, onde o *warpagem* possa ser reduzido a níveis aceitáveis. No entanto, este procedimento traz uma série de desvantagens relacionadas com o efeito de contração do material.





preceding process step	warpagem/specification limit	pattern
<i>debond</i>	-0.4 mm	
<i>annealing</i>	+0.9 mm	
WPR1 photo resist curing	+0.6 mm	
WPR2 photo resist curing	~ 0.0 mm	

Figura 17 - Representação do comportamento do *warpagem* ao longo do fluxo produtivo. A parte ativa da *wafer* está voltada para cima [2].

2.2.4 Método de medição

Existem várias técnicas de medição do *warpagem* em *wafers*, métodos “*in situ*”, *i.e.* que não necessitam de retirar a *wafer* da linha de produção, como métodos “*ex situ*” que necessitam da remoção do material para análise posterior. As técnicas de medição mais comuns são: sombra de Moiré, reflexão laser e a interferometria de Fizeau. A técnica de sombra de Moiré tem a vantagem de poder ser automatizada e tem a capacidade de poder ser utilizada a temperaturas elevadas. No entanto, é necessário garantir que o espaçamento dos padrões se mantém constante com as temperaturas aplicadas [7,8]. No que diz respeito ao método de reflexão laser, a maior vantagem é da sua simplicidade de utilização e rapidez de medição. Para que possa ser usado de forma eficaz, a superfície a medir tem de permitir a correta reflexão do feixe laser. Relativamente à interferometria de Fizeau, a vantagem principal é a sua elevada estabilidade devido a serem utilizadas pequenas distâncias de separação entre a fibra e o alvo. A desvantagem é a utilização de luz visível, já que requer a utilização de uma amostra com superfície espelhada [9].

A técnica de medição utilizada para a realização do trabalho, foi a técnica de reflexão laser. A metrologia de deslocamento confocal permite o ajuste ótimo da focagem ótica da amostra. Quando a lente foca com exatidão o foco do feixe laser na amostra, o feixe refletido converge precisamente para um dado ponto da lente. Neste ponto, é recebida a intensidade máxima do feixe de luz. Quando a lente não está completamente focada no feixe, o feixe refletido é difuso e não converge para o ponto específico da lente. Neste caso, a intensidade da luz recebida neste ponto diminui drasticamente. No gráfico da figura 18, é possível observar a relação entre a intensidade luminosa recebida e a posição da lente.

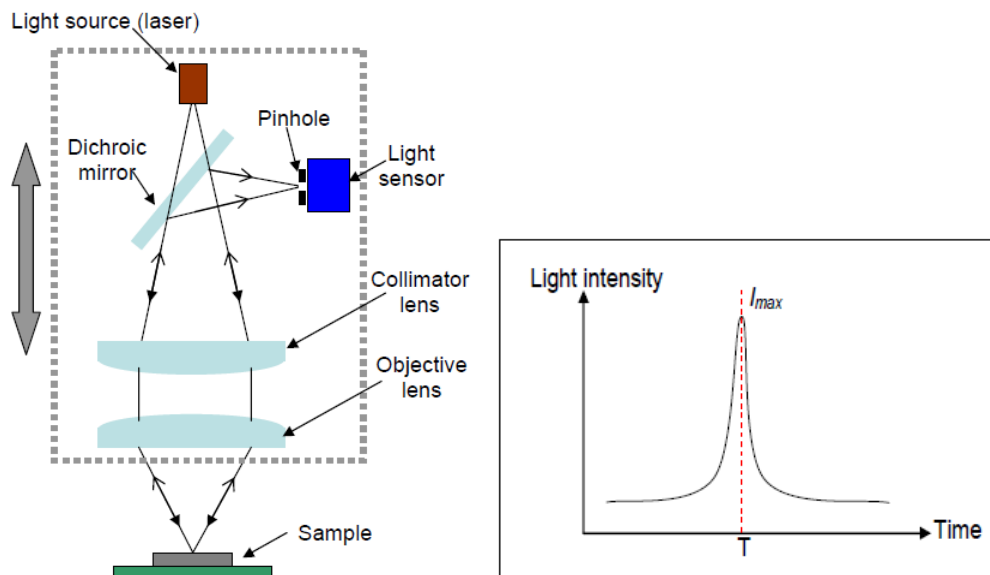


Figura 18 - Esquema da técnica de reflexão laser e intensidade laser no sensor [8].

O sinal só é gerado se a lente estiver no ponto de focagem do feixe, *i.e.* no ponto máximo de recepção luminosa. Neste caso, o sensor calcula a posição da lente e envia o valor da medição. Com a mesa de medição integrada com o programa e a medição de vários pontos, é possível fazer um varrimento total da superfície da amostra, criando uma imagem 3D da superfície do objeto (figura 19).

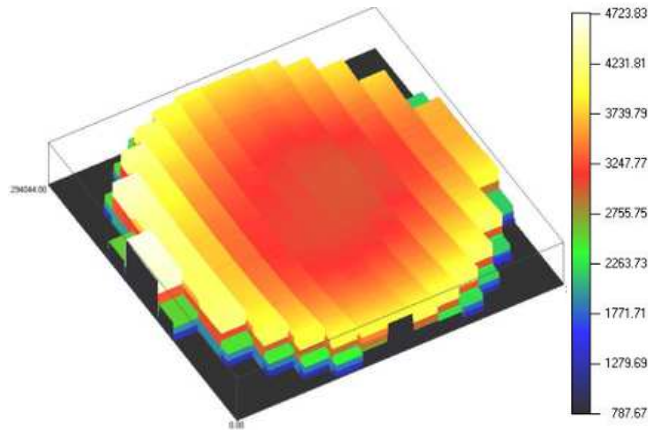


Figura 19 - Representação 3D do *warpage* (μm) de uma *wafer* reconstruída [10].

O equipamento usado, neste trabalho, para efetuar a medição do *warpage* foi um perfilómetro laser 3D da Nanofocus $\mu\text{scan}^{\circledR}$ (figura 20). Este sistema foi desenvolvido para a utilização em áreas de investigação e desenvolvimento assim como para assegurar a qualidade no controlo de processos produtivos. Relativamente às capacidades de medição, este equipamento tem um sistema de coordenadas referencial com aquisição automática de alturas de perfis de superfícies. Este sistema permite a criação de programas para o varrimento automático de perfis predefinidos.

O *software* μsoft , é um programa de estudo de superfícies 2D/3D que inclui as seguintes opções de visualização e análise:

- Definição de superfícies de referência por aproximação;
- Visualização de perfis, áreas, secções, e superfícies 3D;
- Visualização de dados de reflexão como uma imagem de contraste;
- Funções que permitem fazer a filtragem e interpolação de dados;
- Avaliação da rugosidade de superfícies de acordo com a EN ISO 4287;
- Medições geométricas (ex.: altura, largura, espessura de camadas e ângulos);

O equipamento Nanofocus $\mu\text{scan}^{\circledR}$ é constituído pelos seguintes componentes:

- Bancada de trabalho para a colocação de todos os componentes (monitor, rato, teclado, *joystick*, botão de emergência);

- Unidade de controlo composta pelo computador, cartões de memória, *drive* de CD, *modem*, interface com sensores e unidade de posicionamento;

A configuração do sistema de medição é composta pelos seguintes elementos:

1. Base de suporte em mármore para absorção de vibrações;
2. Unidade de posicionamento (eixo X-Y) com suporte de amostras;
3. Sensor;
4. Suporte do sensor para ajuste em altura (eixo Z);
5. Botão de emergência;
6. *Joystick*;

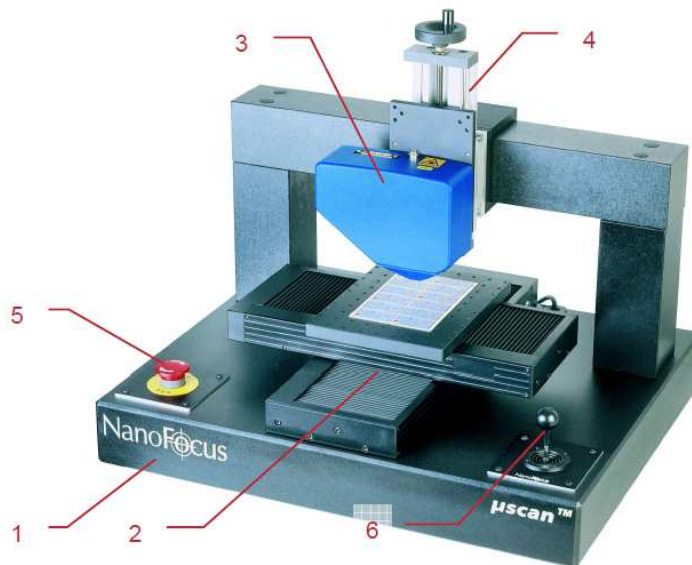


Figura 20 - Configuração do equipamento Nanofocus μscan [10].

Para que o sistema funcione corretamente é recomendável evitar oscilações e vibrações, sujidade, exposição solar direta, temperatura ambiente acima dos 30 ° e abaixo dos 15 °, humidade acima dos 80%, gases ou vapores corrosivos e campos eletromagnéticos fortes.

Este equipamento apresenta as mais-valias de ser um dispositivo facilmente automatizável, não necessitar de contato com a superfície e ser rápido na medição dos componentes. O μscan tem ainda vários sensores e programas distintos para a medição de vários tipos de superfícies.

O sensor utilizado na medição do empeno de *wafers* é o sensor *Chromatic sensor CL10* (CHR CCS), com as seguintes características: resolução X/Y de 8 μm , resolução em Z de 0,28 μm , uma distância de trabalho de 29 mm e uma gama de medição em Z de 10 mm. Para a medição de um valor de referência de 899,858 μm , o erro obtido é de -1,018 μm . No que diz respeito à incerteza, para 90 medições da mesma característica, o valor médio de *warpage* obtido foi de 0,339 \pm 0,049 μm , e a incerteza padrão é de 0,005 μm .

Relativamente à utilização do equipamento (figura 21) é necessário ter em conta determinados aspetos:

- O valor de reflexão desce abruptamente se a gama de medição for ultrapassada;
- Materiais transparentes ou amostras finas são difíceis de medir;
- O sensor avalia sempre o sinal com maior intensidade;
- A proteção de vidro do sensor tem funções óticas. Se houver danos neste componente, tem de ser imediatamente substituído.

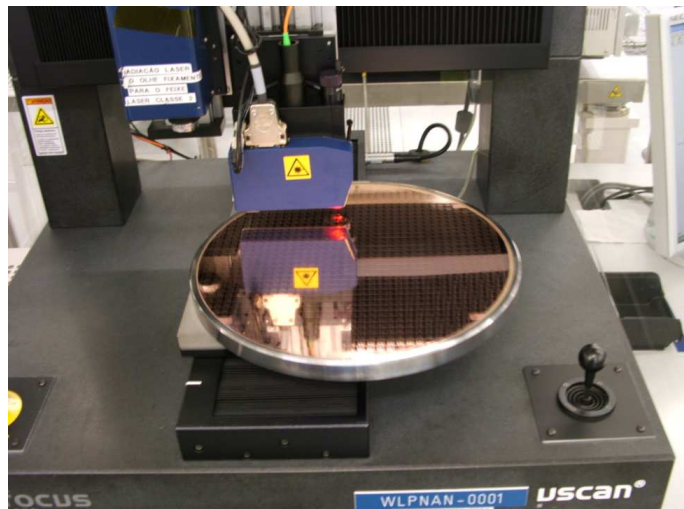


Figura 21 - Equipamento Nanofocus µscan preparado para medição de warpagem em wafers de MC.

2.3 A metodologia Taguchi

Tradicionalmente a forma de melhorar um processo passava por realizar inúmeras experiências, escolhendo vários fatores isoladamente e analisando qual deles obtinha o melhor resultado. Este método tem inúmeras desvantagens: o tempo para realizar todas as

experiências é extremamente longo, o custo associado aos testes também é por consequência elevado, e não tem em consideração o resultado da combinação de vários fatores.

Com a metodologia Taguchi são utilizadas ferramentas estatísticas para estudar o efeito simultâneo de várias variáveis, de forma a determinar a combinação de fatores para obter o melhor resultado da característica de qualidade escolhida para o estudo.

Neste capítulo será abordada em detalhe a metodologia Taguchi e feita uma breve referência à estratégia utilizada.

2.3.1 Introdução ao método Taguchi

O Taguchi é uma abordagem de melhoria contínua, baseada na análise de dados, que visa a robustez dos processos e por consequência a melhoria da satisfação do cliente. A técnica foca-se na melhoria da qualidade e na redução dos custos, procurando obter resultados estáveis e previsíveis dos processos (*i.e.* reduzir a variabilidade dos processos).

2.3.1.1 Perspetiva histórica

Para poder entender o método Taguchi, é necessário compreender a evolução dos DOE - *Design of experiments* (desenho de experiências). O DOE é um desenho experimental, onde se alteram uma ou mais variáveis, ligadas às causas, para medir o efeito que tem noutra variável ou no sistema.

Em 1920, Sir Ronald Fisher, em Inglaterra, desenvolveu os métodos clássicos de desenho de experiências. Apesar dos resultados terem sido promissores, e de haver vários teóricos interessados no método, o desenvolvimento do trabalho ficou vetado ao meio académico, nas universidades. À medida que a técnica foi sendo desenvolvida no meio académico, tornou-se mais complexa e difícil de implementar na indústria.

Dr. Genichi Taguchi, nascido em Tokamachi, Japão, foi um engenheiro eletrotécnico e estatístico. Desde 1950, desenvolveu uma metodologia para a aplicação estatística na melhoria da qualidade de produtos manufacturados. Em 1990, recebeu o prémio *Blue Ribbon Award*, pela contribuição no desenvolvimento da indústria Japonesa. Taguchi recebeu ainda por quatro vezes, o prémio Deming, do Japão e é reconhecido mundialmente como um dos “gurus” da qualidade [11,12].

2.3.1.2 Planeamento de experiências

Este método utiliza uma terminologia no planeamento de experiências, que é importante saber previamente para uma melhor compreensão da técnica (figura 22).

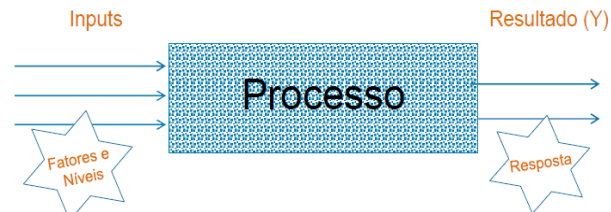


Figura 22 - Esquema do mapa de um processo [12].

Os fatores são as variáveis do processo que influenciam a resposta do mesmo. Os níveis são os parâmetros que os fatores podem adotar nas experiências a realizar. Por fim, a resposta é o valor que é obtido, tendo em conta determinados fatores em níveis estabelecidos.

Existem 3 tipos de matrizes para fazer o planeamento de experiências:

1. Experiência de um fator único em cada instante;
2. Experiência com fatorial completo;
3. Experiência fracionada/Taguchi.

No método de um fator de cada vez, são alterados os níveis de um fator, mantendo os outros fatores constantes. Os resultados deste tipo de experiência não são muito fiáveis porque dificilmente os fatores permanecem fixos ao longo do tempo.

No que diz respeito ao fatorial completo, é um sistema demasiado demorado e dispendioso. Tendo em conta que o número de experiências é calculado através da seguinte expressão:

$$\text{Nº de experiências} = \text{nº de níveis} \wedge \text{nº de fatores} \quad (1)$$

Por este motivo, se o número de fatores for muito grande, a quantidade de experiências a realizar é desmesurada, inviabilizando o estudo [13].

No terceiro caso, correspondente ao método Taguchi, não há interesse nos resultados isolados de uma determinada combinação mas na variação média da resposta ao longo de um certo número de experiências. Neste método, apesar de não se usar uma matriz completa, é possível estudar todas as combinações de fatores.

2.3.1.3 Perspetiva da qualidade

Taguchi rejeitava a abordagem clássica de experiências planeadas e por isso desenvolveu a sua própria metodologia, remetendo a qualidade para duas grandes áreas:

1. Atividades de controlo *offline* - onde a qualidade é garantida logo na fase de desenvolvimento do produto. A melhoria dos parâmetros de processo é feita através de desenho de experiências.
2. Atividades de controlo *online* - que ocorrem somente durante o processo produtivo, através de ferramentas de controlo de processo (ex. SPC - *Statistical Process Control*) e sistemas de inspeção.

Inicialmente a metodologia Taguchi foi aplicada em atividades de controlo *online*, *i.e.*, em processos produtivos. No entanto, faz todo o sentido que a metodologia seja aplicada logo na fase de desenvolvimento do processo, antes do produto entrar em produção, evitando custos desnecessários.

O desenvolvimento do produto divide-se em três fases: desenho do produto, definição de parâmetros e desenho de tolerâncias. A fase do desenho do produto é executada por elementos qualificados, com maiores conhecimentos técnicos sobre os processos. Nesta fase, a metodologia Taguchi não traz mais-valias. A etapa seguinte corresponde à definição dos parâmetros, é uma fase experimental onde são determinados os fatores e níveis (parâmetros), preferencialmente menos sensíveis ao ruído. Nesta fase inicia-se a aplicação do método Taguchi, sendo definidas as matrizes ortogonais. Esta etapa é muitas vezes esquecida, porque existe uma tendência natural para adotar parâmetros que funcionem através do método de tentativa erro, podendo-se poupar algum tempo no desenvolvimento do produto. No entanto, se esta etapa for esquecida, estar-se-á a desenvolver um processo pouco robusto e pouco estudado. Existem grandes probabilidades de ser necessário voltar a repensar o processo mais tarde. A última fase correspondente ao desenho de tolerâncias, pode ser simplificada se a segunda etapa for bem desenvolvida. Esta etapa inclui o conhecimento detalhado dos

parâmetros, com particular ênfase para a definição dos parâmetros críticos do processo. São testados novos materiais e equipamentos, e melhorados os processos. Após este estudo, será possível restringir e relaxar parâmetros (os fatores que têm menos influenciam nas variáveis de saída).

Em resumo, com o método Taguchi, foram desenvolvidos métodos estatísticos para poder encontrar os melhores parâmetros e controlar a influência dos fatores de ruído na resposta do processo. Esta metodologia não tem o objetivo de encontrar a causa do problema, mas o conhecimento da melhor combinação de fatores para a redução na variabilidade, da resposta [13,14].

2.3.2 Etapas do método Taguchi

Antes de começar a realizar as etapas, é necessário recolher os dados para determinar a capacidade atual do processo. Após esta etapa, é determinado o objetivo do trabalho e definida a característica de qualidade a estudar. Em seguida, são identificados os fatores e possíveis interações, escolhendo o desenho e matriz ortogonal apropriada. Por fim, é realizada a experiência e são examinados os resultados através de uma análise estatística. Após estudar os resultados detalhadamente, são escolhidos os melhores parâmetros e realizados testes de confirmação. Se os resultados não forem os esperados, será necessário repetir os ensaios, com novos parâmetros e fatores. Se os resultados forem positivos, o estudo termina. Na figura 23, está descrito um fluxograma genérico do método.

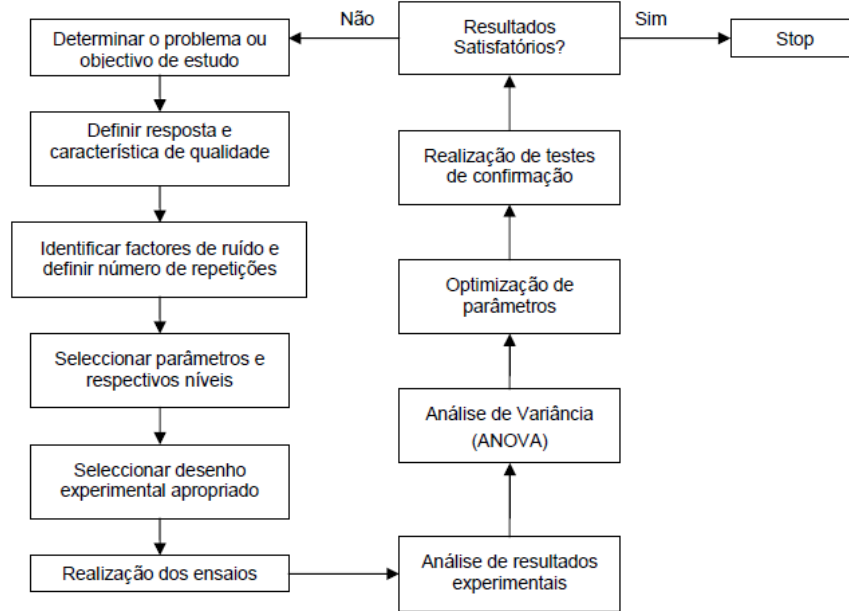


Figura 23 - Fluxograma de etapas do método Taguchi [15].

2.3.2.1 Definição da experiência

Inicialmente, na definição da experiência é descrito de forma clara o problema a resolver, como exemplo podem ser: otimização do *yield* do processo (eficiência do processo em termos de qualidade. É calculado através do número de *chips* bons produzidos, dividido pelo número de *chips* que iniciaram o processo, num determinado período de tempo), reduzir a variação no processo, melhorar uma determinada característica, etc.

De seguida, são definidos os objetivos e variáveis de resposta a estudar. Inicialmente, tem de ser claramente definido o objetivo, tendo em conta o problema, e quais são as variáveis de resposta que vão ser escolhidas.

Consoante a natureza da resposta, os critérios podem ser divididos em 2 grupos: variáveis e atributos. No caso das variáveis, a característica é definida por um valor numérico, que pode variar num determinado intervalo e com uma precisão definida pelo equipamento de medição. No caso dos atributos, a resposta apenas admite valores específicos, por ex.: bom e mau, limpo e sujo, ligado e desligado. Em suma, o objetivo deve ser específico, mensurável e de resultado prático.

Em terceiro lugar, deve selecionar-se um equipamento de medida, que vai controlar a nossa resposta. Neste caso, se este ponto não for considerado inicialmente, corre-se o risco de no final da experiência, ter de alterar a resposta do sistema, causando uma enorme perda de tempo ou mesmo a inviabilidade de toda a experiência. Por esse motivo, deverá ser feito um estudo da capacidade do equipamento de medida, através de estudos GR ou GR&R (*ANOVA Gauge Repeatability & Reproducibility* - técnica de análise de sistemas de medição explicado em detalhe na secção 3.1.3). Se não for estudada a aptidão do equipamento, a variação introduzida pelo sistema de medida pode sobrepor-se à variação causada pelos fatores em análise, podendo provocar conclusões erradas.

Em seguida, é feita a classificação da resposta do rácio sinal/ruído a obter, como por exemplo: menor é melhor, maior é melhor ou nominal é melhor. O rácio sinal/ruído é uma medida estatística de desempenho, usada na avaliação de conjuntos de fatores de controlo e de ruído, na qualidade de um produto. Existem 3 relações sinal/ruído disponíveis de acordo com o tipo de característica: nominal é melhor, menor é melhor e maior é melhor. Os fatores de controlo são fatores cujo nível pode ser definido e mantido enquanto os fatores de ruído são fatores cujo nível não pode ser definido e mantido e cujo efeito pode causar variabilidade na característica funcional.

Após esta fase, deve-se definir o número de respostas por experiência a obter. O número de respostas a alcançar depende do objetivo a atingir. Se a resposta da análise sinal/ruído for do tipo, menor melhor ou maior melhor, uma resposta por experiência pode ser suficiente. No caso de nominal é melhor, é preciso um número de respostas múltiplo, porque a análise de resultados tem de ser feita em duas fases: numa primeira fase, analisa-se os fatores que têm influência no desvio relativamente ao valor médio (análise das médias) e, numa segunda parte, encontram-se os fatores que têm influência na dispersão dos resultados (análise do desvio padrão) [12].

2.3.2.2 Matrizes ortogonais

Um dos pontos presente na definição da experiência passa pela escolha das matrizes ortogonais. Tendo em conta a impossibilidade de realizar matrizes completas, devido ao elevado tempo para realização da experiência e ao custo envolvido, Taguchi desenvolveu matrizes fracionadas. Com o desenvolvimento das matrizes fracionadas, foram definidos inúmeros desenhos padrão - denominados por matrizes ortogonais (anexo 2).

As matrizes são designadas por ortogonais, porque são matrizes equilibradas, *i.e.*, em cada coluna ou par de colunas, existem respetivamente o mesmo número de níveis e combinações. Isto é, existe igual probabilidade para cada uma das experiências influenciar o resultado [12].

A matriz ortogonal deve ser escolhida tendo em conta a expressão abaixo:

$$L_a(b^c)$$

a = Número de experiências
 b = Número de Níveis
 c = Número de Factores (coincide com o # colunas da Matriz)

(2)

Para poder escolher a matriz ortogonal a usar, deve-se percorrer os seguintes pontos:

- Definir o número de variáveis (fatores) e respetivos níveis;
- Analisar possíveis interações;
- Determinar os graus de liberdade;

2.3.2.3 Definição de fatores

A definição de fatores é uma etapa extremamente importante, pois a incorreta seleção dos mesmos, vai tornar o resultado pouco claro, não permitindo atingir a robustez do processo. Os fatores devem ser, por isso, bem escolhidos. Para facilitar esta tarefa, os fatores devem seguir determinadas regras:

- Serem os mais independentes possível;
- Terem uma grande influência na resposta do processo;
- Devem ser possíveis de aplicar em produção;
- Facilmente controláveis;
- Serem “*inputs*” e não “*outputs*” do processo;

Existem ainda vários métodos para auxiliar na correta escolha dos fatores: realização de um *brainstorming*, em que devem participar os maiores especialistas do processo/produto e com conhecimentos estatísticos; utilização de um fluxograma do processo para melhor perceção de todas as etapas, utilização de diagramas causa-efeito (*Ishikawa*). Nestes diagramas (anexo 3), é definido o problema em análise (ex.: *variation in resin output*) e são colocadas, em

subgrupos (*People, Materials, Methods, Machines*) todas as possíveis causas. No final, é realizada uma votação das principais causas (figura 24).

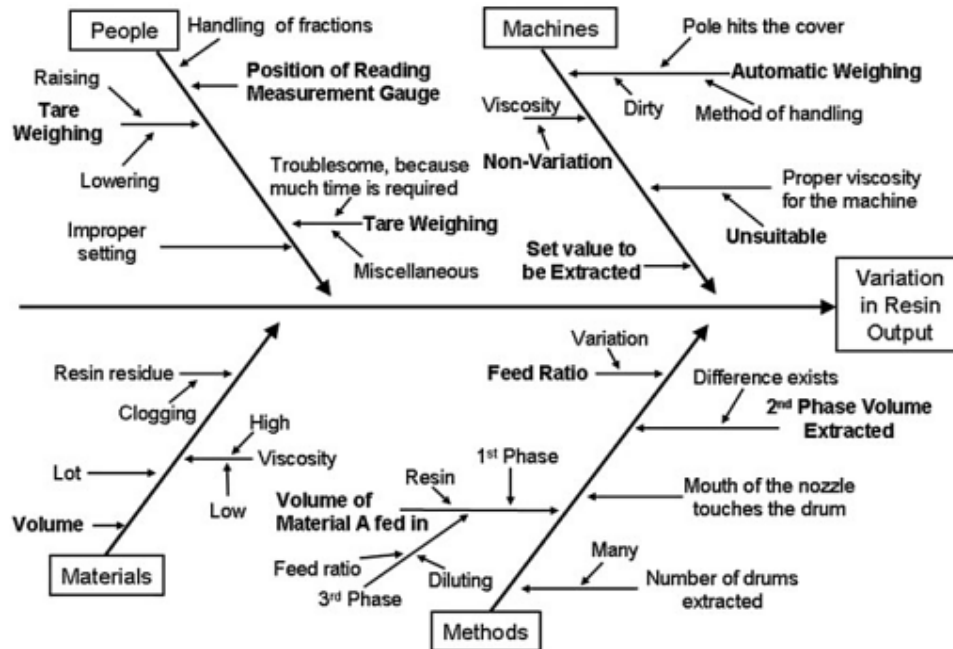


Figura 24 - Exemplo de diagrama causa-efeito (*Ishikawa*) [16].

Para determinação dos níveis de cada fator, existem algumas regras que devem ser seguidas:

- Iniciar o processo com 2 níveis, a não ser que existam comportamentos não lineares. Quanto mais níveis forem definidos, mais completo é o sistema, mas no entanto a escolha de vários níveis, tem o mesmo efeito que a escolha de vários fatores, ou seja, mais tempo e mais custos na realização da experiência.
- Escolher níveis que sejam exequíveis em produção.
- Seleccionar fatores em torno dos valores atuais.

2.3.2.4 Definição de interações

Existem fatores que na presença de outros se comportam de forma diferente, influenciando o resultado da experiência. A este fenómeno chama-se efeito da interação.

Se forem consideradas interações, estas tem de ser alocadas a uma ou mais colunas, na matriz ortogonal, tendo em conta o número de interações.

A necessidade de incluir interações deve ser discutida por especialistas. É preciso ter em conta que se o número de fatores a estudar é limitado, ao considerar uma interação, teremos de retirar um fator simultaneamente.

2.3.2.5 Graus de liberdade

Os graus de liberdade são uma medida da quantidade de informação que é possível extrair de cada fator. Quanto mais graus de liberdade, mais informação se pode obter.

De seguida, são apresentadas as expressões para o cálculo de graus de liberdade.

Número de graus de liberdade para um dado fator (A) é calculado subtraindo um valor ao número de níveis do fator:

$$V_{GL(A)} = \text{número de níveis de A} - 1 \quad (3)$$

Número de graus de liberdade para uma interação (BXC) é igual à multiplicação dos graus de liberdade dos fatores da interação:

$$i_{GL(BXC)} = V_{GL(B)} \times V_{GL(C)} \quad (4)$$

Número total de graus de liberdade é obtido pela soma dos graus de liberdade dos fatores com os graus de liberdade das interações:

$$T_{GL} = V_{GL} + i_{GL} \quad (5)$$

Exemplo do cálculo de graus de liberdade, considerando o estudo de 5 variáveis a 2 níveis e 2 interações:

Variáveis: A, B, C, D, E

Níveis: 2

Interações: BXC, DXE

$$V_{GL(A)} = 2 - 1 = 1$$

$$V_{GL(A,B,C,D,E)} = 5 \times (2 - 1) = 5$$

$$i_{GL(BXC)} = (2-1) \times (2-1) \quad i_{GL(BXC;DXE)} = 2 \times (2-1) \times (2-1) = 2$$

$$T_{GL} = 5 + 2 = 7$$

2.3.2.6 Escolha da matriz

Existem algumas regras que devem ser seguidas para a escolha da matriz a usar na experiência:

- A dimensão da matriz deve ser a menor possível;
- Com o número de graus de liberdade é escolhida a menor matriz ortogonal possível;
- O número de experiências a realizar é igual ao número de linhas da matriz, e deve ser igual ou superior ao número de graus de liberdade totais:

$$L_x, X \geq T_{GL} \quad (6)$$

Onde L_x representa a matriz com x graus de liberdade, o X o número de graus de liberdade e T_{GL} o número total de graus de liberdade. A expressão acima descrita refere que o índice da matriz deve ser sempre superior ao número total de graus de liberdade. Sendo assim, para um sistema com um total de 7 graus de liberdade, é necessário uma matriz L_8 .

2.3.2.7 Alocação de fatores e interações à matriz ortogonal

A alocação de fatores e interações à matriz não é feita de uma forma aleatória. Como referido anteriormente, se se esperar uma forte interação entre fatores, tem de haver entradas para a colocar na matriz. Para determinar a correta alocação dos fatores, são utilizadas matrizes triangulares ou gráficos lineares (anexo 4).

Neste trabalho foram utilizados os gráficos lineares. Neste caso, os fatores são representados por pontos e as interações por segmentos que unem os pontos. De modo a evitar enganar, é necessário seguir o procedimento:

- Desenho do gráfico que corresponde às necessidades da experiência;
- Aproximação ao gráfico linear padrão disponível (ver anexo 5);

- Associação dos fatores e interações aos pontos e segmentos, representados pelos números das colunas, no gráfico linear [13].

2.3.2.8 Fatores de ruído

Até ao momento, o nosso estudo só se debruçou na melhoria dos processos através da análise dos principais fatores aos seus melhores níveis. No entanto, os processos podem ser afetados por fatores externos que não controlamos. Por esse motivo, Taguchi dizia que para um processo ser robusto os fatores ou parâmetros de processo, não devem ser influenciados por fatores externos ou de ruído. Deste modo, no desenho de experiências podemos ter 2 tipos de fatores: fatores de controlo e fatores de ruído.

Se um fator relevante de ruído, não for considerado, e este alterar ao mesmo tempo que muda um fator, corre-se o risco de associar este fator à variação da resposta e tirar conclusões erradas.

Os fatores de ruído comuns, que causam variabilidade nos processos e consequente perda de qualidade, dividem-se pelos seguintes grupos:

- Fatores externos;
 - Representam tipicamente os fatores ambientes, como por ex.: temperatura, humidade relativa, variações de energia, etc.
- Fatores internos;
 - Estão ligados a características de perda de qualidade do produto antes de chegar ao mercado, como por ex.: fadiga, corrosão dos materiais, etc.
- Ruído entre produtos;
 - Variação inerente a todos os processos produtivos, como por ex.: propriedades dos materiais, diferenças entre operadores, diferentes momentos do dia, etc. [17,18].

3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados

A descrição técnica da metodologia Taguchi irá seguir as etapas descritas no capítulo 2.3.2. Serão ainda apresentados os objetivos propostos e os resultados obtidos neste trabalho. Dado o carácter internacional da empresa Nanium S.A., decidiu-se adotar a terminologia normalmente usada pelos técnicos da empresa. Decidiu-se ainda utilizar duas casas decimais em todos os gráficos e quadros resumo, legendados em inglês.

3.1 Definição da experiência

Antes de iniciar a definição da experiência, foi feita uma análise estatística de modo a poder definir qual o processo e produto que iria ser estudado em detalhe neste trabalho.

3.1.1 Análise estatística

Os dados representam valores reais obtidos na empresa Nanium S.A., mais especificamente, de medição dos valores do *warpagem* ao longo dos vários processos de inspeção. Como o fluxo produtivo se aproxima da centena de processos, na figura 25 está representado um esquema resumido do fluxo eWLB e onde são realizadas as medições do *warpagem* das *wafers*.

Os dados apresentados nesta dissertação são confidenciais e foram extraídos de uma base de dados criada para recolha deste tipo de informação. A medição desta característica é feita pela equipa de produção que segue o procedimento descrito no anexo 6.

Como explicado anteriormente, o equipamento usado para esta medição é um perfilómetro ótico da Nanofocus, que faz o varrimento de toda a superfície da *wafer* recorrendo a um feixe laser que mede a altura em cada ponto. No fluxo produtivo, existem ainda processos de medição de *warpagem* que são realizados por outros equipamentos (equipamento da Nikon), não sendo analisados neste trabalho (por ex.: passos de processo WarpDL1 e WarpWetEtch).

Os valores obtidos são posteriormente enviados para uma carta de controlo, onde são comparados com valores de especificação interna.

A análise de dados foi feita com a ajuda de um programa de tratamento estatístico (*IBM SPSS Statistics*), estudado nas aulas da disciplina de ESEAD (Estatística Experimental e Análise de Dados) do mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia do ISEP.

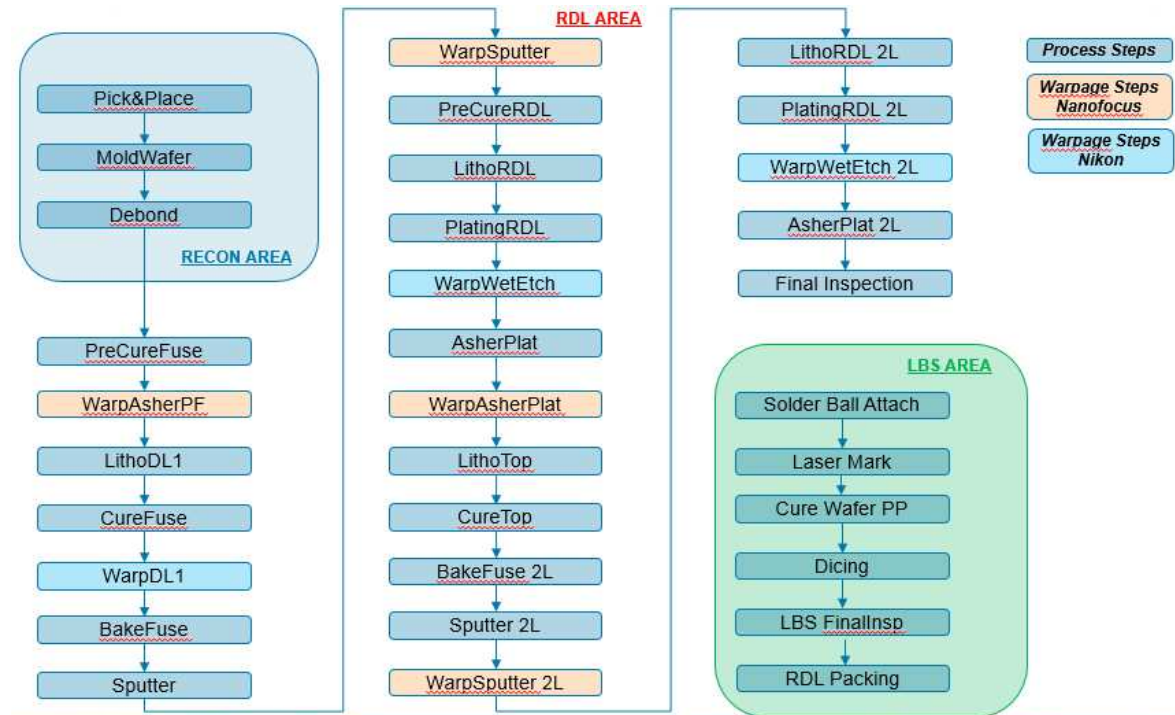


Figura 25 - Fluxo de processo eWLB com os processos de medição do *warpagem*. A rosa estão indicados os processos de controlo do *warpagem* usando o equipamento Nanofocus.

Inicialmente, foi feita uma análise global do valor do *warpage* ao longo do processo produtivo. O valor do *warpage* (ver tabela 1), independentemente do produto ou processo, é de 0,16 μm com um desvio padrão de 0,02 μm . Com 95% de confiança, o valor limite inferior é de 0,11 μm enquanto o superior é 0,20 μm . O valor da mediana (0,51 μm) é próximo da média, fazendo prever que os *outliers* não têm grande influência na média. Analisando os valores de *Skewness* e *Kurtosis*, podemos dizer que a distribuição é simétrica e com um achatamento próximo da distribuição normal. No entanto, o valor do *range* (gama de valores) é extremamente elevada (7,53 μm).

Tabela 1 - Medida descritiva global da variável *warpage*

Case Processing Summary						
	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
warpage value	3152	100.0%	0	0.0%	3152	100.0%

Descriptives			
		Statistic	Std. Error
warpage value	Mean	.16	.02
	95% Confidence Interval for Mean		
	Lower Bound	.11	
	Upper Bound	.20	
	5% Trimmed Mean	.18	
	Median	.51	
	Variance	1.62	
	Std. Deviation	1.27	
	Minimum	-4.37	
	Maximum	3.17	
	Range	7.53	
	Interquartile Range	1.91	
	Skewness	-.39	.04
	Kurtosis	-.56	.09

Posteriormente, foi construído um histograma (distribuição de frequências) com o valor médio global do *warpage*. Ao analisar o gráfico da figura 26, é possível concluir que existe uma distribuição bimodal dos resultados, *i.e.* existe uma distribuição de probabilidade contínua com duas modas diferentes (+1 mm e -1 mm).

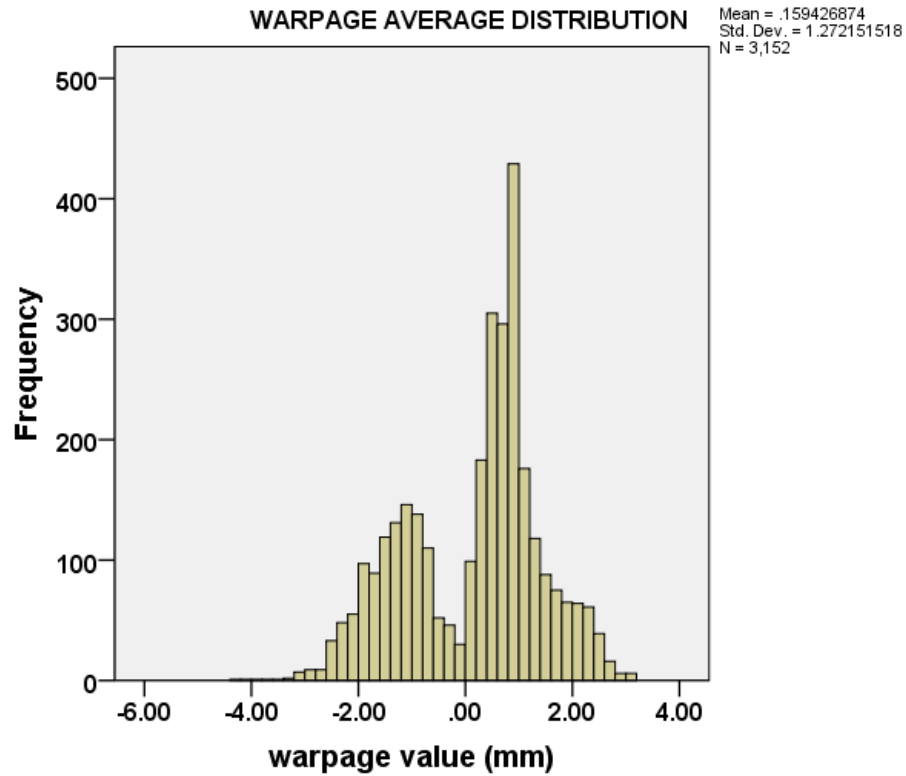


Figura 26 - Gráfico da distribuição global média do *warpagem*

Tendo em conta os resultados iniciais, foi feito um estudo preliminar por produtos e processos para perceber se haveria algum que se destacasse dos restantes, em termos de valores de *warpagem*.

Os dados foram compilados e apresentados em forma de diagrama de caixas (*box plot*). No primeiro gráfico (figura 27), apresenta-se os valores de *warpagem* médio por produto em mm, enquanto no segundo os valores de *warpagem* estão por processo de inspeção (figura 27).

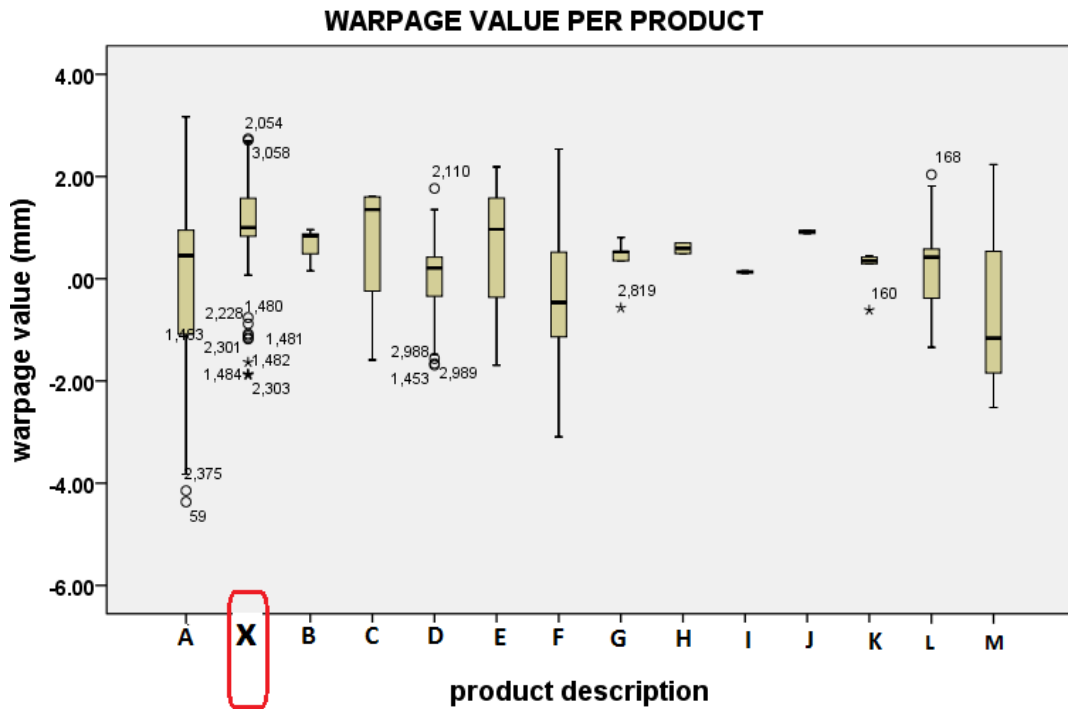


Figura 27 - Gráfico do warpage médio por produto

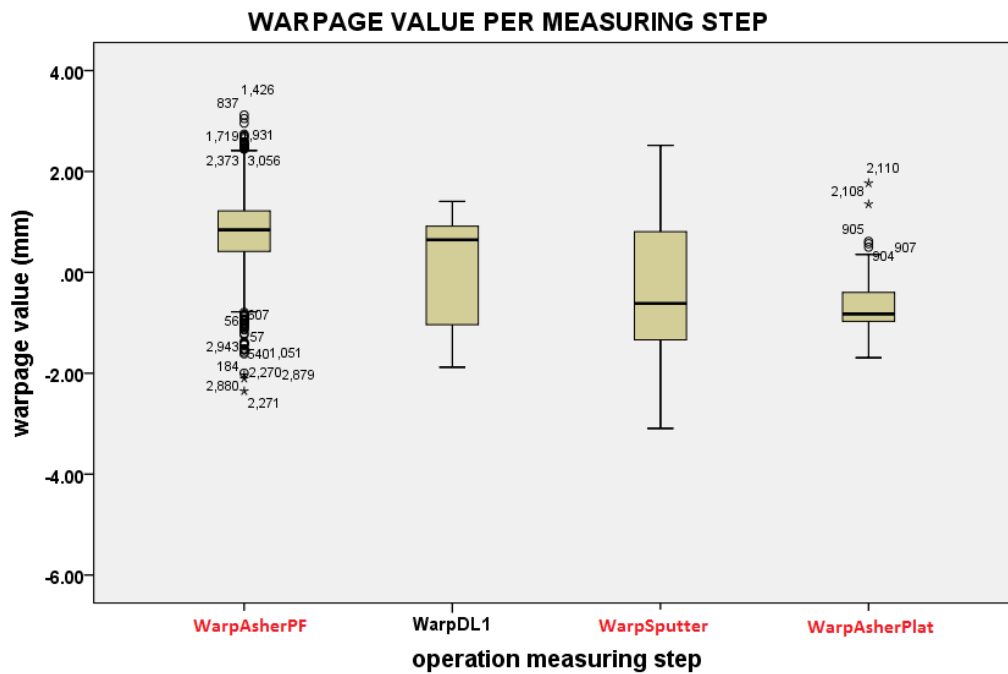


Figura 28 - Gráfico do warpage médio por processo de inspeção. A vermelho estão identificados os steps medidos no Nanofocus

Após a análise dos gráficos (figura 27 e 28), conclui-se que existe uma grande variação do valor do *warpagem* entre produtos e processos de inspeção. Além disso, observa-se também uma grande dispersão nos resultados dentro de cada produto e processo de inspeção. Para poder definir o processo e o produto, fizeram-se alguns estudos em que se relacionou o *warpagem* com o tempo de processo e com a qualidade final do produto. No entanto, os resultados não foram suficientemente esclarecedores para poder tomar decisões, *i.e.* não foram visíveis relações do *warpagem* com o tempo de processo nem com a qualidade do produto.

Com base numa análise posterior da informação recolhida e tendo em conta o número de *wafers* partidas devido a falhas no manuseamento por efeito do *warpagem* decidiu-se pela escolha do produto X, bem como o processo de *debond* da área de Recon (figura 25). Nos gráficos abaixo (figura 29 e 30), é possível analisar o diagrama Pareto (gráfico de colunas que ordena as frequências das ocorrências, da maior para a menor, permitindo a priorização de problemas) de *wafers* partidas, por processo e por produto. Para além de dados esclarecedores, a escolha do produto X e do processo de *debond* têm algumas vantagens. Relativamente ao produto X, por ser de conceção recente, este tem ainda um tempo de vida de produção elevado, *i.e.* ao nível industrial não faria sentido analisar um produto em fim de vida. No caso do processo de *debond*, este tem também a vantagem de analisar o *warpagem* no processo em que é criado (processo onde a wafer se liberta do *carrier* (suporte metálico que lhe deu origem), sendo mais fácil analisar os resultados, sem ter outros fatores de ruído naturalmente criados pelos processos posteriores. Para além do processo de *debond*, foi analisado também o processo de *mold* (processo imediatamente anterior ao de *debond*) por estar intimamente ligado ao processo de *debond*.

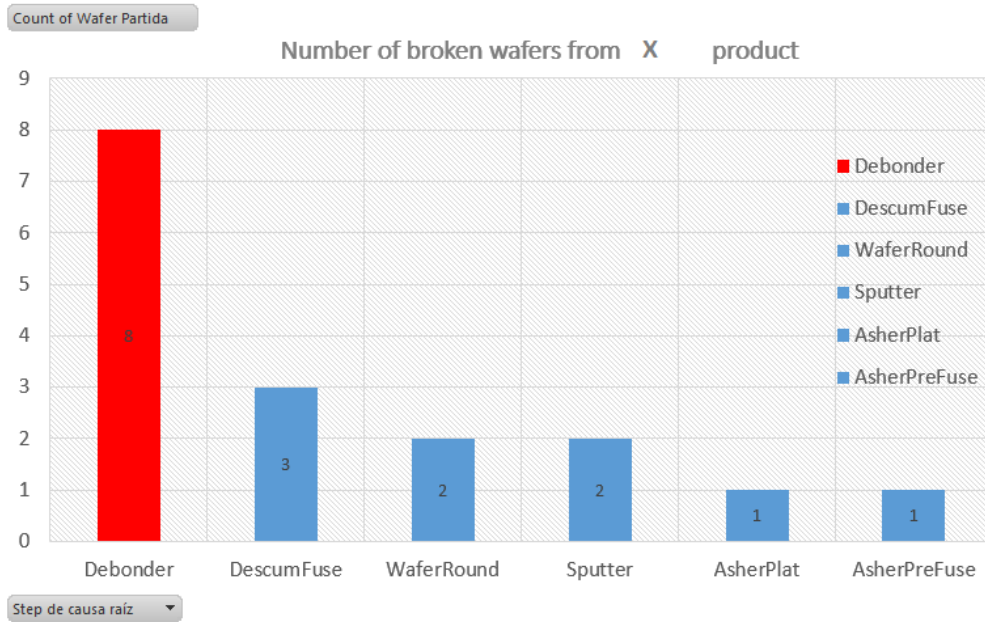


Figura 29 - Gráficos representando o número de *wafers* partidas por processo.

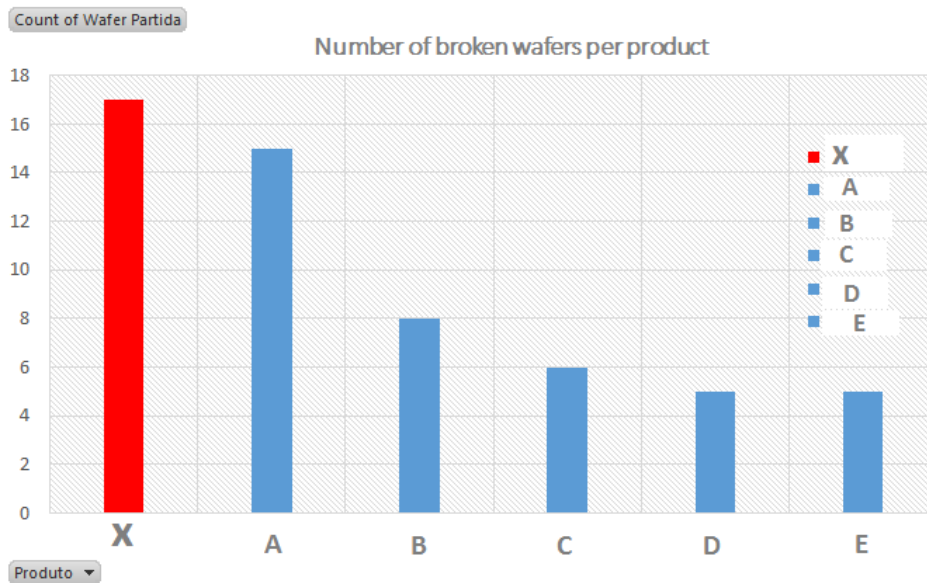


Figura 30 - Gráficos representando o número de *wafers* partidas por produto.

Após a escolha do produto, foi realizado um estudo mais completo do *warpagem* com o objetivo de conhecer o ponto de partida do valor do *warpagem* deste produto e comparar com um produto padrão que é considerado um dos melhores produtos em termos de manuseamento (figura 31).

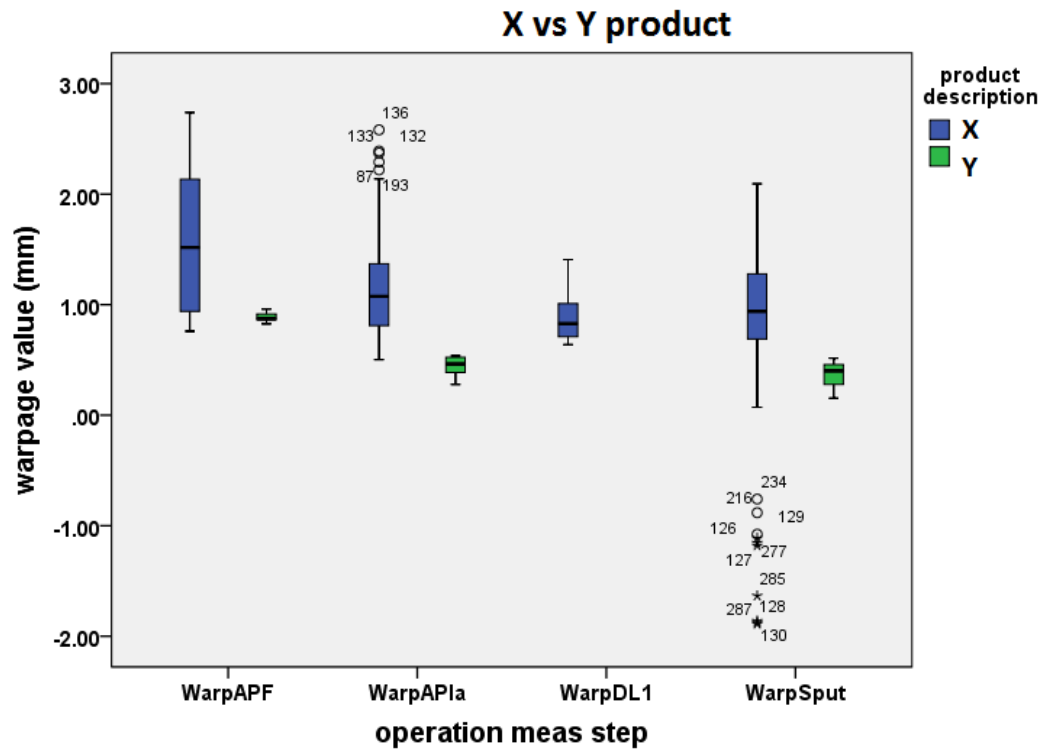


Figura 31 - Valor do *warpagem* por processo e produto.

1º step - WarpAPF, 2º step - WarpDL1, 3º step - WarpSput, 4º step - WarpAPla,

3.1.2 Definição da equipa e objetivo

Após a escolha do produto e processos a estudar, foi definida a equipa que iria participar na análise do problema. Tendo em consideração que a análise do *warpagem* seria feita no processo *mold* e *debond*, foram convidados os engenheiros de processo da área, assim como outros colegas relacionados com o estudo desta característica.

O elevado empeno das *wafers* do produto X, dificulta o processamento das *wafers* no processo de *debond*, invalidando o seu manuseamento automático. Para além desta dificuldade, existem grandes probabilidades de as *wafers* quebrarem em determinadas fases do processo produtivo.

Assim sendo, o principal objetivo deste trabalho é o da redução do *warpagem* de modo a melhorar o manuseamento de *wafers* do produto X no processo de *debond*. Desta forma, a variável de resposta da experiência é o *warpagem* das *wafers* no processo após o *debond*.

3.1.3 Validação da capacidade do método de medida

Tal como explicado anteriormente, se não for validada a capacidade do processo de medida através de um estudo GR&R, a variação introduzida pelo sistema de controlo pode-se sobrepor à variação causada pelos fatores em análise levando a conclusões erradas.

A técnica ANOVA Gauge R&R (ou ANOVA Gauge Repeatability & Reproducibility) é uma técnica de análise de sistemas de medição que utiliza a análise de variância - modelo de efeitos (ANOVA) aleatórios para avaliar um sistema de medição [19].

O *warpage* é medido no equipamento padrão (Nanofocus) e nos 2 equipamentos de *debond* onde o processo de *debond* ocorre. O equipamento de *debond* realiza a medição do *warpage* usando também um sistema laser. Como no caso do equipamento de *debond* a *wafer* é colocada automaticamente, é realizado um estudo GR apenas. Neste caso, não existe influência por parte do operador ao contrário do que acontece no caso do Nanofocus.

O procedimento para a realização dos estudos de capacidade está descrito no anexo 7. Antes de analisar os resultados, é necessário perceber quais são os critérios de aceitação dos estudos GR e GR&R (tabela 2).

Tabela 2 - Critérios de aceitação padrão (Standard acceptability criteria) dos estudos GR e GR&R [19]

Standard Acceptability Criteria:		
GR&R% <10 % and Cg>3.0	R&R capable	Use
0% <= GR&R <= 30 % or 1.0 <= Cg <= 3.	conditionally capable	can be used with Improv. Action
GR&R%>30% or Cg<1.0	not R&R capable	Not use
(for new tools: Gr&R<10% and Cg>3.0)		

Se o valor do GR&R for inferior a 10 %, o sistema de medição é considerado aceitável e especialmente recomendado em processos de controlo com requisitos apertados. Se, por outro lado, for superior a 30%, o sistema é considerado incapaz. Nesta altura, é necessário repensar todo o sistema de medição implementado. Para um sistema cujo resultado se encontre entre os 10% e os 30%, o sistema é considerado parcialmente capaz e é necessário definir um plano de ações para melhorar o equipamento e/ou o procedimento de medição [19].

É possível observar pelos gráficos da figura 32, assim como na tabela 3, que foi necessário fazer um segundo teste relativamente ao equipamento Nanofocus. Na realização do 2º teste, o equipamento passou de um nível de parcialmente capaz (GR&R > 20%), para totalmente capaz (GR&R < 10%). No primeiro teste foram obtidos valores com grande discrepância, dado que não foi possível realizar o teste num único dia. As últimas 30 medições foram feitas no segundo dia, tendo os valores do *warpage* sofrido uma variação substancial. Os valores de empeno mudaram devido ao facto do material ter estado armazenado de forma incorreta durante a noite. Após algumas horas de estabilização, a *wafer* voltou ao seu estado normal, e foi possível terminar o estudo GR&R.

Após a análise dos resultados, é visível também uma grande diferença entre os equipamentos de medida utilizados (~10X). Isto deve-se à diferença nas condições em que a *wafer* se encontra quando está a ser feita a medição. No caso do Nanofocus, a *wafer* encontra-se totalmente apoiada na mesa, enquanto no caso da *debonder*, a *wafer* está somente apoiada na zona central. Como tal, se a rigidez da *wafer* for baixa, os valores entre os dois equipamentos não são comparáveis, como é o caso do produto que está a ser estudado.

Também se pode observar que a *debonder 2* tem um valor de GR&R acima dos 10%, tornando o equipamento parcialmente capaz. Por esse motivo o equipamento foi verificado pela equipa técnica.

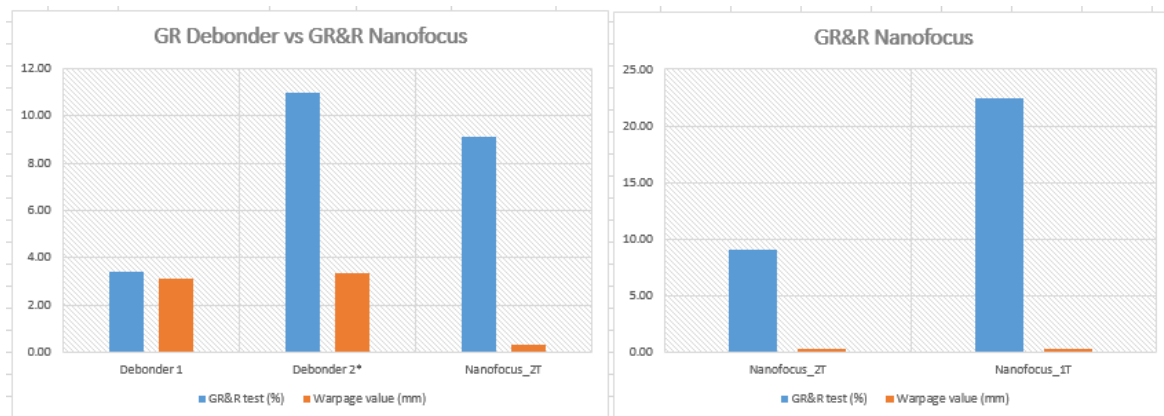


Figura 32 - Gráficos com os resultados do estudo GR e GR&R no processo de *debond*.

Tabela 3 - Resultado dos estudos de capacidade realizados no equipamento Nanofocus e na debonder

			1 TESTE	2 TESTE
	Debonder 1	Debonder 2*	Nanofocus_1T	Nanofocus_2T
GR&R test (%)	3.380	10.980	22.400	9.100
Warpagem value (mm)	3.143	3.336	0.388	0.339

Em resumo, à exceção da *debonder 2* que foi considerada parcialmente capaz, a *debonder 1* e o Nanofocus são capazes de controlar o empeno das *wafers*. Foi escolhido o Nanofocus, porque não apresenta uma dependência significativa na rigidez da *wafer* e, para além disso, ser possível utilizar o equipamento nos passos seguintes do processo para controlo da mesma característica.

3.1.4 Classificação do tipo de resposta

No que diz respeito ao empeno, um valor mínimo é o mais apropriado, considerando que não existem valores de *warpagem* negativos. Apesar de existirem vários casos de *wafers* com valores negativos, o que nos interessa é o módulo desse valor. O sinal, apenas nos fornece indicação da curvatura da *wafer*.

Idealmente seria conveniente fazer pelo menos duas repetições por experiência. No entanto, tendo em conta o custo do material e limitações de tempo optou-se por realizar somente uma resposta por experiência.

3.1.5 Identificação e escolha dos fatores, níveis e interações

Nesta fase procedeu-se à escolha dos fatores, níveis e interações, tendo em consideração as regras usadas nestes casos (tabela 4).

Para poder escolher esta informação, foi reunida toda a equipa envolvida no trabalho e realizado um *brainstorming*. Após a recolha exaustiva de todas as possíveis causas para o empeno das *wafers* nos processos de *mold* e *debond*, foi construído um diagrama de *Ishikawa*, detalhado no anexo 3.

Por fim, foi realizada uma votação que permitiu escolher os fatores e níveis descritos na tabela abaixo. Para além destes fatores, foi também escolhida a interação entre o tempo e a temperatura de *post mold cure*.

Tabela 4 - Resumo dos fatores e níveis escolhidos para a realização da experiência

Factores	Target	Nível 1	Nível 2
Temperatura da cool Chuck 1 (°C)	75	60	110
Tempo de post mold cure (min)	30	30	60
Batch de mold compound (Pa.s)	400-900	BAT1	BAT2
Temperatura da tool de mold (°C)	120	115	130
Mod Cure Time - prensa (min)	400	400	800
Temperatura de post mold cure (°C)	150	130	160

Os graus de liberdade foram calculados segundo o procedimento descrito no anexo 4.

No caso deste estudo escolhemos seis fatores (A,B,C,D,E,F) e uma interação a 2 níveis.

Logo, o cálculo deverá ser realizado da seguinte forma:

Graus de liberdade das variáveis: A,B,C,D,E,F $V_{GL} = 6 \times (2-1) = 6$

Graus de liberdade da interação: A x B $I_{GL} = 2 \times (2-1) = 2$

Número total de graus de liberdade: $TGL = 6 + 2 = 8$

Conforme os cálculos anteriores, este estudo terá então um total de 8 graus de liberdade.

3.1.6 Escolha da matriz OA

Tendo em conta a expressão para escolha de matrizes: L_x , com $x \geq TGL$, e as regras já definidas, chega-se à conclusão de que é necessária uma matriz do tipo L_8 (anexo 5). Para poder definir os fatores na matriz, é preciso fazer uso dos gráficos lineares (anexo 5).

Nos gráficos lineares, os fatores são representados por pontos, enquanto as interações são apresentadas por segmentos. Se uma interação entre fatores não é considerada, então um outro fator principal pode ser alocado ao segmento correspondente.

Para a associação dos fatores e interações à matriz ortogonal, deve-se cumprir o seguinte procedimento (figura 33):

1. Escolher o gráfico linear pretendido que corresponde às necessidades da experiência.
2. Selecionar o gráfico padrão mais apropriado e que se aproxime do gráfico linear pretendido.
3. Combinar o gráfico pretendido com o gráfico padrão.
4. Transportar o gráfico pretendido para a matriz ortogonal.

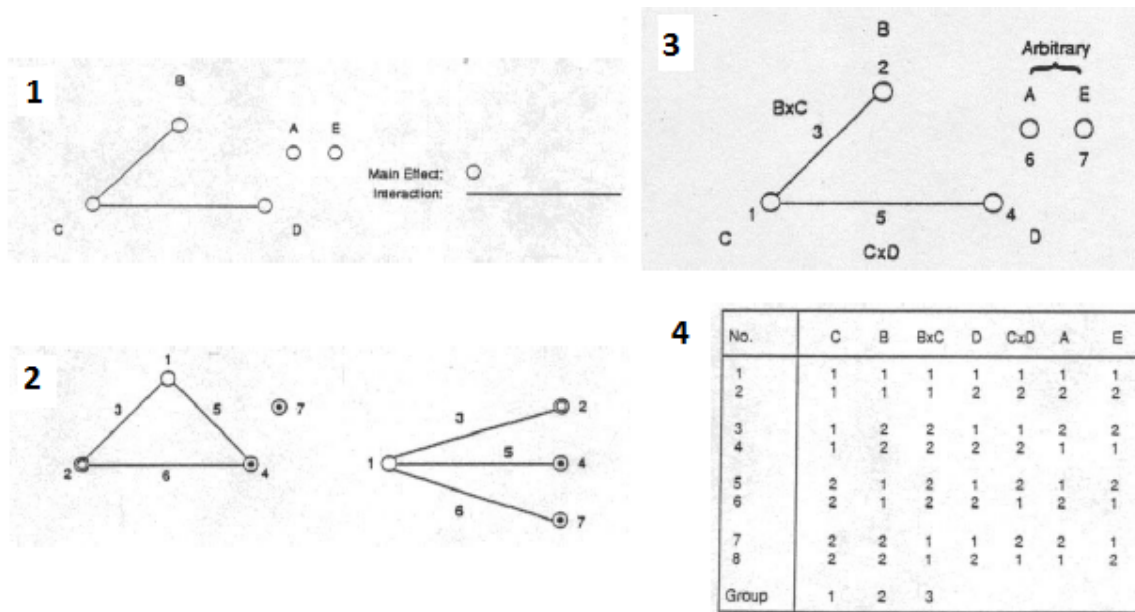


Figura 33 - Exemplo da associação de fatores e interações a uma matriz ortogonal [13].

Na figura 34, é possível ver o gráfico linear associado, assim como o gráfico pretendido.

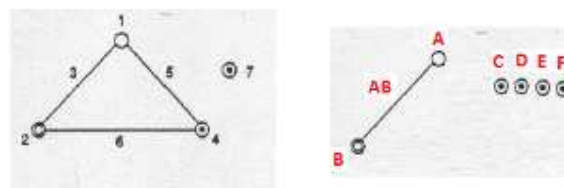


Figura 34 - Gráfico linear associado (esquerda); Gráfico pretendido (direita).

Sendo assim, a matriz ficará da seguinte forma:

Tabela 5 - Associação dos fatores e interações à matriz L8

	A	B	AxB	C	D	E	F
	Temperatura de post mold cure (°C)	Tempo de post mold cure (min.)	Interação de A com B	Mold cure time (min.)	Batch de mold compound	Temperatura da tool de mold (°C)	Temperatura da cool chuck 1 (°C)
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

3.2 Realização da experiência

A experiência foi realizada recorrendo ao procedimento dos SWR (*Special Work Request*) - método utilizado na linha de produção para análises de engenharia. Na figura abaixo (figura 35), é possível observar o cabeçalho da documentação usada neste tipo de testes.


		<h2>SWR - Special Work Request</h2> <p>eWLB</p>		Nanium S.A. For internal use only	
Propósito (sumário):		Date - Released:		SWR nº 2906	
		Date - Revised:		1/8/2014 1/8/2014	
<h3>ESTUDO DO WARPAGE EM MOLD\DEBOND NO PRODUTO X (TAGUCHI)</h3>					
Pedido/Aprovado: Nome/Dpt/		Nuno Peixoto/		Coordenador: Nome/Dpt - eWLB/	
Relatório de Eng		Não		Coordenador: Nome/Dpt - QM/	
Lote nº: GR444104					
Lotes / Wafers associados à actividade: 8					
Descrição do Produto:		X product		Bau Nr.:	
FE source:		-			
Instruções gerais: De acordo com PI001695 - Em caso de dúvida, contactar o(s) coordenadores das áreas.					
OWS - Atributos		Para colocar o lote em hold utilizar o hold code GEN__			
Future Hold:					
Restrições:		Owner:			
Wafers Recon totalmente populadas com BS					

Figura 35 - Cabeçalho do SWR usado na realização da experiência.

Para que a experiência fosse exequível ao nível dos custos, trocaram-se os *chips* de produção por *chips* de silício. É necessário ter em consideração que são necessárias 8 *wafers* para poder realizar todas as experiências definidas na matriz e que, para este produto cada *wafer* tem 2097 *chips* compostos por um die grande e um pequeno (figura 36).

No entanto, tendo por base experiências anteriores, esta alteração não apresenta qualquer impacto no *warpage* das *wafers*.

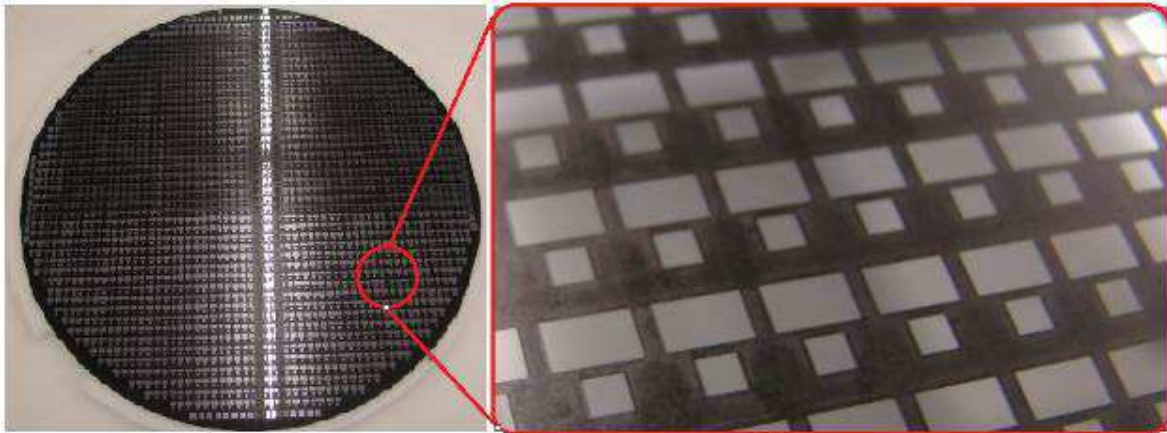


Figura 36 - Fotografia de uma *wafer* reconstruída com dies BS (*Blank Silica*).

No anexo 8, é possível analisar processo a processo a conversão da matriz ortogonal, associando os fatores, interações e níveis. A tabela resumo utilizada na realização da experiência é mostrada em seguida.

Tabela 6 - Associação dos fatores e interações à matriz L8.

Condição	Temperatura de post mold cure (°C)	Tempo de post mold cure (min.)	Interação de A com B	Mold cure time (min.)	Batch de mold compound	Temperatura da tool de mold (°C)
4	130	60	800	2	115	60
1	130	30	400	1	115	60
8	160	60	800	1	115	110
5	160	30	400	2	115	110
7	160	60	400	2	130	60
6	160	30	800	1	130	60
3	130	60	400	1	130	110
2	130	30	800	2	130	110

Um dos fatores escolhidos foi o *batch* (lote) de *mold compound*, por haver suspeitas de que diferenças na viscosidade poderiam influenciar o empeno das *wafers*. Por este motivo, para a realização da experiência foram escolhidos 2 *batches* de *mold compound* com viscosidades

distintas. Na tabela 7, são mostrados os parâmetros do processo de *mold* e as características do *mold compound* usado. O tempo de descongelação e de estabilização foram iguais em ambos os casos.

Tabela 7 - Parâmetros do processo de *mold* e do *mold compound*

Mold	
Mold compound type	
Lot number	
Wafer Thickness	
Mold Gap	
Batch 1 Nr	-1
Viscosity (Pas, 25°C)	456
Out of freezer	5:00
Stabilization time	9:00
Batch 2 Nr	-14
Viscosity (Pas, 25°C)	672
Out of freezer	5:00
Stabilization time	9:00

O processamento das *wafers* foi realizado usando os mesmos parâmetros da produção normal, para tentar simular o processo *padrão* para este produto.

No final dos testes realizados em *mold* e *debond* as *wafers* foram processadas até ao final da área do RDL (*Final Inspection Step*) sendo analisado o *warpagem* em todos os processos de inspeção. Dado que o *warpagem* não estabiliza após a área de *debond*, é possível verificar se para além da área de *debond*, os outros processos não são afetados pelas alterações propostas.

3.3 Resultados obtidos

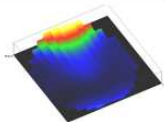
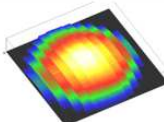
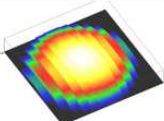
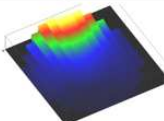
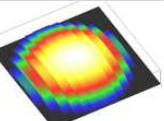
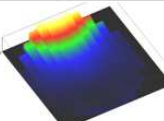
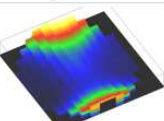
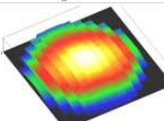
3.3.1 Resultados do *warpagem* no DOE

Os resultados do DOE (*design of experiments*) encontram-se sumariados na tabela 7. Através da análise da tabela 8 e da figura 37, é possível perceber que as *wafers* que tem mais de 1 mm de *warpagem* e *warpagem* negativo têm problemas de processamento no equipamento de *debond*.

Tabela 8 - Resultados de warpage obtidos no DOE (design of experiments)

Condição	T. de PMC (°C)	t. de PMC (min.)	Mold Cure Time (min.)	Batch	T. da tool de mold (°C)	T. da Cool Chuck 1 (°C)	Warpage Nanofocus (mm)
4	130	60	800	2	115	60	1.616
1	130	30	400	1	115	60	1.460
8	160	60	800	1	115	110	0.456
5	160	30	400	2	115	110	0.603
7	160	60	400	2	130	60	2.318
6	160	30	800	1	130	60	2.508
3	130	60	400	1	130	110	0.837
2	130	30	800	2	130	110	0.804

Para além destes resultados, foi também descrita a facilidade de manuseamento de cada uma das wafers.

SLOT	WARPAGE NANOFOCUS (mm)	PROCESSABILIDADE	FORMATO	SLOT	WARPAGE NANOFOCUS (mm)	PROCESSABILIDADE	FORMATO
2	1.460	↓		10	0.603	↑	
4	0.804	↘		12	2.508	↓	
6	0.837	↑		14	2.318	↓	
8	1.616	↓		16	0.456	↘	

LEGENDA	
↑	EM MODO AUTOMÁTICO
↓	AJUDA MANUAL
↘	SEM AJUDA MAS COM PROBLEMAS NO PREALIGNER
↙	SEM AJUDA MAS NAO FICOU CENTRADA NA COOL CHUCK 2

Figura 37 - Valor do warpage e processamento após debond e formato da wafer.

O valor do slot corresponde à posição da wafer no transportador de 25 wafers. As wafers encontram-se em slots pares para evitar problemas de manuseamento no equipamento. Ex: wafer 1 (slot 2), Wafer 2 (slot 4), etc.

3.3.2 Tratamento estatístico dos resultados

Depois de executado o DOE e de recolhidas as respostas de cada uma das experiências planeadas, é altura de fazer o tratamento estatístico dos dados. Foi realizada a análise ANOVA e os gráficos obtidos estão exemplificados na figura 38. A técnica de Análise da Variância (ANOVA) é utilizada para quantificar o nível de variabilidade presente nos resultados da experiência e da importância dos fatores considerados [20].

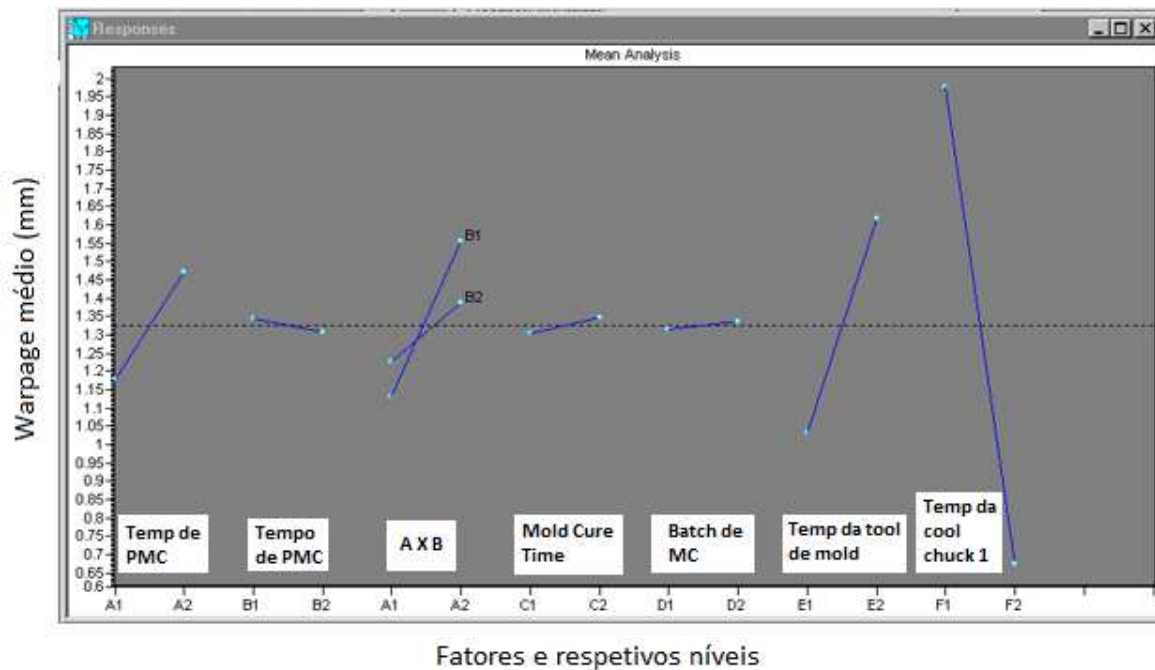
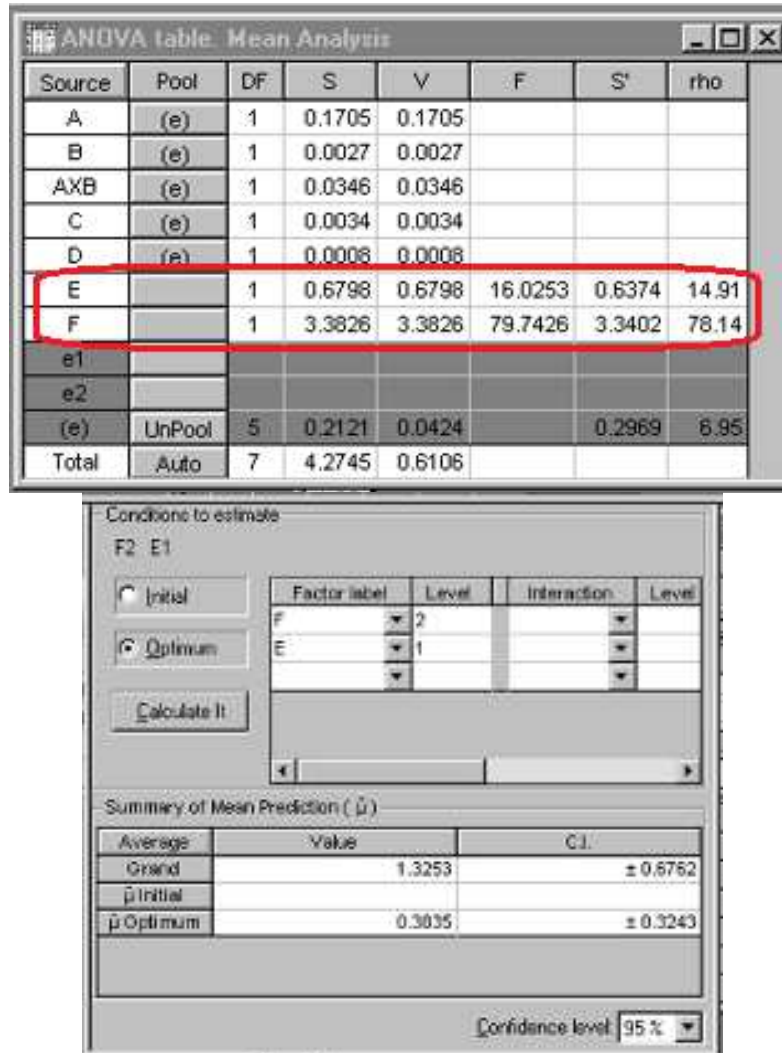


Figura 38 - Análise das médias da experiência realizada.

Analisando o gráfico da figura 38, e tendo em consideração que menor é melhor, podemos concluir que a melhor combinação de fatores é a seguinte: A1, B2, C1, D1, E1, e F2. Em resumo, os melhores parâmetros são:

- Temperatura de *post mold cure*: 130 °C
- Tempo de *post mold cure*: 60 min
- Tempo da cura de *mold*: 400 min
- *Batch de mold compound*: 1
- Temperatura da *tool de mold*: 115 °C
- Temperatura da *cool chuck 1*: 110°C

É possível ainda verificar que existe uma relação entre os fatores A e B, visto que as duas retas se cruzam. No entanto, não é considerada para o cálculo porque o valor S (soma dos quadrados) é muito baixo (figura 39).



- Legenda:
- DF - graus de liberdade
 - S - soma dos quadrados
 - V - variância
 - F - estatística teste; $F = QMF$ (estimativa de variância do fator)/ QME (estimativa da variância dos erros)
 - rho - taxa de contribuição

V - valor esperado nas melhores condições. Fator F no nível 2 e E no nível 1.

C.I. - intervalo de confiança

Confidence level - nível de confiança

Figura 39 - Análise das médias e cálculo do valor esperado.

Na figura 38 e 39, é possível observar os dados da análise das médias, realizadas com o recurso ao programa ANOVA TM. Observa-se que o fator F (temperatura da *cool chuck 1*) é, indubitavelmente, o mais importante de todos os fatores presentes na experiência. Foi ainda considerado para o cálculo do resultado esperado, o fator E (temperatura da *tool de mold*). No entanto, este fator apresenta uma relevância muito inferior, comparado com F. Os restantes fatores são considerados como erro, visto que os valores da variância obtidos são muito baixos (C e D).

O programa ANOVA-TM permite ainda o cálculo do valor esperado (figura 39), *i.e.* para as condições ótimas, qual seria o valor mínimo que se poderia obter. Neste caso, o valor médio do *warpagem* da experiência é de $1,325 \pm 0,676$ mm. Se aplicarmos os fatores para os níveis que apresentam os melhores resultados, obtêm-se um valor de $0,383 \pm 0,324$ mm com um intervalo de confiança de 95%. Ou seja, poderíamos reduzir o empeno das *wafers*, no processo de *debond*, em 71%, fazendo uso dos melhores níveis.

3.3.3 Resultados de *warpagem* em todo o processo

Para além dos resultados obtidos após *debond*, o *warpagem* foi ainda controlado nos restantes steps de controlo do *warpagem*, presentes no fluxo produtivo. Na figura 38, é possível acompanhar a evolução do *warpagem* durante todos os processos de inspeção. Apesar de todas as *wafers* terem chegado ao final, é perceptível que as *wafers* que começam com um *warpagem* mais elevado acabem também com um valor de *warpagem* superior. Para esta análise, foi também considerado o *warpagem* negativo para se poder perceber qual o formato da *wafer*.

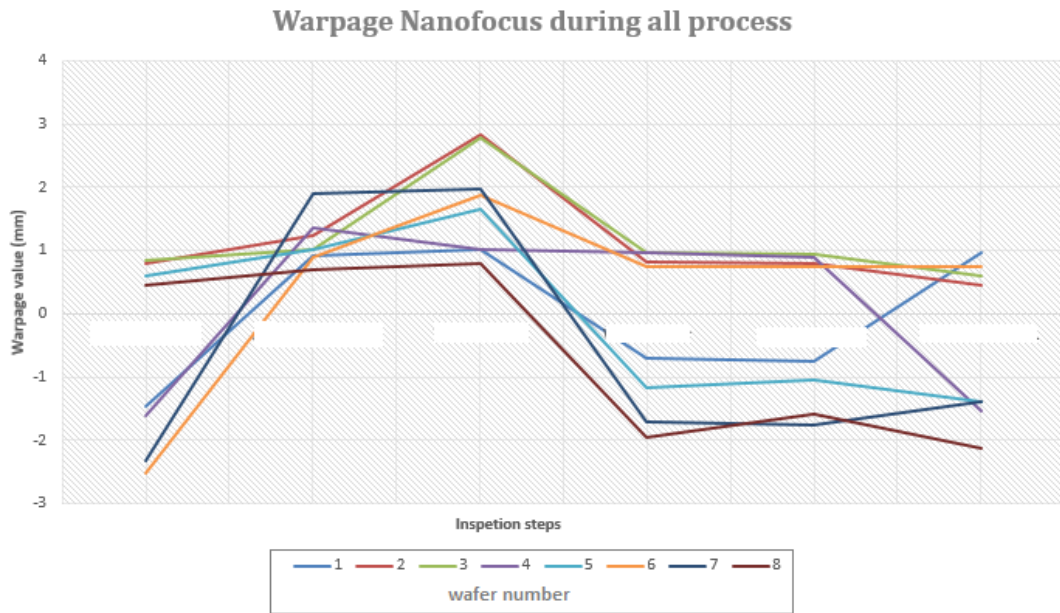


Figura 40 - Valores de *warpage* ao longo de todo o processo produtivo.

Apesar da experiência de confirmação ser uma das etapas da metodologia Taguchi, não foi possível realizar novos testes por uma questão de custos.

4 Conclusões

Nesta dissertação são reportados os resultados da aplicação da metodologia Taguchi ao estudo do *warpagem* de *wafers*, em particular nos processos de *mold* e *debond*.

Seguiu-se a perspetiva de melhoria da qualidade do produto e identificou-se a melhor combinação de fatores que reduzem a variabilidade, quer do processo de fabrico quer das condições de utilização.

A análise permitiu verificar que de todos os fatores analisados, a temperatura da *cool chuck* 1 é o fator principal para a alteração do *warpagem* no processo de *debond*. Concluiu-se também que o formato resultante da *wafer* influencia fortemente o seu manuseamento nos equipamentos. As *wafers* com *warpagem* negativo (forma côncava) representam uma grande dificuldade de manuseamento nos equipamentos.

Os estudos de capacidade realizados aos sistemas de medida vieram confirmar que os equipamentos usados no controlo do *warpagem* são capazes de controlar a medida em estudo. No entanto, o valor do empeno não é comparável entre equipamentos. Este resultado ficou a dever-se à diferente configuração de apoio das *wafers* nos dois casos.

Relativamente à análise dos processos de *mold/debond*, um estudo pormenorizado dos resultados obtidos, revelou que uma redução do empeno é possível com a alteração da temperatura da *cool chuck* 1. Concluiu-se que o melhor nível para este fator é o nível 2 (temperatura de 110 °C)

Este trabalho permitiu ainda a discussão e otimização dos parâmetros do processo de *debond* para o produto X.

5 Avaliação do trabalho realizado

5.1 Objetivos realizados

O objetivo deste estudo empresarial consistiu em compreender o *warpage* ao longo do fluxo produtivo e perceber melhor os casos que saem fora da distribuição normal, causando uma grande entropia na linha de produção.

Através da aplicação da metodologia Taguchi o objetivo proposto foi atingido, o que representa um excelente resultado para a área de *Recon*, no qual se enquadra o processo. Para além do objetivo principal há que referir que a realização desta metodologia permitiu adquirir um melhor conhecimento do *warpage* e melhorar significativamente os processos de *mold* e *debond*.

5.2 Limitações e Trabalho Futuro

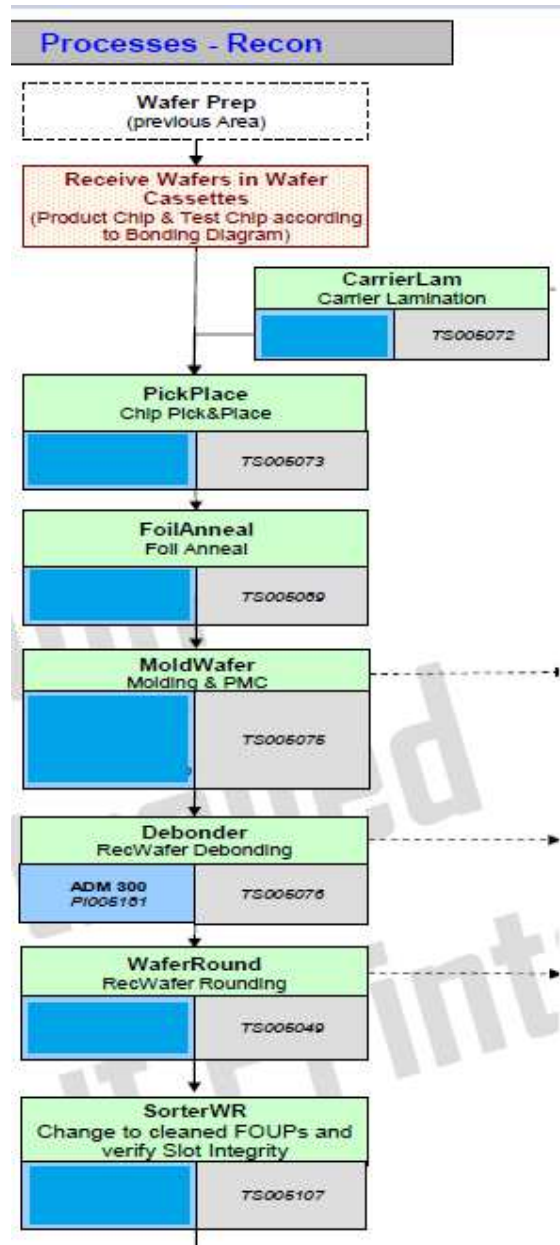
Como trabalho futuro e apesar do custo elevado associado a este tipo de testes, sugere-se a realização da experiência de confirmação para validar a reprodutibilidade dos resultados. Deve ainda ser considerado um estudo sobre possíveis ensaios para confirmação das tensões internas presentes no *mold compound*. A melhor compreensão do *warpage* assim como das variáveis de entrada dos processos de *mold* e *debond* tornar-se-á vital para poder produzir novos produtos em grande escala.

Referências

1. <http://www.nanium.com/>
2. Infineon Technologies, Embedded wafer level ball grid array (eWLB) Process Documentation, August 2009
3. Sequeiros, E. W., *Empenos em substratos durante o processo de encapsulamento de memórias*. Ciência & Tecnologia dos Materiais, 2009.
4. http://www.semi.org/eu/sites/semi.org/files/docs/5_Yole_Nanium%20Workshop.pdf
5. Molding Compound, Purchase Specification from Nanium S.A.
6. MTI Instruments Inc. Thickness, Shape and Flatness Measurement of Semiconductor Wafers. 2013 [consultado em 12-01-2014]; Disponível em: http://www.mtiinstruments.com/mtiuniversity/appnotes/mtiuniversity-appnotes-wafer_measurement.aspx.
7. Japan Electronics and Information Technology Industries Association, *JEITA ED-7306: Measurement methods of package warpage at elevated temperature and the maximum permissible warpage 2007*: Tokyo.
8. JEDEC, *JESD22-B112A: Package Warpage Measurement of Surface-Mount Integrated Circuits at Elevated Temperature 2009*: Arlington.
9. Ding, H., I. C. Ume, J. Zhang, et al., *Integrated hardware and software for improved flatness measurement with ATC4.1 flip-chip assembly case study*. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2005.
10. <http://www.Nanofocus.com/>
11. <http://www.ielm.ust.hk/dfaculty/ajay/courses/ielm317/lecs/robust/robustdesign1.pdf>
12. http://pt.wikipedia.org/wiki/Genichi_Taguchi
13. Pinto, D., *Métodos Taguchi*, Nanium S.A, Abril 2014
14. Ross, Phillip J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill, 1988
15. Moita, N. F., *Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de Moldes para injeção de plásticos*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2007.

16. Gobetto, Marco, *Operations management in automotive industries*, Springer series in advanced manufacturing, 2014
17. Deborah J. Hochstein, Azmi Bin Ahmad, Robert E. Magowan, *Teaching the Taguchi Method of Experimental Design: Design and Testing of Concrete Mixes*, The University of Memphis
18. Genichi Taguchi, *Taguchi - Engenharia da qualidade em sistemas de produção*, McGraw-Hill, 1990
19. *Measurement systems analysis - MSA Fourth Edition*, Chrysler Group, Ford Motor and General motors, June 2010.
20. Hall, Andreia, Neves, Cláudia, Pereira António, *Grande Maratona de Estatística no SPSS*, Escolar Editora, 2011.

Anexo 1 Fluxograma do processo RDL (Recon)



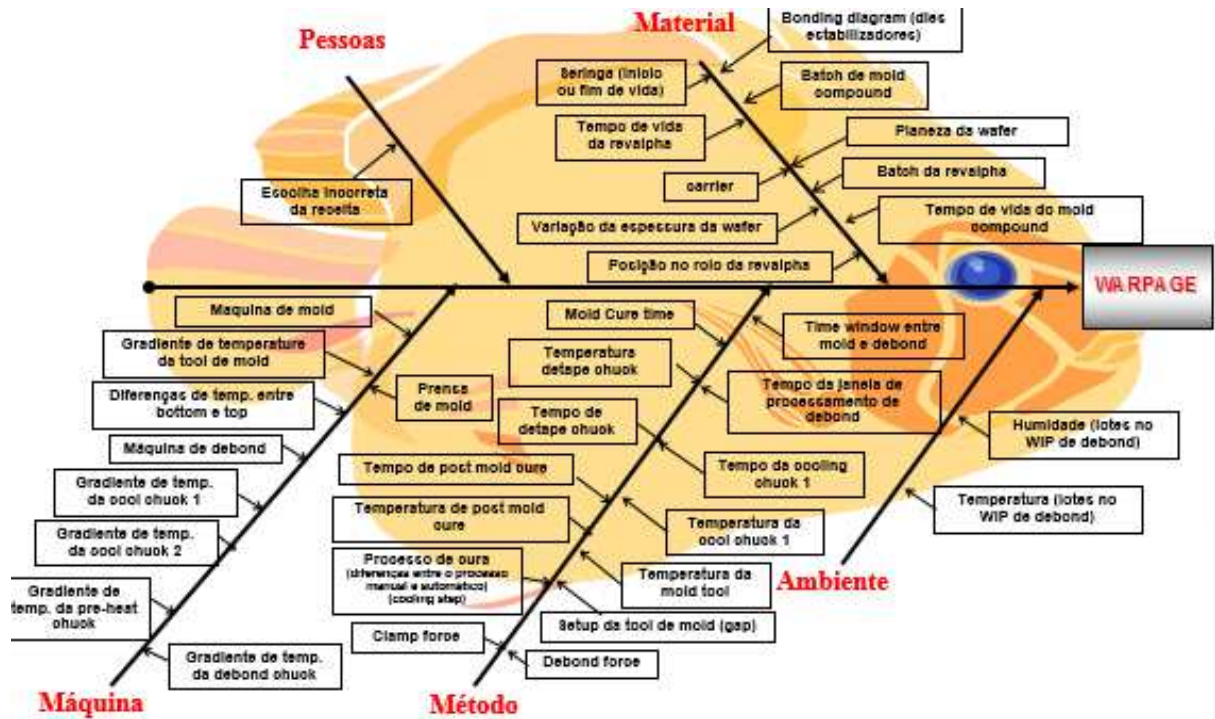
Anexo 2 Matrizes Ortogonais - Orthogonal Arrays (OA)

<i>Matriz</i>	<i>Finalidade (Experiências com:)</i>	
L-4 (2^3)	até 3 factores, 2 níveis	Matrizes de 2 níveis
L-8 (2^7)	até 7 factores, 2 níveis	
L-12 (2^{11})	até 11 factores, 2 níveis	
L-16 (2^{15})	até 15 factores, 2 níveis	
L-32 (2^{31})	até 31 factores, 2 níveis	
L-9 (3^4)	até 4 factores, 3 níveis	Matrizes de 3 Níveis
L-18 ($2^1, 3^7$) ^a	1 factor a 2 níveis e até 7 factores a 3 níveis	
L-27 (3^{13})	até 13 factores, 3 níveis	
L-16 (4^5) modificado	até 5 factores a 4 níveis	Matrizes de 4 Níveis
L-32 ($2^1, 4^9$) ^a modificado	1 factor a 2 níveis e até 9 factores a 4 níveis	

- Exemplos de matrizes ortogonais

L4	L9	L8	L12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 80px;"> <thead> <tr><th>No.</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="4" style="text-align: right;">Group</td></tr> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td></td></tr> </tbody> </table>	No.	1	2	3	1	1	1	1	2	1	2	2	3	2	1	2	4	2	2	1	Group					1	2		<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <thead> <tr><th>No.</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>5</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>6</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>8</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>9</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	No.	1	2	3	4	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	3	1	3	3	3	4	2	1	2	3	5	2	2	3	1	6	2	3	1	2	7	3	1	3	2	8	3	2	1	3	9	3	3	2	1	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 120px;"> <thead> <tr><th>No.</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>7</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>8</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td colspan="8" style="text-align: right;">Group</td></tr> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	No.	1	2	3	4	5	6	7	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	3	1	2	2	1	1	2	2	4	1	2	2	2	2	1	1	5	2	1	2	1	2	1	2	6	2	1	2	2	1	2	1	7	2	2	1	1	2	2	1	8	2	2	1	2	1	1	2	Group									1	2	3					<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 150px;"> <thead> <tr><th>No.</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>7</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>8</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>9</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>12</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	10	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	11	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1
No.	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
2	1	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3	2	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
4	2	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Group																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
No.	1	2	3	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2	1	2	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
3	1	3	3	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
4	2	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
5	2	2	3	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
6	2	3	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
7	3	1	3	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
8	3	2	1	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
9	3	3	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
No.	1	2	3	4	5	6	7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
2	1	1	1	2	2	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
3	1	2	2	1	1	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
4	1	2	2	2	2	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
5	2	1	2	1	2	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
6	2	1	2	2	1	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
7	2	2	1	1	2	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
8	2	2	1	2	1	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Group																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	1	2	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
10	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
11	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										

Anexo 3 Diagrama Ishikawa



Anexo 4 Exemplo da alocação dos fatores à matriz

Exemplo com 9 fatores (A,B,C,D,E,F,G,H,I) a 2 níveis com 4 interações (AxG, AxH, HxG).

Logo, o cálculo deverá ser realizado da seguinte forma:

Graus de liberdade das variáveis: A,B,C,D,E,F,G,H,I

$$V_{GL} = 9 \times (2-1) = 9$$

Graus de liberdade da interação: A x G, A x H, H x G

$$I_{GL} = 4 \times (2-1) \times (2-1) = 4$$

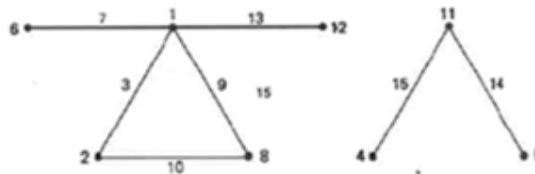
Número total de graus de liberdade:

$$TGL = 9 + 4 = 13$$

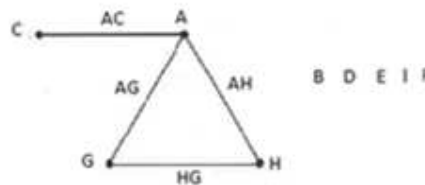
Deste modo, e tendo em conta a expressão para a escolha de matrizes: L_x , com $x \geq TGL$, é necessário pelo menos uma matriz ortogonal L_{16} .

Para a associação dos fatores e interações à matriz ortogonal, deve-se cumprir o seguinte procedimento:

1. Escolher o gráfico linear pretendido que corresponde às necessidades da experiência.
2. Selecionar o gráfico padrão mais apropriado e que se aproxime do gráfico linear pretendido.



3. Combinar o gráfico pretendido com o gráfico padrão.



4. Transportar o gráfico pretendido para a matriz ortogonal.

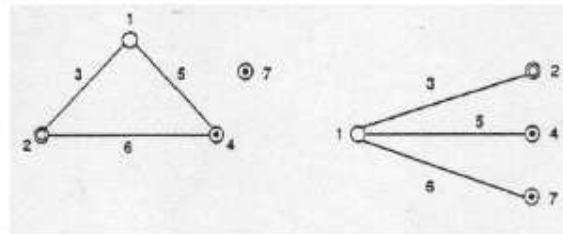
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	G	AG	D	E	C	AC	H	AH	HG	F	I	B		

Anexo 5 Matriz ortogonal e gráficos lineares

Matriz ortogonal L8

No.	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
Group	1	2	3				

Column	1	2	3	4	5	6	7
(1)	3	2	5	4	7	6	
(2)		1	6	7	4	5	
(3)			7	6	5	4	
(4)				1	2	3	
(5)					3	2	
(6)						1	
(7)							



Anexo 6 Procedimento de medição do Warpage

Assunto: Nanofocus: Procedimento de Medição de Warpage e Tratamento de Dados (medição em mesa)	Categoria: Procedimentos <input checked="" type="checkbox"/> Alterações equipamento <input type="checkbox"/> Estudo de um problema <input type="checkbox"/>	Related Documents: Sim <input type="checkbox"/> Não <input checked="" type="checkbox"/> (Pxxxxxx)	B C D E
--	--	---	------------------

1) Efectuar as medições utilizando o template e seleccionando "File -> Repeat Measurement". Utilizar todos os parametros que aparecem predefinidos no step "Measurement" da janela "Scan Wizard" e fazer "Next".

2) Utilizando o joystick, colocar a mesa numa posição frontal que permita a colocação da wafer sem deslizamento. Colocar a wafer na mesa do Nanofocus de acordo com a Fig-1. Utilizando o joystick, colocar a mesa numa posição identica à posição inicial. Inserir os valores X=2.5mm, Y=2.5mm e clicar em "ABS". Esperar que a mesa se movimente para estas coordenadas. Fazer "Next" para passar ao step seguinte.

3) Utilizar todos os parametros que aparecem predefinidos nos vários steps da janela "Scan Wizard": "Sensor", "Information" e "Finish". Fazer "Next" para passar para o step seguinte.

4) Após a medição terminar gravar o ficheiro ".oms" utilizando o formato <LOTE>_<STEP>_<SLOT#> na pasta F:\Medições Nanofocus.

5) Tratamento de dados após medições - Eliminação das componentes do histograma referentes à mesa do Nanofocus.

- 1- Pressionar o botão direito do rato com o cursor sobre a barra e seleccionar a opção "Histogram".
- 2- Arrastar a barra azul inferior até uma posição central entre as barras relativas às componentes da mesa e da wafer. Clicar no botão "Set Zero".
- 3- Inserir o valor 99.9% no indicador direito. Clicar no botão "Set Zero".
- 4- Inserir o valor 0.1% no indicador esquerdo. Clicar em "OK".
- 5- O valor final de warpage é o valor maximo da escala de cor.


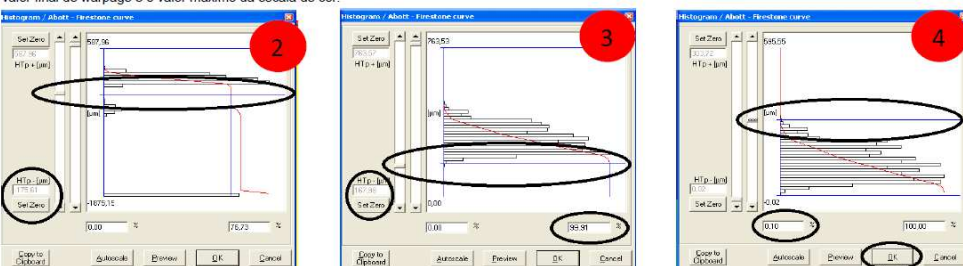
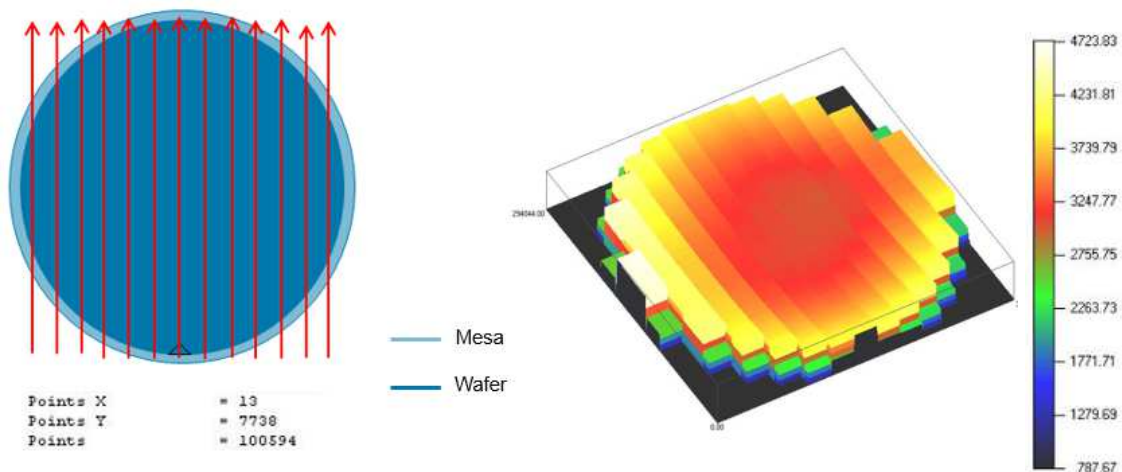


Fig-1



Procedimento de medição do warpage no equipamento Nanofocus:

- Demonstração do percurso de deslocação do laser pela wafer (lado esquerdo da imagem).
- Resultado final da medição do warpage numa imagem 3D (legenda em μm) (lado direito da imagem).



Anexo 7 Procedimento dos estudos de GR e GR&R

A realização do estudo GR&R (*ANOVA Gauge Repeatability & Reproducibility*) segue um conjunto de regras:

- Deve incluir todos os elementos do processo de medida tais como, operadores, peças e outros.
- As peças (ou amostras) devem representar a gama completa da variação do processo (sejam “bons” ou “rejeitados” de acordo com as especificações).
- Cada peça deve ser medida várias vezes em sequência aleatória por cada operador, usando o mesmo instrumento.

Trata-se de uma medição automática em toda a superfície da *wafer*. A colocação e o alinhamento da *wafer* são feitos manualmente pelo operador.

Anexo 8 Conversão da matriz ortogonal associando os fatores, interações e níveis

Após a seleção da matriz pretendida foram associados os fatores e interações escolhidos. Para cada um dos fatores e interações foram definidos 2 níveis.

Na primeira tabela estão representados os níveis dos fatores e interações por *wafer*. Na segunda, estão apresentados os parâmetros de cada fator a utilizar em cada *wafer*.

	A	B	AxB	C	D	E	F
	T. de PMC (°C)	t. de PMC (min.)		Mold Cure Time (min.)	Batch	T. da tool de mold (°C)	T. da Cool Chuck 1 (°C)
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

	A	B	AxB	C	D	E	F
	T. de PMC (°C)	t. de PMC (min.)		Mold Cure Time (min.)	Batch	T. da tool de mold (°C)	T. da Cool Chuck 1 (°C)
1	130	30	1	400	1	115	60
2	130	30	1	800	2	130	110
3	130	60	2	400	1	130	110
4	130	60	2	800	2	115	60
5	160	30	2	400	2	115	110
6	160	30	2	800	1	130	60
7	160	60	1	400	2	130	60
8	160	60	1	800	1	115	110