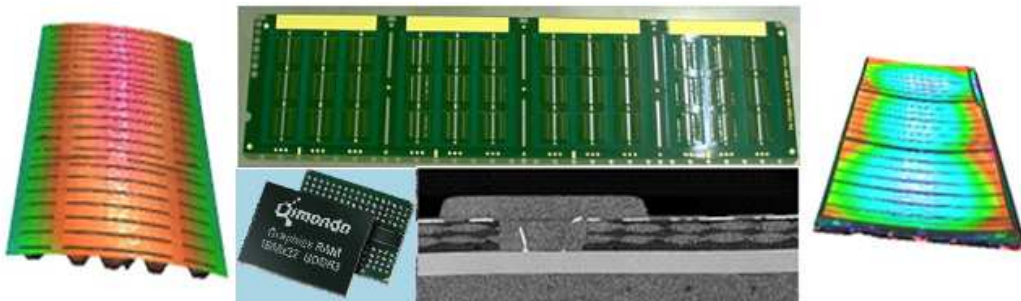


EMPENOS EM SUBSTRATOS DURANTE O PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO DE MEMÓRIAS



Tese de Mestrado Integrado

30-07-2008

Elsa Wellenkamp de Sequeiros

Orientadores:

Prof. Doutor Manuel Vieira (FEUP)

Engº Rui Batista (Qimonda)

Doutora Isabel Barros (Qimonda)

Júri:

Prof. Doutor Aníbal Guedes (UM)

Prof. Doutor José Tinoco Cavalheiro (FEUP)

Prof. Doutor Manuel Vieira (FEUP)

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Doutor Manuel Vieira a orientação e o acompanhamento dedicados a este trabalho.

À Qimonda PT na qualidade de empresa na qual se pode concretizar este trabalho. Agradeço: ao Eng^o Rui Batista o desafio, a orientação, o acompanhamento dedicados a este trabalho e a sua disponibilidade; à Doutora Isabel Barros as dicas, a orientação e sugestões, assim como a disponibilidade prestada durante a realização deste estudo; e, ao Eng^o Pedro Caldelas todo o acompanhamento e orientação.

Um obrigado ao técnico Carlos Maio e ao técnico Miguel Silva pela disponibilidade e sobretudo pela ajuda na última experiência deste estudo. Um obrigado ainda, a todos os outros que de uma forma ou outra tornaram possíveis este trabalho e que me ajudaram nas mais diversas coisas: Eng^o Nuno Vieira, Eng^o Leonel, Eng^a Sílvia, Eng^o Luís Lança, Eng^o Mimoso e a todos os operadores e supervisores.

Agradeço ainda: à família, que nunca mais acaba, quer de um lado quer do outro, que de uma forma ou de outra me ajudaram e apoiaram; a todos os meus amigos colegas pela moral prestada; e, a todos os outros amigos espalhados por ai que tanto ajudaram sem saber.

A todos o meu muito obrigado.

Índice

i.	Resumo	
ii.	Abstract	
iii.	Motivação/Objectivos	
1.	Introdução.....	1
1.1.	Processo de Assembly.....	3
1.2.	Materiais	9
1.3.	Factores susceptíveis de criar empenos	13
2.	Procedimento.....	17
2.1.	Produto.....	17
2.2.	Equipamento /Medição de empenos.....	19
3.	Etapas do estudo.....	20
3.1.	Influência das etapas do processo	20
3.2.	Factor fornecedor.....	30
3.3.	Factor tempo e condições de armazenamento	33
3.4.	Factor anti-warpage	36
3.5.	Arrefecimento forçado.....	38
3.6.	Estudo da formulação	42
4.	Discussão geral de resultados	46
5.	Conclusões	48
6.	Considerações finais e sugestões para estudos futuros	49
7.	Glossário.....	50
8.	Referências bibliográficas	54

Resumo

Na produção de memórias, os empenos (warpage) devem-se sobretudo a diferenças no coeficiente de expansão térmica dos materiais que constituem as memórias: *die*, substrato, adesivo, fios de ouro, *epoxy mold compound* (EMC) e bolas de solda. Contudo, os empenos (tipicamente com valores de décimas de milímetro) variam com uma diversidade de factores: design do produto, dimensões dos materiais utilizados na montagem de memórias, etapas do processo, equipamentos, etc. Considerando o processo de *Assembly* da Qimonda PT, foram efectuadas diversas experiências num produto (512M T80 84) de forma a atingir os objectivos propostos. As medições do nível de empenos nos substratos foram efectuadas recorrendo ao perfilómetro *3D NanoFocus*. Após as medições ao longo de todo o processo de *Assembly*, aferiu-se que as etapas críticas, isto é, com mais influência no nível de empenos e mais impacto em produção, eram: *Mold*, *Mold Cure* e *Solder Ball Attach* (SBA). Esta foi primeira e a mais demorada fase do estudo. Todas as avaliações seguintes, relacionadas com a identificação de outros factores que pudessem influenciar o nível de empenos, puderam assim ser restringidas às medições efectuadas apenas a seguir às etapas mais críticas. Identificaram-se, assim, alguns factores que influenciam o nível de empenos: tempo e condições de armazenamento (armários de nitrogénio ou condições normais da sala limpa) entre as etapas críticas do processo: sistema *anti-warpage* e alterações na formulação de EMC. O aumento de tempo entre as etapas críticas do processo conduziu a um aumento do nível de empenos (em condições ambientais de sala limpa). O armazenamento dos lotes (entre etapas) em armário de nitrogénio reduziu o nível de empenos. A não activação (falha) do sistema de *anti-warpage* pode levar a um incremento do nível de empenos na ordem dos 200µm. Alterações no módulo de contracção do EMC (induzidas por uma variação da dimensão média das fibras) alteram o nível de empenos. Para 3 produtos de diferente ocupação média de silício (%SOR), a utilização da formulação de EMC com menor módulo de contracção induziu melhorias expressivas no nível de empenos, durante as etapas críticas. Outros factores testados não demonstraram impacto significativo no nível de empenos: fornecedores de substratos e arrefecimento forçado após a etapa de *Mold Cure*. No entanto, o arrefecimento forçado mostrou ter impacto positivo na produção (por redução do *cycle time*).

Abstract

Warpage of electronic memories during manufacture may be caused by differences in the coefficient of thermal expansion of the materials used: die, substrate, adhesive, gold wire, epoxy mold compound (EMC) and solder balls. However, warpage is greatly affected by package design, dimensions of materials used in the assembly, process assembly steps, equipments, etc. Taking into consideration the Assembly process at Qimonda PT, several experiences were done, in order to reach the goals proposed in this study. Warpage of substrates was measured by profilometry 3D *Nanofocus*. After measuring substrates during the Assembly process flow, the results revealed that the critical steps, i.e., steps of the assembly process that have a larger impact on warpage and influence more manufacturing, were: Mold, Mold Cure and Solder Ball Attach (SBA). This was the first part of the study as well as the longest one. In all other experiences related with the identification of factors that might affect warpage, measurements were limited to these critical steps. It was concluded that time and conditions of storage (clean room conditions and compartments under nitrogen flow), anti-warpage system and modifications on formulations of EMC were some of the factors that may affect warpage. This increased with time between the critical steps (in clean room conditions). Storage of the lots in compartments under nitrogen flow decreases warpage. Failure of anti-warpage can induce an increment of 200 μ m in warpage. Modifications in EMC shrinkage (by varying fillers cut dimensions) change the level of warpage. For 3 packages of different Silicon Occupation Ratio (%SOR), the use of EMC formulation with minor shrinkage improved warpage in the critical steps. Other factors tested have not showed any impact on warpage: different providers of substrates and forced cooling after Mold Cure. But, on the other hand, the use of forced cooling decreased the cycle time and may increase productivity.

Motivação/Objectivos

O estudo presente foi realizado no âmbito do protocolo FEUP-Qimonda. Devido à complexidade do problema de empenos em substratos durante o processo de encapsulamento de memórias e ao impacto deste em produção na Qimonda PT surgiu a necessidade efectuar um trabalho de pesquisa e medições. Com este pretendeu-se identificar quais as etapas do processo *Assembly* (processo de encapsulamento de memórias e RAM/DRAM) que mais influenciam o nível de empenos nos substratos e identificar possíveis factores que pudessem influenciar o nível de empenos ao longo do processo de *Assembly*. Uma caracterização mais aprofundada do problema de empenos e identificação de factores pode levar a conclusões conducentes a futuros estudos e optimizações com base em DOE's (desenhos de experiências), que possibilitem um controle/diminuição de empenos dos substratos ao longo do processo de *Assembly*.

1. Introdução

A Qimonda é uma empresa multinacional, líder mundial no fornecimento de memórias, com um grande leque de produtos DRAM (*"Dynamic Random Access Memory"*) / RAM (*"Random Access Memory"*). Estes produtos, de que se apresenta um exemplo na figura 1, têm aplicação diversificada, com incidência na área da computação, infra-estruturas gráficas e comunicações móveis. A empresa conta a nível mundial com 13500 trabalhadores tendo efectuado, no ano de 2007, 3,61 biliões de euros em receitas. Segundo a filosofia da própria empresa, a sua essência assenta em três palavras-chave: criatividade (no constante desafio das regras e fronteiras pré-estabelecidas, direccionando-se ao futuro), paixão (implícita na busca de novas ideias e na sua real aplicação) e rapidez (na antecipação de oportunidades e na sua eficiente execução). Conta com cinco locais de produção, um deles em Portugal (Qimonda PT), em três continentes, bem como seis departamentos de desenvolvimento e investigação [1].



Fig.1 – À esquerda uma memória RAM, produto FBGA; e à direita uma memória DRAM, produto TSOP [2].

Na Qimonda PT, é montada e testada 7% da produção mundial de memórias DRAM/RAM. A produção na Qimonda PT divide-se em 2 grandes áreas de manufactura, representadas pelos departamentos de *Assembly Operations (AO)*¹ e *Test Operations (TO)*; possuindo ainda duas áreas menores, denominadas de RDL (*redistribution layer*) e *Wafer Test*, para além de áreas de suporte.

O presente estudo foi desenvolvido na área de *Assembly*, onde são encapsuladas as memórias DRAM/RAM, existindo dois tipos diferentes de montagem (ilustrada na figura 2): TSOP (*Thin Small Outline Package*) e BOC (*board-on-chip*). No primeiro, o *die* é montado tendo por base uma *leadframe* (suporte metálico) e, no segundo, tem por base um substrato. O substrato em causa é bastante complexo, consistindo em camadas alternadas de materiais poliméricos com

¹ Ao longo deste trabalho foram mantidas as designações originais adoptadas na indústria de semicondutores. No fim do trabalho encontra-se um glossário com os significados de todas estas designações e a nomenclatura utilizada.

fibras de silício e camadas metálicas. Este substrato tem a mesma função que a *leadframe*, isto é, servir de suporte para um conjunto de componente [2].

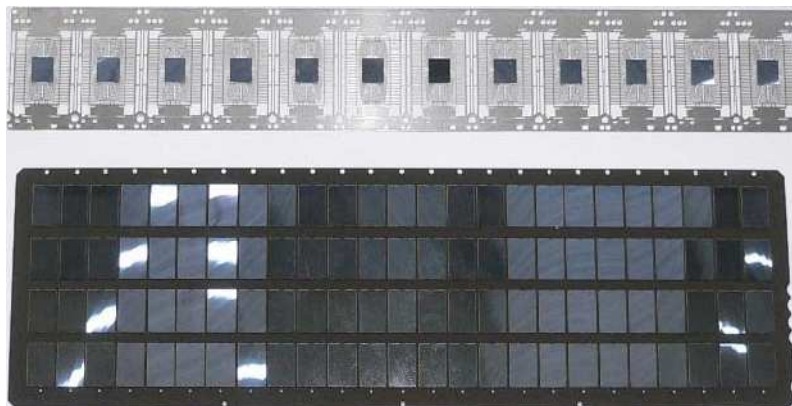


Fig.2 – *Leadframe* versus substrato, com os *dies* já colocados [2].

Uma memória é composta por diversos materiais: *epoxy mold compound* (EMC), *die*, adesivo, substrato, fios de ouro e bolas de solda (figura 3) [2]; 90% do encapsulamento de semicondutores é efectuado recorrendo ao uso de compósitos de matriz polimérica, devido ao seu baixo custo, fácil processamento e às suas excelentes propriedades eléctricas [3]. O encapsulamento é efectuado para proteger os *dies* dos ambientes adversos e dos choques mecânicos, para promover uma estrutura suporte e o isolamento eléctrico [4].

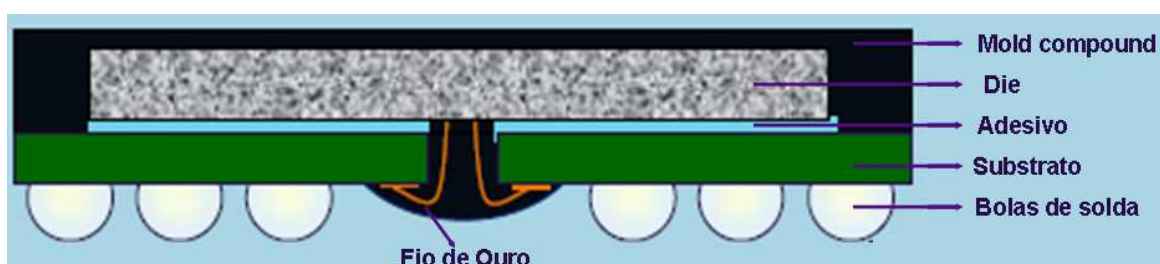


Fig.3 – Secção transversal de uma memória DRAM, identificação dos materiais [2].

Geralmente, os materiais de matriz polimérica usados possuem um coeficiente de expansão térmica (CTE) quatro a seis vezes maior que o do *die* de sílica, que possui o circuito microelectrónico [2]. A diferença de CTE's nos diferentes materiais que constituem uma memória, juntamente com condições de processamento, temperatura e pressão, faz com que ocorram empenos no substrato durante o encapsulamento dos *dies* [3].

Estes empenos (distorções) são hoje em dia um dos maiores problemas encontrados na indústria do encapsulamento de componentes microelectrónicos. Os empenos existem com alguma extensão ao longo do processo de encapsulamento de memórias DRAM/RAM, desde as *wafers* até à memória final singularizada, pronta para ir para o cliente. No entanto, é durante o processo de encapsulamento de memórias, usando substratos FBGA (*Fine Ball Grid Array*), que os empenos são mais críticos; é necessário alterar parâmetros, em algumas etapas, para que o produto seja processável. Por vezes, o nível de empenos é de tal modo elevado que provoca vários problemas durante o processo tais como: desalinhamento entre o substrato e o *die*; colocação errada das bolas de solda, o que se irá traduzir num mau contacto; indução de fissuras durante ciclos térmicos, etc. Estes problemas traduzem-se por vezes em produtos não conformes [5].

No entanto, cada caso é um caso, pois este problema depende de diversos factores: design do produto; dimensões e tipos de substrato; geometrias, espessuras e propriedades dos materiais que constituem um componente; processo de fabrico, condições de temperatura e pressão, ao longo das diversas etapas; e muitos outros (equipamentos, etc.) [6].

1.1. Processo de Assembly

A indústria de componentes microelectrónicos e de computação é possivelmente uma das mais desenvolvidas tecnologicamente. Os processos envolvidos são de elevada tecnologia e bastante otimizados, de forma a melhorar custos de produção. A produção de memórias não é excepção, sendo um dos componentes microelectrónicos mais complexos e que tem gerado investimentos avultados na área da investigação. O seu fabrico passa por várias etapas, cuidadosamente desenvolvidas com vista a otimizar a produção em quantidade e qualidade [7,8].

Na Qimonda PT, a produção de memórias é efectuada a partir da recepção dos *wafers* vindos das fábricas de *front-end* (início da linha de produção de memórias). A partir desta, são efectuadas 12 etapas até que o produto esteja finalizado, seguindo-se o processo de teste (Test Operations), a marcação e o embalamento (MSP) [7,8].

Para melhor compreender a complexidade do processo e o problema de empenos, encontram-se descritos abaixo os passos do processo de *Assembly*.

1 - Wafer test: teste das unidades ainda em *wafer*. Nesta etapa, os *wafer's* são testados electronicamente para verificar a integridade e bom funcionamento dos *dies*. Os *wafers* são placas circulares de silício com 200 ou 300mm de diâmetro (figura 4), em que estão presentes centenas de pequenos *dies*, com milhões de transístores, gravados fotolitograficamente. Porém, nem sempre esta etapa é realizada na Qimonda PT (fábrica de *back-end*); usualmente, é efectuada em fábricas de *front-end* [2,7].

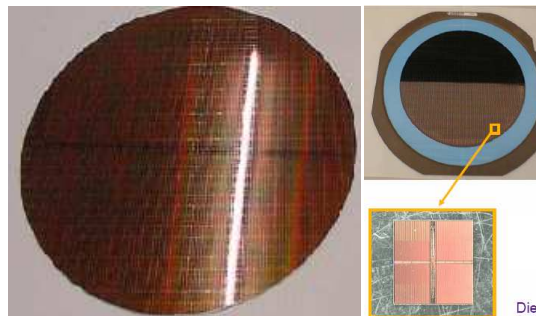


Fig.4 – À esquerda *wafer* e à direita um *die* pertencente a um *wafer* [7].

2 - Pre-assembly: consiste na diminuição de espessura do *wafer* por desbaste e no corte deste por *laser* em unidades, *dies* [7].

3 - Printing: é efectuada nos substratos e consiste na colocação do adesivo por stencil, como se pode ver na figura 5. Este adesivo serve para colar posteriormente o *die* ao substrato [7].

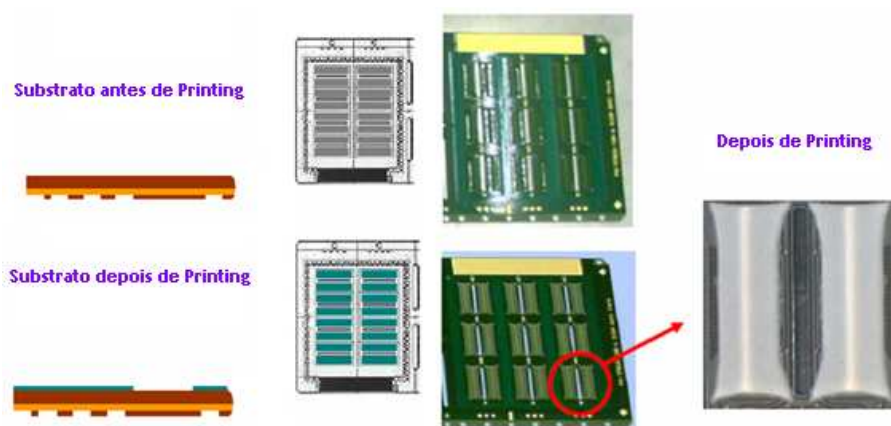


Fig.5 – Etapa de colocação de adesivo no substrato (*Printing*) [7].

Esta etapa possui um último passo de cura, *B stage cure*, que serve para eliminar os solventes e estabilizar dimensionalmente o adesivo. O *B stage Cure* é efectuado num forno, segundo um perfil de tempo e temperatura dividido em 3 etapas: pré-aquecimento, aquecimento e arrefecimento [2].

4 - Die-bond: colocação dos *dies* no substrato em cima da área de adesivo, por aplicação de pressão e calor num curto espaço de tempo, apresentando o aspecto final ilustrado na figura 6 [2,7].

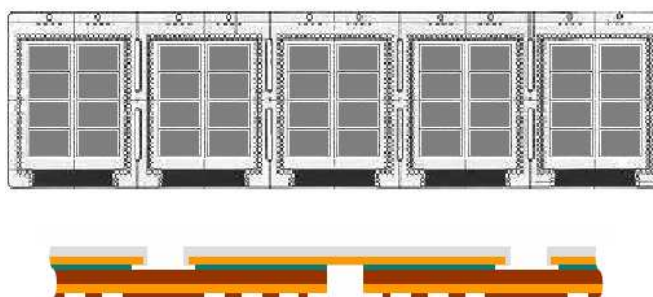


Fig.6 – Colocação do *die* no substrato [7].

5 - Cura de Bond: ciclo de cura após *Die-Bond* à temperatura de 175°C, durante 4 horas. Esta etapa tem como finalidade a cura do adesivo, obtendo este a sua estabilidade física/química final, e, eliminar algum solvente residual da etapa de *Printing*, assim como humidade na interface *die*-adesivo [2,7].

6 - Wire-Plasma: limpeza das superfícies através do processo de plasma antes da etapa de *Wire-Bond*. Nesta são eliminadas as possíveis contaminações orgânicas que podem afectar as ligações eléctricas a efectuar [7].

7 - Wire-Bond: esta etapa consiste em estabelecer uma conexão eléctrica entre o *die* e o substrato, como está ilustrado na figura 7 [7].

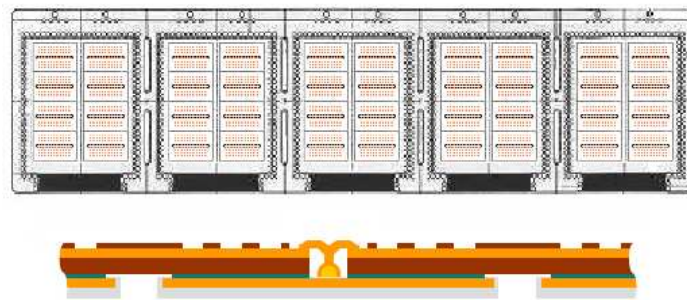


Fig.7 – Substrato após *Wire-Bond* [7].

Esta conexão é estabelecida por meio de um fio de ouro recorrendo a um eléctrodo, um capilar, ultra-sons, temperatura e força. Inicialmente, usando o eléctrodo derrete-se a ponta do fio de ouro por meio de uma descarga de 400 volts que ioniza o ar; com ajuda de um capilar esta ponta é pressionada contra o *pad* (contacto no substrato), como se pode ver na figura 8. Aplicando-se no final temperatura e ultra-sons cria-se uma interface intermetálica entre o fio de ouro e o *pad* [2].

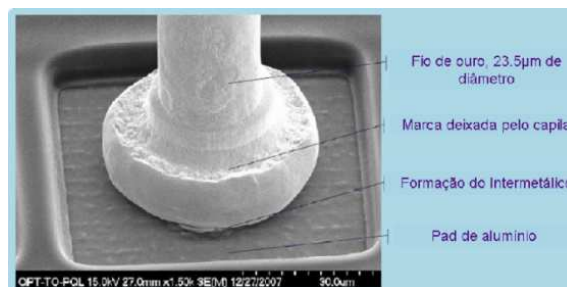


Fig.8 – Ligação do fio de ouro ao substrato [2].

8 - Plasma pré-Mold: eliminação de potenciais contaminações orgânicas e preparação das superfícies para melhor adesão do EMC ao *die* e ao substrato. Este processo é efectuado através de uma mistura de gás ionizado a baixa pressão, como se representa na figura 9 [2,7].

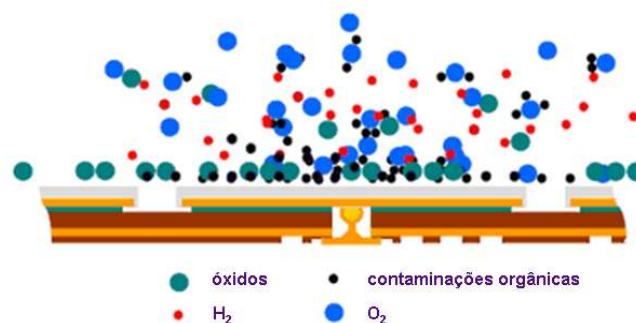


Fig.9 – Substrato a ser actuado durante o processo de plasma [2].

9 - Mold: injeção de EMC, que vai cobrir os *dies* e as ligações eléctricas efectuadas entre o substrato e os *dies* (*channel bond*), ficando o substrato com o aspecto apresentado na figura 10 [7].

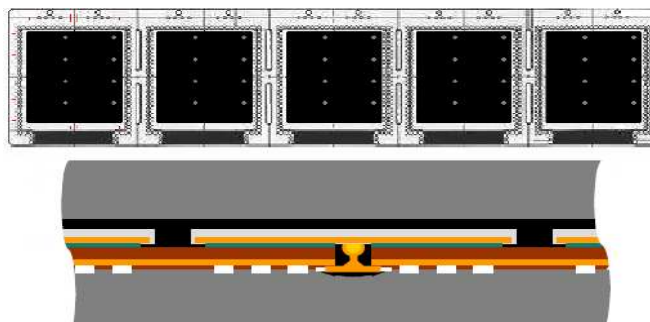


Fig.10 – Substrato depois da etapa de *Mold* [7].

10 - Mold Cure: estabilização e cura final do EMC a 175°C, durante 2 horas, num forno de estufa. Nesta etapa é feita a eventual eliminação de humidade [2,7].

11 - Plasma BP: eliminação de potenciais contaminações orgânicas e preparação das superfícies dos *ball pads*, para a colocação de fluxo e, posteriormente, das bolas de solda. Operação semelhante ao *Plasma Clean* [7].

12 – Solder Ball Attach (SBA): colocação das bolas de solda sobre os *pads* de forma a criarem-se contactos eléctricos e mecânicos (figura 11) [2,7].

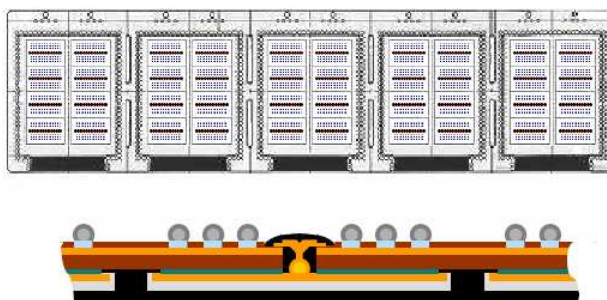


Fig.11 – Substrato após a etapa de SBA [7].

Numa primeira fase, deposita-se o fluxo nos *ball pads*, onde em seguida são colocadas as bolas de solda. Posteriormente os substratos entram forno de reflow, que consiste num ciclo

térmico com 5 etapas. Durante o ciclo térmico ocorre a união entre os *ball pads* e as bolas de solda, pelo processo de brasagem, com a formação de uma interface intermetálica [2].

13 - Singulation: corte dos substratos e singularização das unidades, sendo este corte efectuado mecanicamente e arrefecido por meio de água, como representado na figura 12 [7].

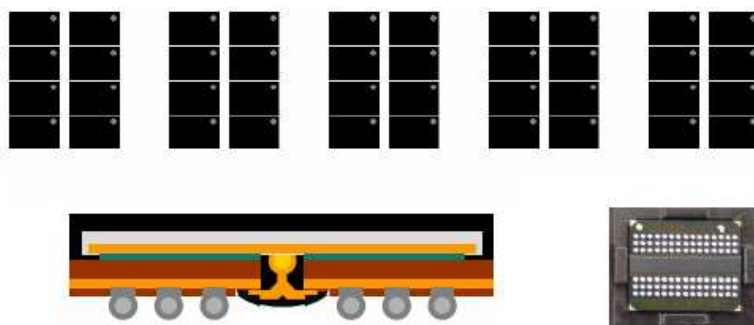


Fig.12 – Substrato em cima e memória em abaixo, após processo de *Singulation* [7].

14 - Burn-in: teste de flutuações térmicas, com o intuito de testar um ambiente de operação real a que os componentes vão ser sujeitos [7].

15 - Test: teste eléctrico, em que é avaliado o comportamento das memórias, quando sujeitas a impulsos eléctricos [7].

16 - Mark Scan and Pack (MSP): verificada então a conformidade, os componentes seguem para a etapa final, que consiste numa inspecção 3D e na marcação dos mesmos (com um número e logótipo gravável pela empresa) e no seu empacotamento [7].

As etapas do processo de *Assembly* ocorrem numa sala limpa de 10k (o número que antecede o k corresponde ao número máximo de milhares de partículas por pé cúbico, numa sala), do passo 1 ao 13; e numa sala limpa de 100K, do passo 14 ao 16 [7].

1.2. Materiais

Como anteriormente referido, uma memória é um componente microelectrónico bastante complexo, constituída por diferentes materiais:

- *Die*;
- Substrato;
- Adesivo;
- EMC;
- Fios de ouro;
- Bolas de solda.

Os materiais presentes numa memória, excepto as bolas de solda, encontram-se identificados na figura 13, imagem de um produto antes da etapa de SBA obtida por Microscopia Electrónica de Varrimento (MEV) [9].

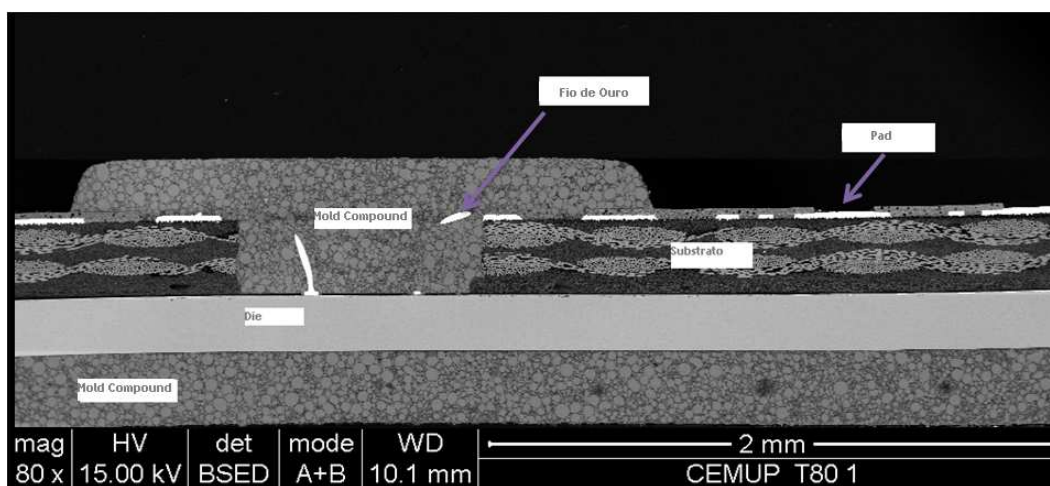


Fig.13 – Imagem em MEV da interface transversal do produto em estudo, após a etapa de *Mold* [9].

No processo de *Assembly*, os materiais representam 35% dos custos de produção final do produto. Na figura 14, encontra-se o peso que cada material tem para este custo [10].

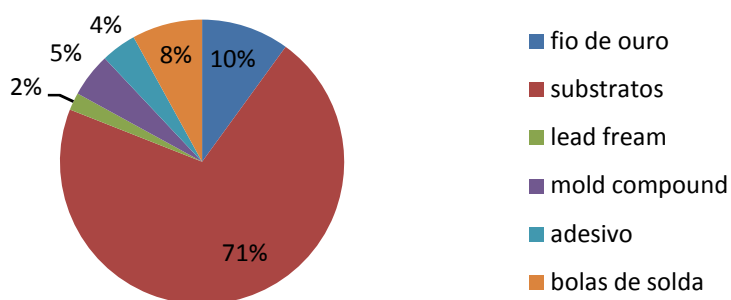


Fig.14 – Custos de materiais no processo de *Assembly* [10].

Em seguida será feita uma breve descrição dos diferentes materiais e constituintes para se perceber o sistema complexo que é uma memória e os efeitos que esta diversidade pode ter no empeno.

Substratos

Os substratos têm como função servir de suporte para um conjunto de componentes. A sua estrutura é complexa, consistindo numa máscara polimérica e numa sanduíche de metal - compósito - metal. A máscara polimérica, *solder resist*, com uma espessura de aproximadamente $30\mu\text{m}$, serve para proteger o substrato da oxidação. As camadas metálicas são o suporte condutor entre o *die* e as ligações estabelecidas com os outros componentes num módulo. Estas camadas são constituídas maioritariamente por cobre, material condutor. No entanto, estas camadas metálicas (figura16) são por vezes revestidas a níquel e ouro (materiais igualmente condutores), como se pode ver na figura 15, de forma a aumentar a resistência mecânica (Ni) e a resistência a oxidação (Au) [10].



Fig.15 – Contacto eléctrico no substrato, camada metálica e seu revestimento. Espessura de cada uma das camadas e função associada [10].

O interior da sanduíche, designado por *core*, é constituído por fibra de vidro impregnada em resina (figura16); esta camada confere ao substrato resistência mecânica e isolamento eléctrico, tendo uma espessura de 150-220 μm [10].

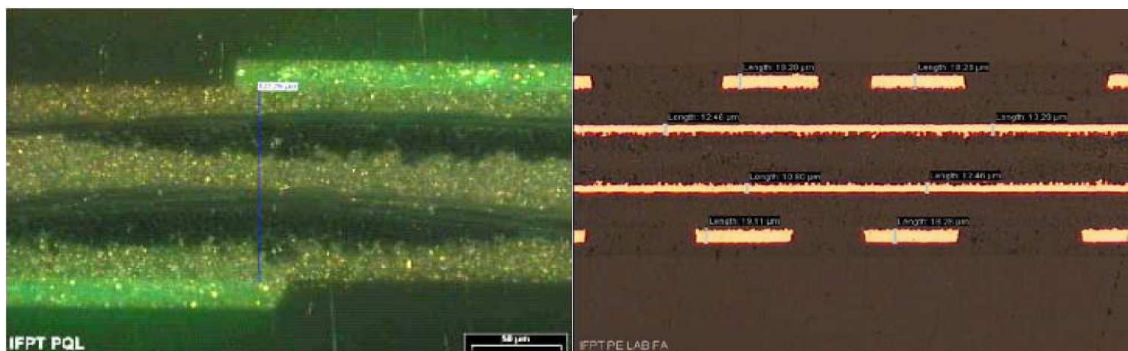


Fig.16 – Secções transversais da estrutura interna de um substrato; à esquerda *core* e *solder resist*; e à direita em destaque os contactos e as pistas, camadas metálicas [11].

Existem diversos fornecedores de substratos, verificando-se diferenças entre eles: diferentes geometrias na zona de alívio das tensões. A disposição das fibras de vidro no *core* também pode ser diferente [11].

Adesivo

O adesivo serve de interface entre o substrato e o *die*, ou seja, serve para colar o *die* ao substrato. O adesivo é composto por resina epoxídica, fibras, solventes e aditivos. Este é fornecido no estado pastoso sendo colocado sobre o substrato e sofrendo, posteriormente (como referido no ponto 1.1. deste trabalho) dois ciclos de cura. A primeira cura é apenas parcial, permitindo a molhabilidade total do *die*. Em termos de processabilidade, os ciclos de cura são críticos, podendo ocorrer em alguns casos a fissuração do adesivo como resultado da desgasificação irregular e absorção de humidade [10].

Fio de Ouro

O fio de ouro é composto por 99.99% de Au e possui um diâmetro de 23,5 μm . É utilizado ouro em vez de outros materiais condutores (alumínio ou cobre), devido a este possuir maior

conductibilidade e ductilidade, assim como boa resistência à oxidação. A desvantagem do ouro é o seu coeficiente de difusão elevado no alumínio, o que pode levar, em algumas condições, ao crescimento não uniforme de intermetálicos; por sua vez, isto pode induzir fragilização na junta [10].

Epoxy Molding Compound

O EMC tem como finalidade cobrir quer os fios de ouro expostos, quer o *die*, de forma a protegê-los dos ambientes adversos e de choques mecânicos e ao mesmo tempo permitir o manuseamento dos componentes e montagem em módulos. Este é composto por resina epoxídica (20%), endurecedor (10%), fibras de sílica (70%); e adições de catalisador (1%), agente desmoldante (<1%), modificadores (<5%) e outros aditivos (retardadores de chama, Br (<2%)) [10].

Cada um destes constituintes tem a sua finalidade e confere ao EMC as seguintes propriedades:

- As fibras dão as propriedades físicas básicas, como os módulos (E, G e K) e a condutividade térmica;
- O catalisador serve para acelerar o processo de cura;
- A resina epoxídica, conjuntamente com o endurecedor, confere molhabilidade, propriedades mecânicas e eléctricas, e estabilidade térmica;
- Os aditivos são diversos: desde retardador de chama a agentes colorantes, tendo cada um, como o seu nome indica, uma finalidade diferente [12].

Os parâmetros críticos do EMC são: viscosidade, temperatura de transição vítrea (T_g), CTE, resistência mecânica, módulo de contracção, condutividade térmica e eléctrica e absorção de humidade [10]. Alterando a formulação é possível alterar algumas destas propriedades; por exemplo, o CTE diminui com o aumento em volume de fibras [13].

Bolas de Solda

As bolas de solda permitem o contacto mecânico e eléctrico com outros componentes na montagem de módulos. Estas têm uma composição base de estanho, prata, cobre e níquel; e o seu diâmetro depende do produto, podendo ter 400, 450 ou 475 μ m. Os parâmetros críticos das bolas de solda são: a condutividade eléctrica, resistência à oxidação, resistência mecânica, geometria e rugosidade. Durante a etapa de SBA, é utilizado um outro material, o fluxo, que promove a brasagem entre o substrato e as bolas de solda [13].

1.3. Factores susceptíveis de criar empenos

Hoje em dia, a produção de memórias é efectuada em grandes quantidades. Para tal, são encapsuladas, ao mesmo tempo, várias memórias num substrato. No entanto, devido ao *design* (diversas memórias por substrato) e à tendência da diminuição de tamanho e espessura das memórias, criam-se empenos de grande extensão, induzidos pela não compatibilidade dos materiais ao longo do processo [14]. Os empenos são um dos maiores problemas na manufactura de produtos BOC pois uma planaridade razoável nos substratos é crítica para as etapas do processo de singularização das unidades e processos de soldabilidade (por exemplo, SBA) [13]. Durante o processo de *Assembly* da Qimonda PT (descrito no ponto 1.1 deste estudo), existem algumas etapas que são influenciadas negativamente pelo aparecimento de empenos (sendo em alguns casos necessária a paragem dos equipamentos). Ao que tudo indica (por experiências confirmadas em produção), os passos 10, 12 e 13 podem ser influenciados negativamente pela existência de empenos:

- Em *Mold*, os substratos ficam encravados, antes da moldação nas *magazines* (estrutura de suporte usado em produção para transportar os substratos) ou durante a própria moldação (vários passos dentro do equipamento);
- Em SBA, os substratos ficam encravados nos vários passos do processo, dentro do equipamento (guias), assim como a aplicação de fluxo não é uniforme e/ou ferramentas de manipulação não conseguem segurar os substratos (erro/falha de

vácuo). Havendo problemas na aplicação de fluxo, existem potencialmente falhas por *gold pad* (não existência da bola de solda no *pad*);

- Em *Singulation*, os substratos ficam encravados nos vários passos do processo, dentro do equipamento (guias), assim como as ferramentas de manipulação de substratos não conseguem segurar nos substratos (erro/falha de vácuo).

Os empenos são induzidos pela diferença de CTE's nos diferentes materiais que constituem um componente microelectrónico, juntamente com as condições de processamento [3]. São sobretudo as etapas do processo que possuem elevadas temperaturas e ciclos térmicos que vão influenciar a criação de empenos [5].

Num típico substrato o empeno pode ser positivo (*crying face*) ou negativo (*smiling face*), como ilustrado na figura 17 [13].



Fig.17 – Caracterização dos empenos pela sua curvatura [15].

A curvatura e o nível que um empeno adquire dependem de variados factores como: design, geometrias e propriedades dos materiais que constituem o produto; processo e seus parâmetros, assim como o equipamento [4].

Hoje em dia tende-se a que um substrato incorpore o maior número de componentes possíveis, diminuindo o espaçamento entre estes o que faz com que haja menores zonas de alívio de tensões e por conseguinte maior nível de empenos [14]. Outro factor que influencia o nível de empenos é a espessura e a dimensão do *die*; variando estes factores varia-se o nível de empenos. De produto para produto o design, a quantidade de *dies*, o tipo/espessura dos materiais utilizados durante o encapsulamento, bem como os parâmetros de processo influenciam consideravelmente o nível de empenos [5]. Usualmente, subdividem-se os produtos em três classes: baixa, média e alta ocupação de silício (percentagem de área total

ocupada por *dies*² numa matriz de um substrato -%SOR) sendo este um factor crucial para a escolha das formulações de EMC a utilizar. No entanto, existem outros factores que podem interferir: espessura do *die* (acima referido) e a espessura do adesivo; para tal, calcula-se o SVR (percentagem em volume de silício numa matriz). Para produtos de SOR médio o SVR é na ordem dos 20%; este valor pode flutuar de 2 a 6%, dependendo ou não da consideração da altura do adesivo no seu cálculo [15,16].

Entre as propriedades dos materiais constituintes da memória, aquelas que possuem mais impacto na criação dos empenos são: o módulo de Young (E), a Tg, o módulo de contracção (ϵ) e os CTE's (figura 18) [10].

EMC	$\epsilon = 0.1-0.4\%$	$CTE = 8-10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	E = 30GPA
	Die	$CTE = 2.5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	E = 160 GPA
Substrato		$CTE = 17 \cdot 10^{-6} K^{-1}$	E = 20 GPA

Fig.18 – CTE's e módulos de elasticidade dos principais materiais num produto BOC [10].

Os empenos são induzidos sobretudo durante etapas de cura e arrefecimento, de materiais de matriz polimérica [13]; é sobretudo após a etapa de *Mold* que se verifica uma maior variação de empenos, existindo um arrefecimento desde os 175°C (temperatura de moldação) até à temperatura ambiente aliado à introdução em grande volume de um material de matriz polimérica (EMC) [9]. Durante o arrefecimento, está presente um jogo de forças representadas na figura 19. Se a força exercida pelo EMC (F_{EMC}) for igual à força exercida pelo substrato (F_{Sub}), então o equilíbrio seria perfeito e não existiria qualquer nível de empeno. Porém, isto é muito raro, sendo mais provável que $F_{EMC} > F_{Sub}$ logo o empeno possui uma curvatura côncava (*smiling face*); ou, $F_{EMC} < F_{Sub}$ apresentando o empeno uma curvatura convexa (*crying face*) [10].



Fig.19 – Esquema de forças representativas da reação do arrefecimento na etapa de *Mold* [10].

² Vulgarmente considerado como sendo constituído na totalidade por silício.

O jogo de forças é comandado, desde a temperatura da operação de moldação até à temperatura ambiente, pela reticulação das cadeias poliméricas do substrato e do EMC que vão encapsular o *die* [13].

Para além dos factores anteriormente referidos, também se devem ter em linha de conta o tempo, as condições ambientais durante a produção e o tipo de equipamentos na criação de empenos durante o encapsulamento das memórias [5].

Usualmente, as geometrias e as dimensões dos componentes que constituem o produto são definidas na fase de desenho do projecto, pelo qual é difícil efectuar modificações a este nível para provocar uma melhoria no nível de empenos. As condições de processo de cada etapa são também difíceis de se alterar pois estas usualmente são padronizadas de acordo com as infra-estruturas e manufactura, pelo que alterá-las gera entropia e requer custos de alteração do processo, em investimento e qualificação. Porém, existe a solução, economicamente viável, de alterar as propriedades dos materiais que constituem o produto. Usualmente essa modificação é efectuada a nível do EMC, por este ser o material que provoca, em maior extensão, o aparecimento de empenos [13].

Por vezes, alterações no EMC (na sua formulação) trazem melhorias, baixando o nível de empenos criados [6]. A formulação do EMC pode ser alterada de forma a modificar algumas das suas propriedades (CTE's, Tg, E e módulo de contracção) [13]. Desta forma, o estudo das características e propriedades do EMC é crucial para uma melhor compreensão do fenómeno de empenos [6]. Os CTE's do EMC são influenciados sobretudo pelo volume e tamanho de fibras. O módulo de contracção depende sobretudo dos mecanismos de polimerização e da cinética de cura. Já a temperatura de transição vítrea, Tg, depende sobretudo da rigidez das cadeias poliméricas, do peso molecular das cadeias e do volume livre entre as cadeias (interacções químicas) [13].

Em suma, é crucial conhecer o mecanismo pelo qual se criam empenos, saber caracterizar os empenos e saber melhorar o nível dos mesmos, uma vez que estes se reflectem no processo, desde a implementação do *die* no substrato até à singularização dos componentes, vindo também a reflectir-se na montagem dos componentes em módulos, ocorrendo muitas vezes esta etapa já nos clientes [15].

2. Procedimento

De forma a atingir os objectivos propostos para este estudo, efectuaram-se seis experiências (ver figura 20) embora cada experiência possua um procedimento e um objectivo diferente. Em todas as experiências foi considerado o mesmo produto e o mesmo método de medição do nível de empenos. Nos pontos seguintes, faz-se uma breve descrição do produto, do equipamento e do procedimento de medição do nível de empenos.



Fig.20 – Diferentes experiências efectuadas neste trabalho.

2.1. Produto

Existem diversos produtos BOC em produção na Qimonda PT; estes possuem diversas aplicações desde as gráficas até às móveis.

O estudo presente foi restringido a um produto de média ocupação de silício, nomeadamente o produto 512M T80 84, não só por este ser um produto de elevado volume em produção mas também por ser um dos que apresenta um nível de empeno que influencia negativamente a produção (como descrito no ponto 1.3.).

Este produto é processado num substrato composto por três matrizes, tendo cada matriz 35 componentes, o que perfaz um total de 105 componentes por substrato (ver figura 21). De acordo com as dimensões do *die*, este produto apresenta um SOR de 41% e SVR de 23,81%. Na figura 22, encontra-se o desenho de definição de uma única memória, com as respectivas dimensões.

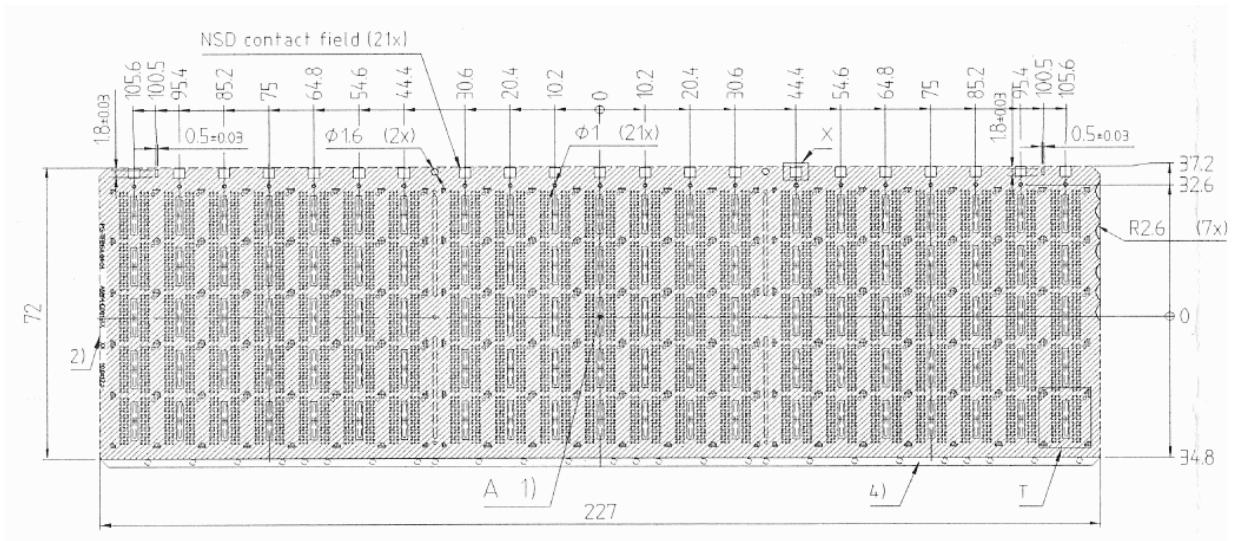


Fig.21 – Desenho geométrico do substrato para o produto em estudo

[cedido por Qimonda PT].

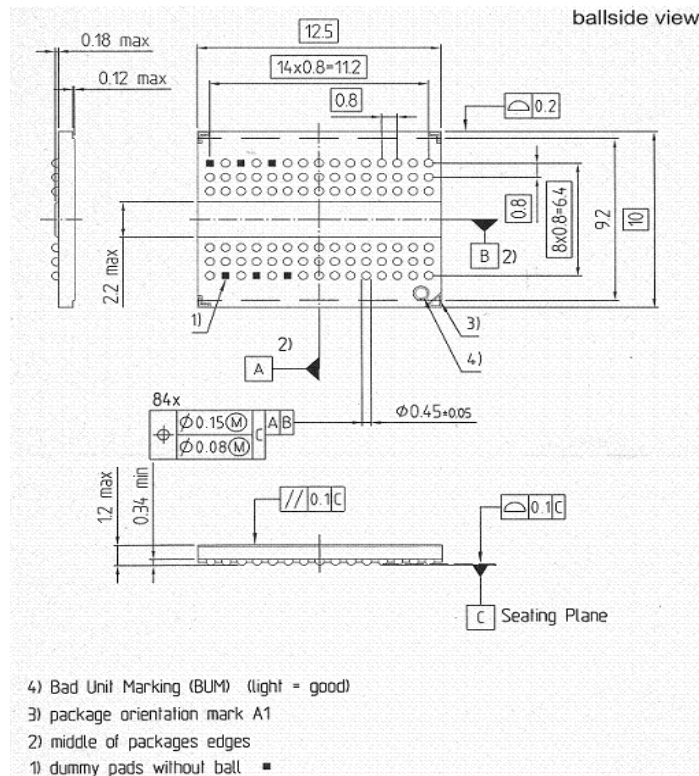


Fig.22 – Desenho de definição do produto em estudo de acordo com a ISO 8015

[cedido por Qimonda PT].

2.2. Equipamento /Medição de empenos

O equipamento utilizado para efectuar as medições do nível de empenos (figura 23) foi um NanoFocus μ scan[®]; este é um perfilómetro a *laser* 3D. É um equipamento flexível e facilmente automatizável, permitindo medições rápidas, sem contacto com as superfícies (método não destrutivo). O *NanoFocus μ scan[®]* permite utilizar diversos sensores incorporados e possui diferentes softwares associados, com um leque vasto de aplicações [17].

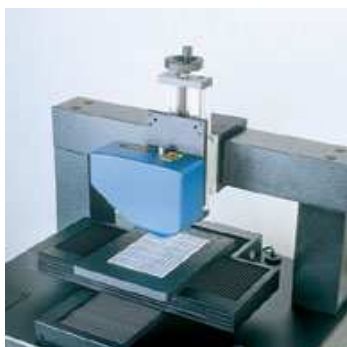


Fig.23 – Equipamento NanoFocus μ scan[®] [17].

O sensor utilizado para a medição de empenos é um sensor holográfico (CP), que se fundamenta na holografia conoscópica. Para a medição do nível de empenos neste trabalho foi utilizado um sensor CP42, tendo uma resolução na direcção x e y de 15 μ m e em z de 6 μ m [18]. Os empenos foram medidos em cada matriz do substrato nas direcções x, y, e xy usando o software *autosoft* com a receita para produtos de três matrizes (ver figura 24).

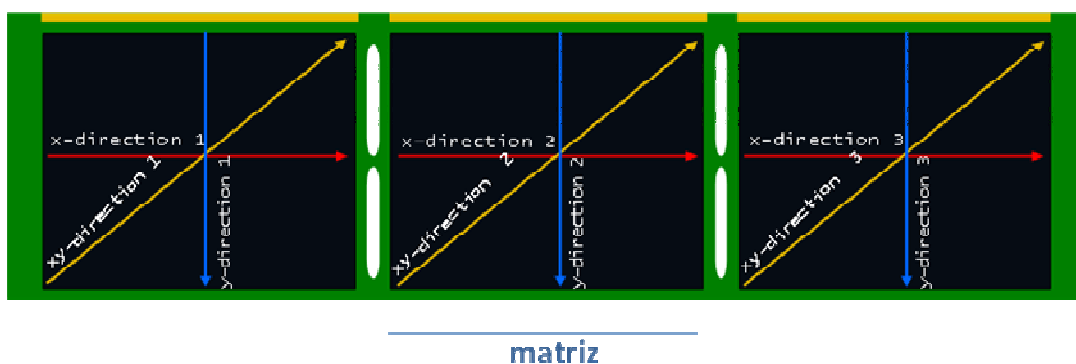


Fig.24 – Método de medição efectuado no estudo.

Neste estudo (ponto 3.), serão apresentados apenas os valores do nível de empenos na direcção xy, visto ser esta a direcção em que os empenos têm maior impacto na produção.

3. Etapas do estudo

Como referido anteriormente, foram realizadas seis experiências neste estudo; neste capítulo encontram-se descritos o procedimento, a análise e discussão de resultados para cada uma delas, tendo em conta a utilização do produto e o método de medição, anteriormente descritos.

3.1. Influência das etapas do processo

Esta experiência teve como objectivo identificar as etapas do processo de *Assembly* que influenciam em maior extensão o nível de empenos. No entanto, uma das questões que se colocava era se existia ou não algum nível de empenos aquando da entrega dos substratos. Com o intuito de verificar a extensão do nível de empenos nos substratos, antes de iniciar o processo *Assembly*, incluiu-se esta etapa no plano de medições.

Procedimento

Para a realização desta etapa do estudo foram utilizados substratos do mesmo fornecedor (MCT), de forma a eliminar ruído. Estes substratos tiveram origem em 4 *bundles* (embalagens de substratos, tal e qual como chegam à fábrica vindas do fornecedor), pertencentes a 4 lotes diferentes do mesmo fornecedor: MHB0033300, MHB0030500, MHB00322S0 e MHB0420200. Destes, retiraram-se aleatoriamente 28 substratos e formaram-se 4 lotes produtivos. Os 4 lotes foram processados nos mesmos equipamentos e com os mesmos *batches* de material (adesivo, EMC, bolas de solda e fluxo). Efectuaram-se medições do nível de empenos (como referido em 2.2), em todos os substratos, ao longo de todo o processo de *Assembly* de acordo com o fluxograma (apresentado na figura 25). Entre etapas, os lotes foram guardados em armários de nitrogénio. Na etapa de *Singulation* não se efectuaram medições uma vez que os componentes já se encontram singularizadas; contudo, fizeram-se passar os lotes, dois a dois, por cada um dos equipamentos diferentes de *Singulation*, de forma a ver o impacto nesta etapa. Estes dois equipamentos diferem no modo de processamento, pois possuem sistemas diferentes de guias à entrada e ferramentas diferentes para secar os componentes (*dry block's*).

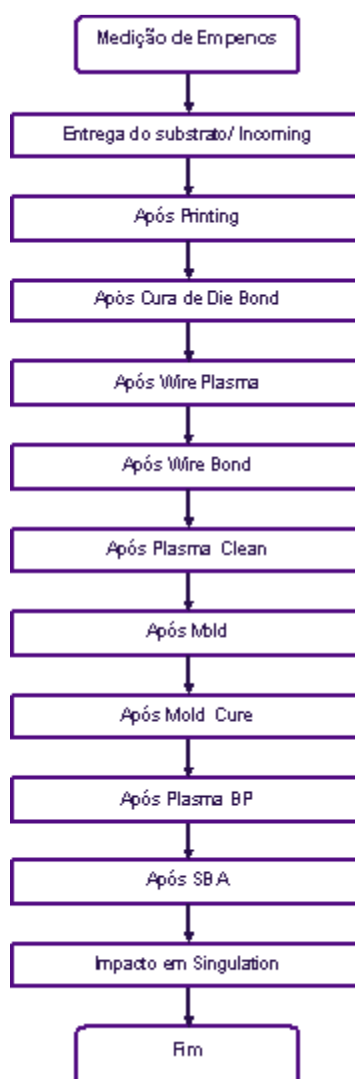


Fig.25 – Fluxograma das medições do nível de empenos ao longo do processo de *Assembly*.

Análise e Discussão de Resultados

Na figura 26, a título de exemplo, está representado o gráfico resultante da medição do nível de empenos num dos lotes utilizados nesta etapa: cada barra corresponde a média do nível de empenos nas três matrizes de um substrato. Por observação do gráfico, não só concluímos que existe um nível de empenos elevado aquando da entrega dos substratos, mas também que este nível varia dentro do mesmo lote de substratos (neste caso, entre 474 a 1139 μ m na direcção xy).

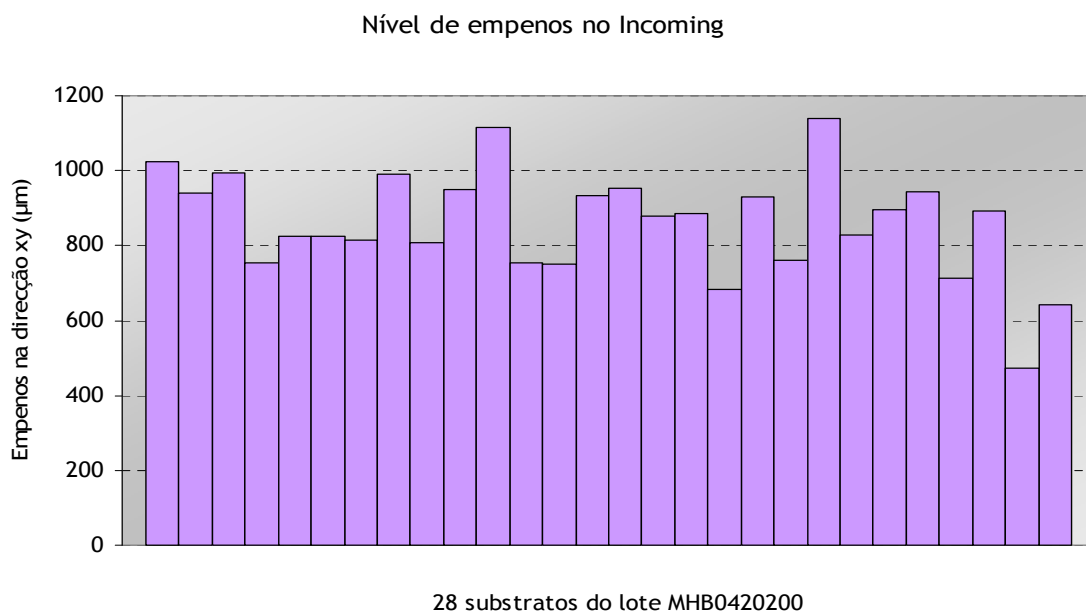


Fig.26 – Nível de empenos nos vinte e oito substratos do lote MHBO420200 (MCT), aquando da sua recepção (*Incoming*).

Para uma melhor visualização do nível de empenos encontram-se na figura 27 três imagens representativas de um perfil 3D de um substrato no *Incoming*. Para efectuar o perfil apresentado, utilizou-se o mesmo equipamento usado nas medições do nível de empenos, *NanoFocus* com sensor CP42, recorrendo-se ao software μ soft (permite traçar perfis para uma visualização 3D do substrato). Note-se que o sistema de medição para efectuar o perfil 3D é diferente do sistema de medição do nível de empenos. Para efectuar o perfil o equipamento tem como ponto de referência o centro da matriz central, pelo que não existe relação entre a escala da figura 27 e os valores apresentados no gráfico. No entanto, em ambos os casos, pode-se verificar que a forma do empeno neste caso é do tipo *crying face*.

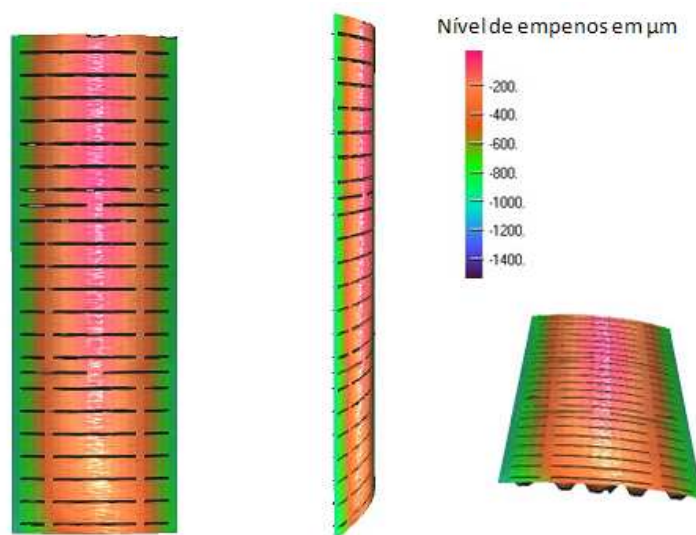


Fig.27 – Perfil de um substrato no *Incoming*.

Não foram encontrados na bibliografia estudos referentes ao nível de empenos em substratos antes de iniciarem o processo de montagem de memórias. Contudo existem valores especificados no *Incoming* para o nível de empenos nos substratos na direcção y . De acordo com o procedimento interno, os valores do nível de empenos nos substratos utilizados estão dentro da especificação. E, este nível de empenos no início do processo de *Assembly* não tem impacto significativo; porque o substrato é nesta fase bastante flexível.

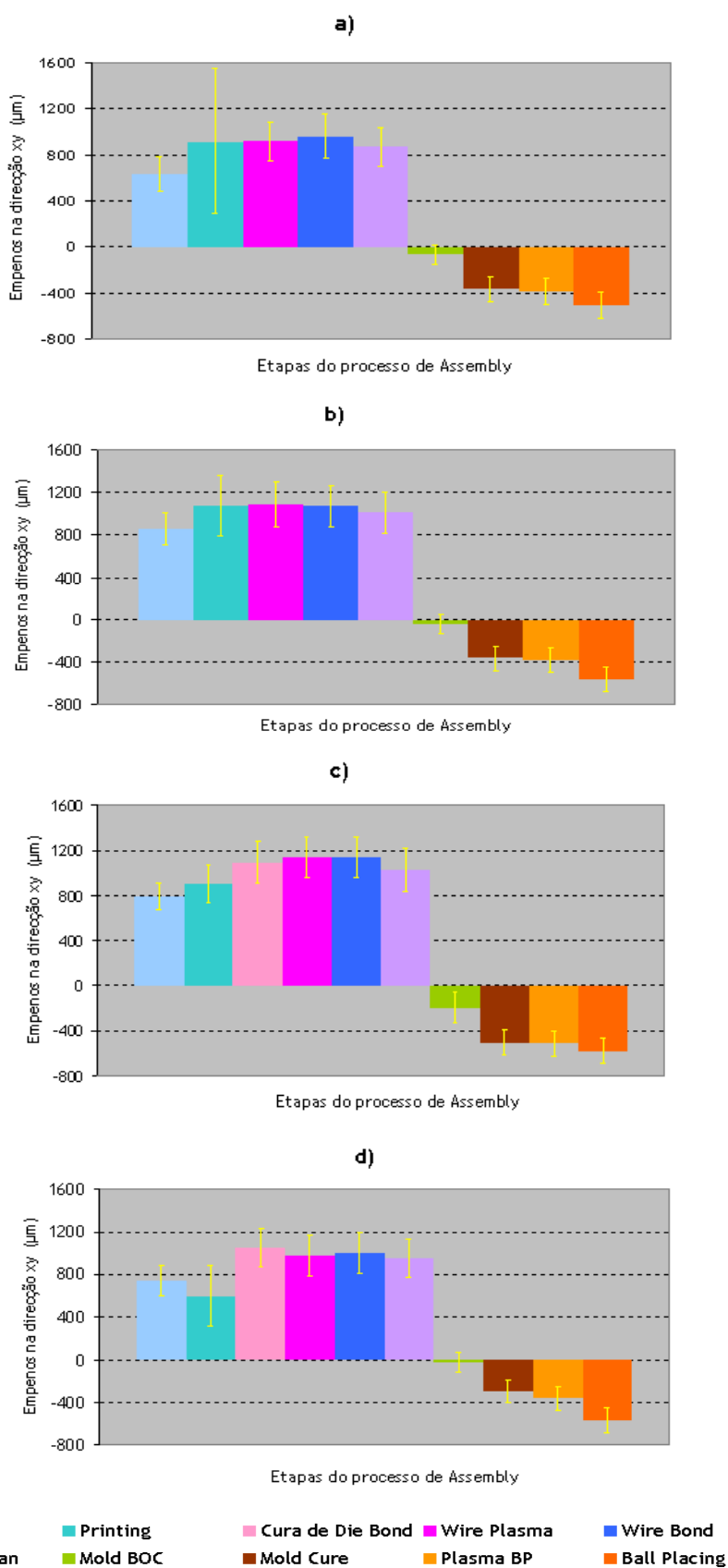


Fig.28 – Gráficos do nível de empenos ao longo do processo de *Assembly*, para cada um dos lotes de substratos: a) lote MHB0030500, b) lote MHB0420200, c) lote MHB0033300 e d) lote MHB00322S0.

Os gráficos da figura 28 são resultantes de todas as medições efectuadas de acordo com o fluxograma para cada um dos lotes de substratos MCT. Cada coluna representa a média do nível de empenos nos 28 substratos e para cada etapa a barra amarela mostra o respectivo desvio padrão associado. No gráfico dos lotes MHB0030500 e MHB0420200 não se apresenta o valor do nível de empenos na etapa de *Die Bond* devido a estes, por lapso, terem sido de imediato processados em *Wire Plasma*. Contudo, o nível de empenos não é afectado significativamente pela etapa de *Wire Plasma*, como se conclui da observação do gráfico da figura 29. Nesta encontram-se, a título comparativo, os valores médios do nível de empenos, com e sem *Wire Plasma*, dos outros dois lotes, onde se constata que a diferença entre nível de valores médios é menor que a variação existente no lote.

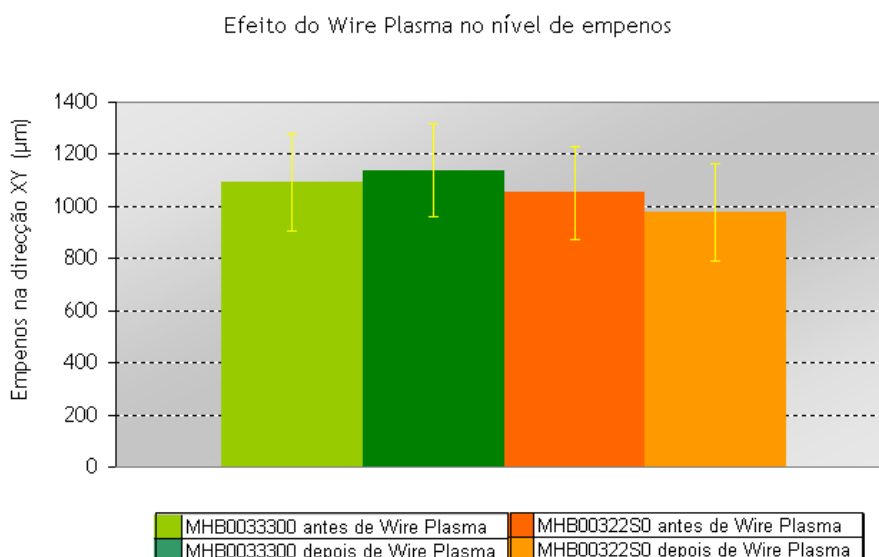


Fig.29 – Gráfico com o efeito do *Wire Plasma* nos lotes MHB0033300 e MHB00322S0.

Da análise da figura 28, que em geral:

- O comportamento do nível de empenos ao longo do processo de *Assembly* é semelhante nos 4 lotes;
- Na mesma etapa existe uma variação de valores do nível de empenos dentro do mesmo lote e entre lotes; a variação dentro do mesmo lote é na ordem dos 200-300μm sendo mais elevada nos lotes MHB0030500 e MHB0420200, sobretudo na etapa de *Printing*.

As variações apresentadas em cada etapa estão associadas à variação previamente apresentada pelos substratos durante a inspeção no *Incoming*. Porém, a variação em *Printing* é mais significativa, não só devido à colocação de um novo material (adesivo), mas também por, nesta etapa, apenas ser efectuado um pré ciclo de cura (*B stage cure*), tendo ainda o adesivo conjuntamente com o substrato bastante flexibilidade.

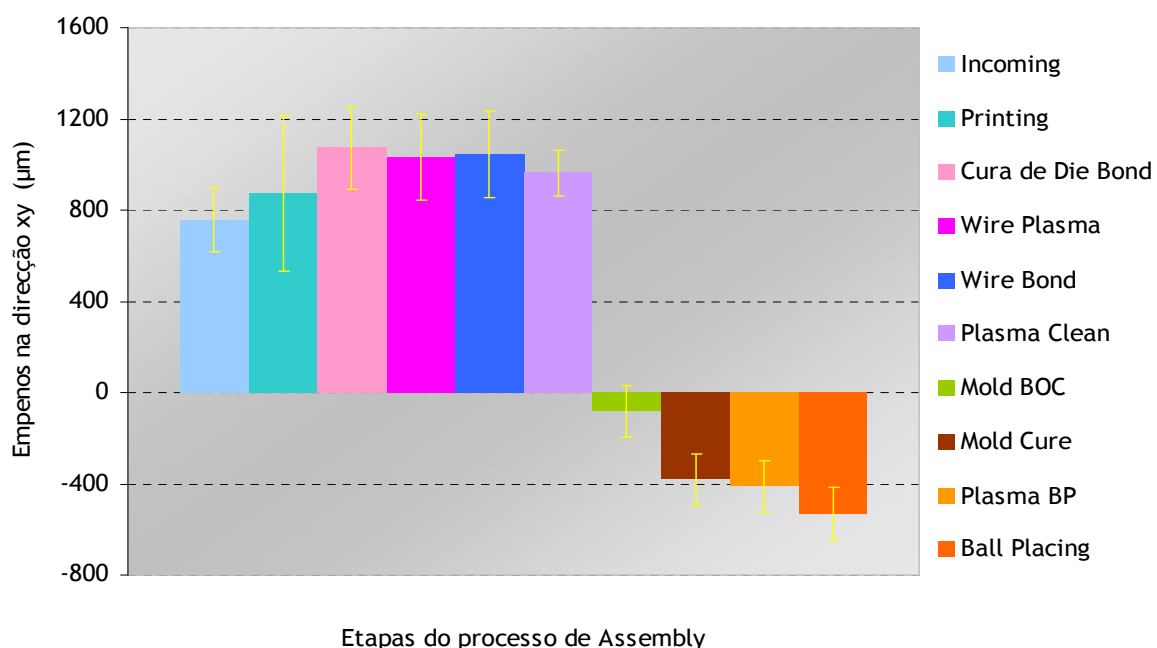


Fig.30 – Nível de empenos ao longo do processo de *Assembly*.

Na figura 30, encontram-se representados os valores médios e respectivos desvios padrão dos 4 lotes ao longo do processo de *Assembly*. Deste gráfico podemos concluir que:

- Os lotes possuem já um nível de empeno, como referido anteriormente, antes de iniciarem o processo de *Assembly* ($\sim 756\mu\text{m}$);
- Do *Incoming* até *Plasma Clean* o nível de empenos é positivo *crying face*;
- Após a etapa de *Cura de Die Bond*, os substratos tendem a homogeneizar os valores do nível de empenos, havendo diminuição do desvio padrão;

- As etapas de plasma (*Wire Plasma*, *Plasma Clean* e *Plasma BP*) e a etapa de *Wire Bond* não afectam significativamente o nível de empenos;
- Em *Mold*, a forma do empeno muda de curvatura, passando para *smiling face*, e mantém-se até SBA, aumentando em módulo o nível de empeno. A etapa de *Mold* é a responsável pela maior variação do valor absoluto do empeno;
- As etapas de *Mold*, *Mold Cure* e SBA são consideradas críticas, por serem as etapas onde se verifica uma mudança na curvatura do empeno, e um aumento significativo do nível de empenos.

Lin *et al.* [6] caracterizaram num sobre o impacto da humidade no EMC a forma de empenos em algumas etapas (Cura de *Die bond*, *Mold* e *Mold Cure*) para um produto PBGA (*Plastic Ball Grid Array*), recorrendo ao sistema de medição por Thermoire (sistema diferente do utilizado neste estudo). Embora não seja mencionado o design do produto PBGA estudado, a forma de empenos neste tem um comportamento idêntico ao produto em estudo: positivo em *Cura de Die Bond* e negativo em *Mold* e *Mold Cure*. De acordo com a bibliografia mencionada, a mudança de forma do empeno em *Mold* deve-se à introdução de EMC no produto e à temperatura elevada durante o processo; o aumento do nível de empenos nas etapas seguintes está associado sobretudo aos ciclos de temperatura elevados.

Para uma melhor visualização do problema encontram-se abaixo imagens (figuras 31 à 33) resultantes dos perfis do produto traçados nas etapas críticas: *Mold*, *Mold Cure* e SBA. Os perfis foram traçados escolhendo-se aleatoriamente um substrato dos 4 lotes em cada uma das etapas; o método utilizado para traçar os perfis foi o mesmo que o anteriormente (apresentado na figura 27). Note-se que após *Mold* (figura 31) o nível de empenos é quase nulo e após *Mold Cure* e SBA (figura 32 e 33, respectivamente) o empeno adquire uma forma de *smiling face*, mais acentuada em SBA.

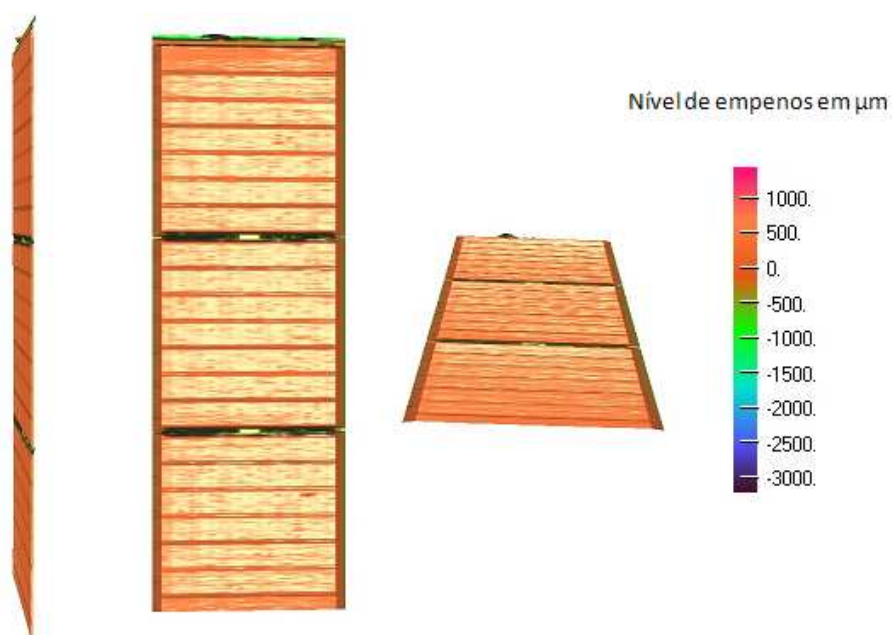


Fig.31 – Perfil de um substrato na etapa de *Mold*.

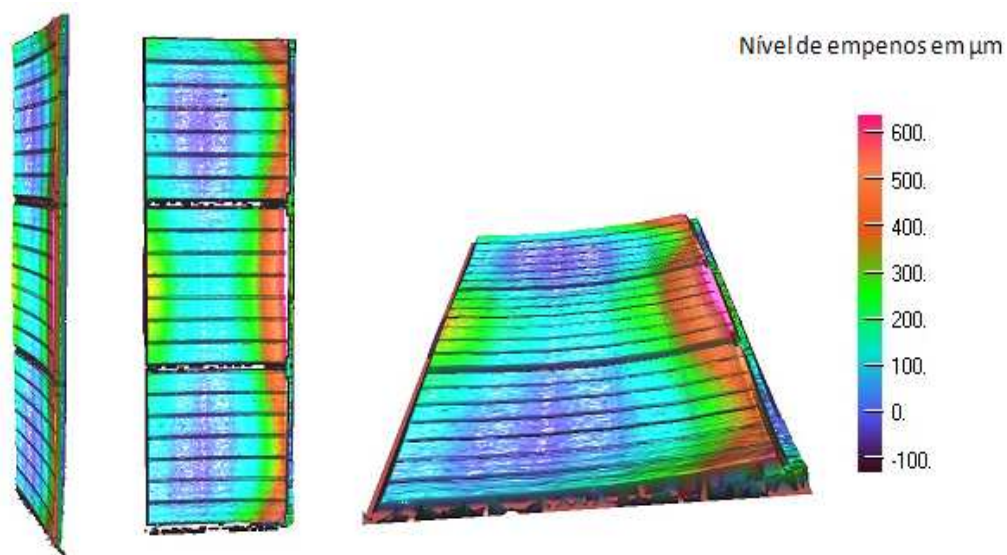


Fig.32 – Perfil de um substrato na etapa de *Mold Cure*.

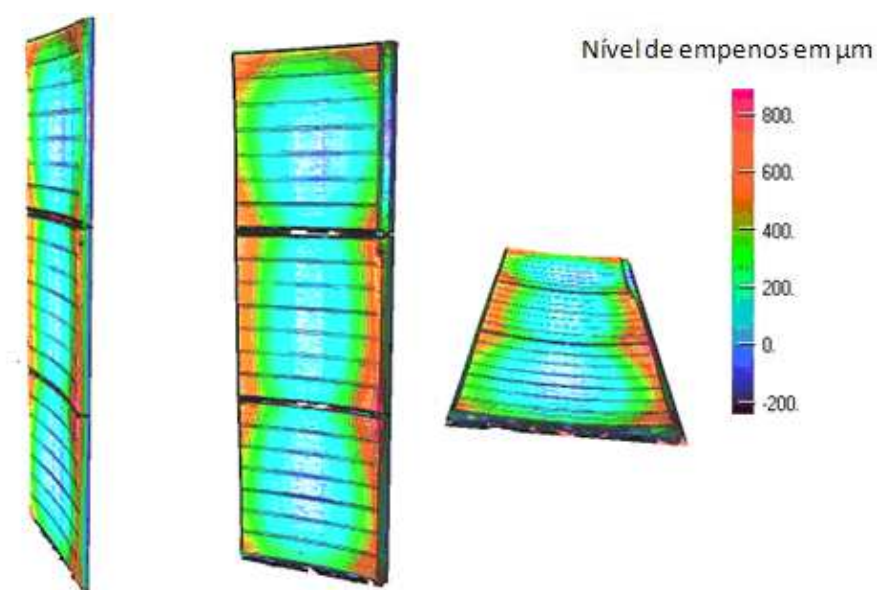


Fig.33 – Perfil de um substrato na etapa de SBA.

Ao processar os lotes, dois a dois, em máquinas diferentes de *Singulation*, não se verificou qualquer impacto na produção, estando os empenos após SBA dentro dos níveis aceitáveis (+600 a -400 μm).

Após esta análise do efeito das diferentes etapas no nível de empenos, restringiram-se as medições do nível de empenos às etapas críticas, excepto na etapa "factor fornecedor", onde se incluiu o *Incoming* e *Plasma Clean*. A medição de empenos serve para verificar o nível de empenos aquando da entrega de substratos dos diferentes fornecedores e antes das etapas críticas.

3.2. Factor fornecedor

Este ponto do trabalho teve como finalidade verificar se existe ou não influência na utilização de substratos de diferentes fornecedores no nível de empenos.

Procedimento

Criou-se um lote de 36 substratos por fornecedor (MCT, ASE e SHK); estes 36 substratos foram retirados de cada *bundle*, aleatoriamente. Os 3 lotes produtivos criados decorreram juntamente na linha de produção, tal como na etapa anterior, de forma a garantir os mesmos equipamentos e *batches* de materiais, reduzindo assim o ruído. Entre cada etapa, os lotes foram guardados em armários de nitrogénio. Foram efectuadas medições no nível de empenos em todos os substratos, nas etapas do processo restringidas, de acordo com os resultados do ponto 3.1. (ver figura 34).

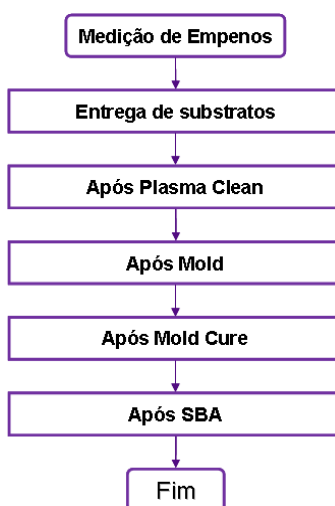


Fig.34 – Fluxograma das medições do nível de empenos na etapa factor fornecedor.

Análise e Discussão de Resultados

Em cada etapa do processo existe variação dos valores do nível de empenos de substrato para substrato do mesmo lote (variação do desvio padrão) e de fornecedor para fornecedor. O gráfico da figura 35 apresenta os valores médios do nível de empenos e respectivos desvios padrões, para os fornecedores de substrato em estudo, em algumas etapas do processo de *Assembly*.

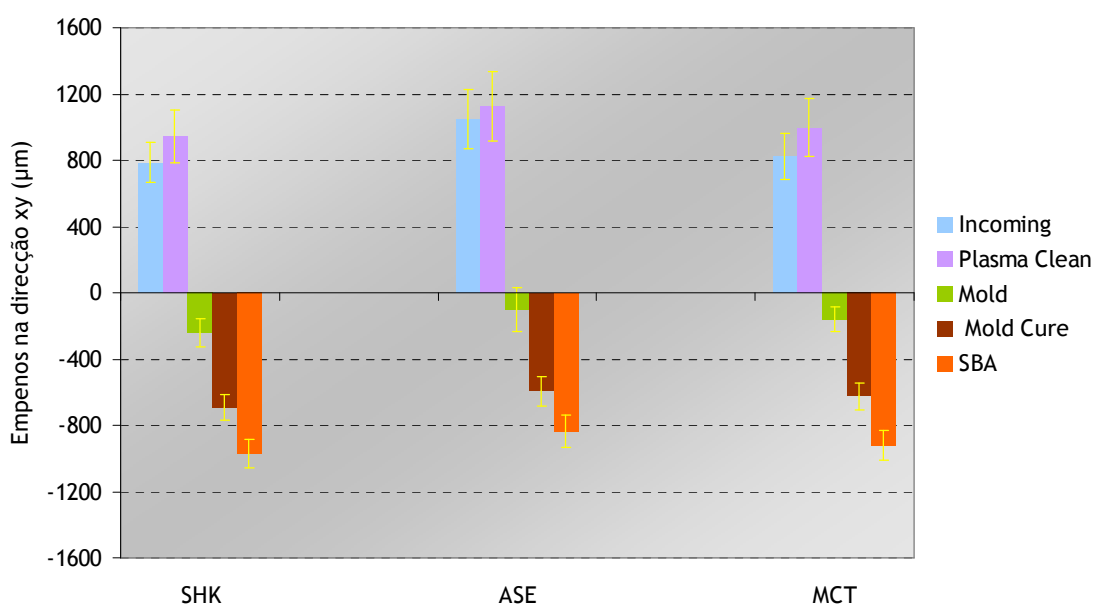


Fig.35 – Gráfico comparativo do nível de empenos para fornecedores diferentes de substratos, no *Incoming*, na etapa de *Plasma Clean* e nas etapas críticas.

Por observação do gráfico, pode concluir-se que:

- O nível de empenos possui o mesmo comportamento para os três fornecedores e é semelhante ao já anteriormente descrito: positivo no *Incoming* e *Plasma Clean*, mudando posteriormente de curvatura na etapa de *Mold*, passando para negativo e aumentando até SBA;

- Os substratos ASE, nas etapas *Incoming* e *Plasma Clean*, registam um nível de empenos superior ao apresentado nos substratos SHK e MCT. Este comportamento acabou por resultar num nível de empeno inferior após a operação de SBA;
- Embora existam algumas variações de fornecedor para fornecedor de substratos no nível de empenos, estas não são maiores que a diferença de lote para lote do mesmo fornecedor (ver resultados da etapa anterior), pelo que o factor fornecedor não tem um impacto muito significativo no nível de empenos.

3.3. Factor tempo e condições de armazenamento

Esta etapa do estudo teve como objectivo verificar a possível influência do tempo e das condições de armazenamento no desempenho dos substratos a nível de empenos durante o processo de *Assembly*.

Procedimento

Com o intuito de verificar a influência das condições de armazenamento e o tempo entre etapas do processo de *Assembly* realizaram-se medições nas etapas consideradas críticas: *Mold*, *Mold Cure* e *SBA*. Em cada uma das etapas foram estipulados tempos de medição de acordo com as ocorrências em produção. Na tabela 1, encontram-se os valores do tempo mínimo e máximo entre etapas, após uma análise a oito lotes em produção e os tempos estipulados para efectuar as medições em cada uma das etapas. Foram considerados dois ambientes específicos: condições ambientais da sala limpa e armários de nitrogénio. Em cada uma das etapas foram recolhidos e marcados 16 substratos dos quais, 8 foram guardados em armários de nitrogénio e os outros 8 foram expostos às condições ambientais de produção (sala limpa de 10 k). Todos os substratos foram sujeitos a medição do nível de empeno em cada etapa e para os tempos de medição estipulados (de forma a verificar a evolução do nível de empenos com o tempo e com as condições de armazenamento).

Tabela.1 – Tempos máximos e mínimos entre etapas e tempos de medição.

Etapas	Tempo mínimo	Tempo máximo	Tempos de medição (h)
Mold	0	<4h	0, 1, 2, 3 e 4
Mold Cure	22min	4h:35min	0,1,3,9,27 e 81
SBA	2h:22min	7h:17min	0, 1, 3, 5 e 7

O tempo de medição considerado como 0h foi: de 30 minutos após *Mold* e *SBA*, e, de 1h (tempo de arrefecimento dos lotes) após a etapa de *Mold Cure*. As 81 horas foram consideradas como tempo extremo após *Mold Cure* de forma a verificar o "efeito quarentena". Este efeito consiste em deixar os lotes, com nível elevado de empenos após *Mold Cure*, em

reposo durante um/dois dias para que o nível de empenos diminua. Existem casos reportados em produção de alguns produtos onde se verifica este efeito.

Análise e Discussão de Resultados

O gráfico da figura 36 é resultado das medições efectuadas nesta fase do estudo. Para cada etapa crítica do processo de *Assembly* encontra-se a média do incremento no nível de empenos em função do tempo, em condições ambientais da sala limpa e nos armários de nitrogénio.

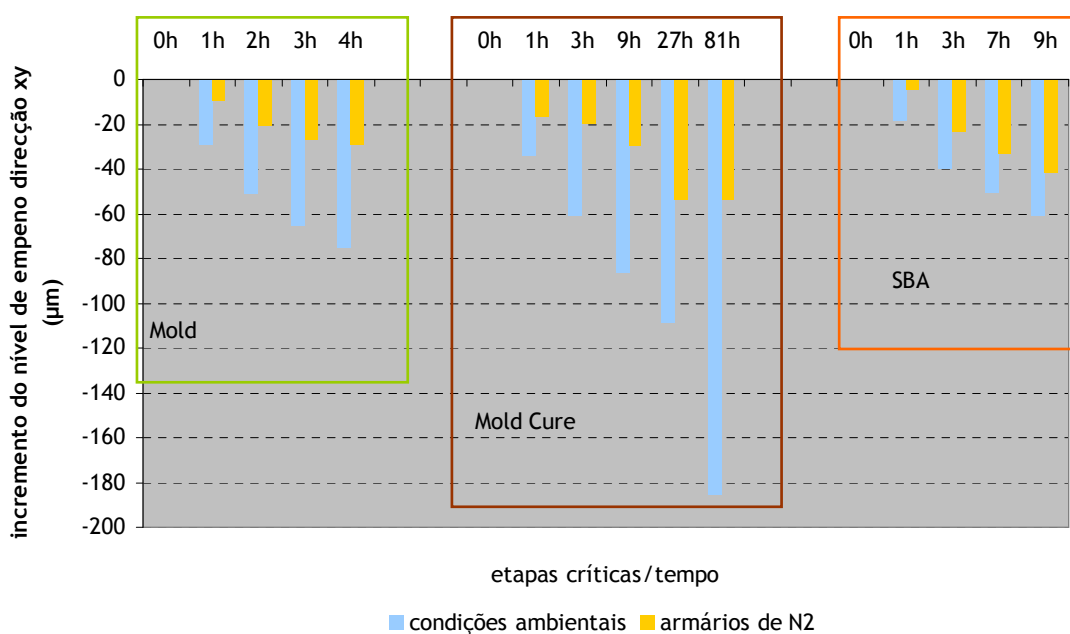


Fig.36 – Gráfico do incremento do nível de empenos com o tempo nas etapas críticas.

Por análise do gráfico pode-se concluir que:

- O nível de empenos varia com o tempo nas etapas críticas;
- Com o tempo o nível de empenos aumenta (em módulo), tornando-se mais crítico para a processabilidade do produto em estudo;

- O aumento do nível de empenos com o tempo é mais acentuado quando os substratos estão expostos as condições ambientais da sala limpa, pelo que em tempos entre etapas maiores que 4h (paragem de lotes) os lotes deverão ser guardados em armários de nitrogénio de forma a não tornar o nível de empenos crítico para os processos posteriores;
- Para este produto o efeito quarentena não se verifica, uma vez que não se verifica uma diminuição no nível de empenos após *Mold Cure* quando os lotes são guardados em armários de nitrogénio.

3.4. Factor anti-warpage

O *anti-warpage/turnover* (figura 37) é o processo que faz o transporte dos substratos da moldação até a *degating table* (mesa de remoção dos gitos - localizado em cada dois substratos). O transporte dos substratos na *turnover* tem um tempo de 9 segundos. A *turnover* tem associado um sistema de vácuo, permitindo que os substratos após a moldação arrefeçam mais rapidamente. Neste ponto do trabalho pretendeu-se aferir a influência do *anti-warpage* no nível de empenos.

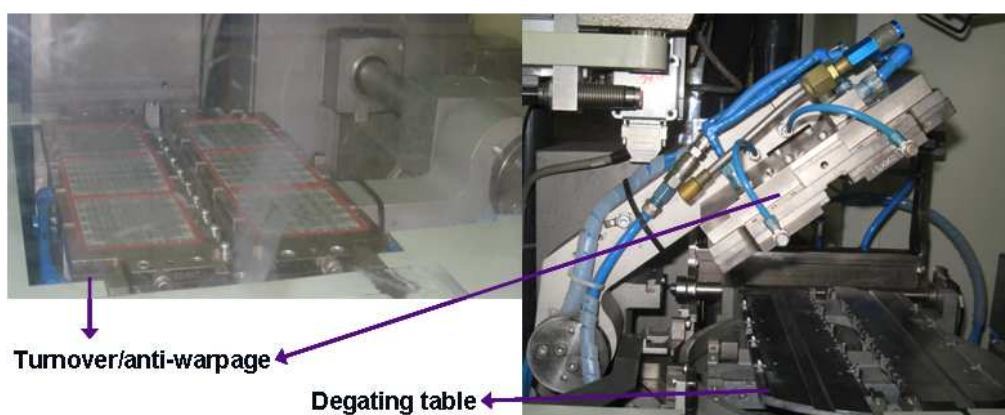


Fig.37 – Sistema de *anti-warpage* existente no processo de *Mold*.

Procedimento

Nesta etapa, foram efectuadas medições antes e após *Mold*, após *Mold Cure* e *SBA*; cada um dos substratos estava identificado de forma a obter o incremento do nível de empenos (Δe_{xy}) em cada etapa (e_i) relativamente ao valor antes de *Mold* (e_{pc}). Para verificar a influência do *anti-warpage* na etapa de *Mold*, fizeram-se passar 12 substratos por este sistema (processo normal de produção); noutros 12 efectuou-se manualmente a passagem de uma ferramenta para outra, evitando-se a passagem pelo *anti-wrapage*. Das medições efectuadas pretendeu-se obter o incremento do nível do empenos ao longo das etapas críticas do processo de *Assembly*, com e sem *anti-warpage*.

Análise e Discussão de Resultados

O gráfico da figura 38 representa a média dos incrementos no nível de empenos observados nos substratos medidos nas etapas críticas com e sem *anti-warpage*.

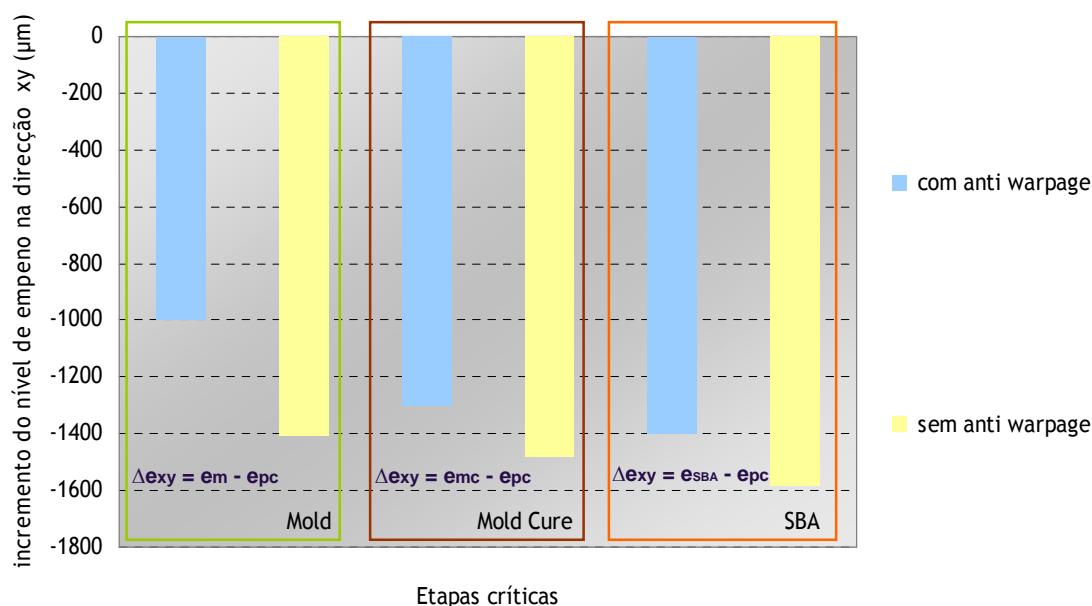


Fig.38 – Incremento do nível de empenos com e sem anti-warpage em cada etapa crítica relativamente ao medido após *Plasma Clean*.

Por observação da figura 38, conclui-se que:

- A não activação do *anti-warpage* no processo de *Mold* induz um aumento de 200μm no nível de empenos antes dos processo de SBA e *Singulation*, e um aumento de 400μm após *Mold*.

A activação do *anti-warpage* pensa-se que provoca no EMC uma cinética de polimerização mais rápida (menor tempo para a reticulação das cadeias poliméricas), o que se traduz por um menor nível de empenos. A não activação deste sistema pode causar empenos críticos, sendo prejudicial no processamento do produto durante as etapas de SBA e *Singulation*.

3.5. Arrefecimento forçado

Este ponto do trabalho surgiu no seguimento de uma ideia IQ, ideias para melhorias, proposta por um operador. A sugestão consistiu em utilizar um arrefecimento forçado, recorrendo ao uso de ventoinhas em prateleiras (sistema existente e utilizado em *MSP*), após a etapa de *Mold Cure*, diminuindo assim o intervalo de tempo entre as etapas de *Mold Cure* e *Plasma BP*. Note-se que os lotes só podem prosseguir para a etapa de *Plasma BP* depois de estarem à temperatura ambiente. Levantou-se então a questão se o arrefecimento proposto não iria induzir alterações no nível de empenos. Desta forma, neste ponto do trabalho procurou-se verificar a influência do arrefecimento forçado nos empenos.

Procedimento

Foram consideradas duas condições diferentes: condições reais e condições de arrefecimento mais abrupto e, em cada uma delas, foram consideradas um arrefecimento normal (arrefecimento utilizado em produção) e forçado (arrefecimento proposto). Da figura 39 à 42, encontram-se as imagens de cada um dos arrefecimentos efectuados.



Fig.39 – Condição real: arrefecimento normal. Lancheira a arrefecer nas prateleiras.

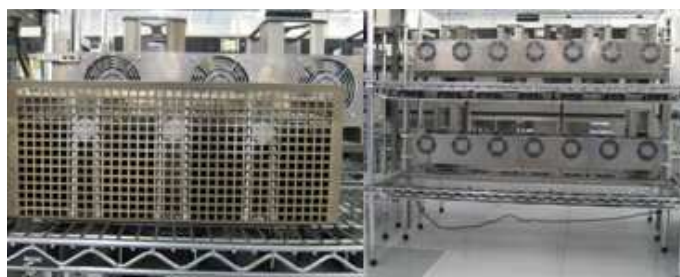


Fig.40 – Condição real: arrefecimento forçado. Lancheira a arrefecer nas prateleiras com sistema de ventoinhas.



Fig.41 – Condição de arrefecimento mais abrupto: arrefecimento normal. Magazine a arrefecer nas prateleiras.

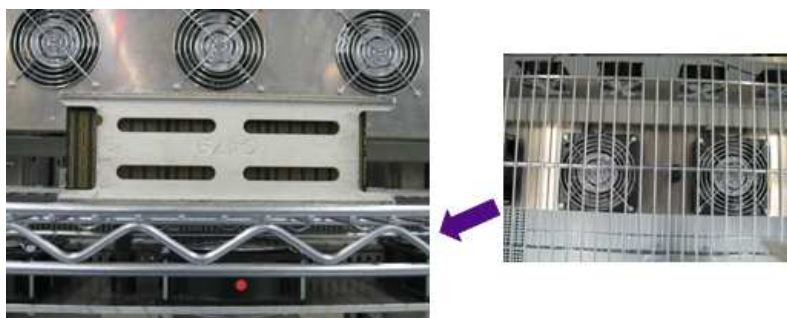


Fig.42 – Condição de arrefecimento mais abrupto: arrefecimento forçado. Magazine a arrefecer nas prateleiras com sistema de ventoinhas.

Para efectuar a avaliação das condições reais foi utilizado um lote produtivo que ocupasse duas lancheiras (suporte que permite transportar 4 magazines que por sua vez transportam 12 substratos cada uma). Marcou-se cada um dos substratos no lote e efectuaram-se medições após *Mold* e *Mold Cure*, de forma a saber qual o incremento que tem a etapa de *Mold Cure* com cada um dos arrefecimentos. Em cada uma das experiências mediram-se 12 substratos, três por *magazine* (um de cima, um de baixo e um do meio da *magazine*). Após *Mold Cure*, deixou-se uma lancheira a arrefecer em condições normais de produção (figura 39) e outra a arrefecer com ar forçado (figura 40).

Nas condições de arrefecimento mais abrupto foi utilizado, também, um lote produtivo. Deste retiraram-se duas magazines (24 substratos). Tal como no caso anterior, marcaram-se e efectuaram-se medições em todos os substratos antes e após *Mold Cure*. Após a cura, colocou-se uma magazine a arrefecer normalmente (figura 41) e outra a arrefecer com ar forçado

mesmo em frente da ventoinha (figura 42), provocando um arrefecimento mais abrupto do que nas condições reais devido a magazine possuir menor massa do que a lancheira com as quatro magazines.

Análise e Discussão de Resultados

No gráfico da figura 43, mostra-se o incremento médio no nível de empenos, com os diversos tipos de arrefecimento.

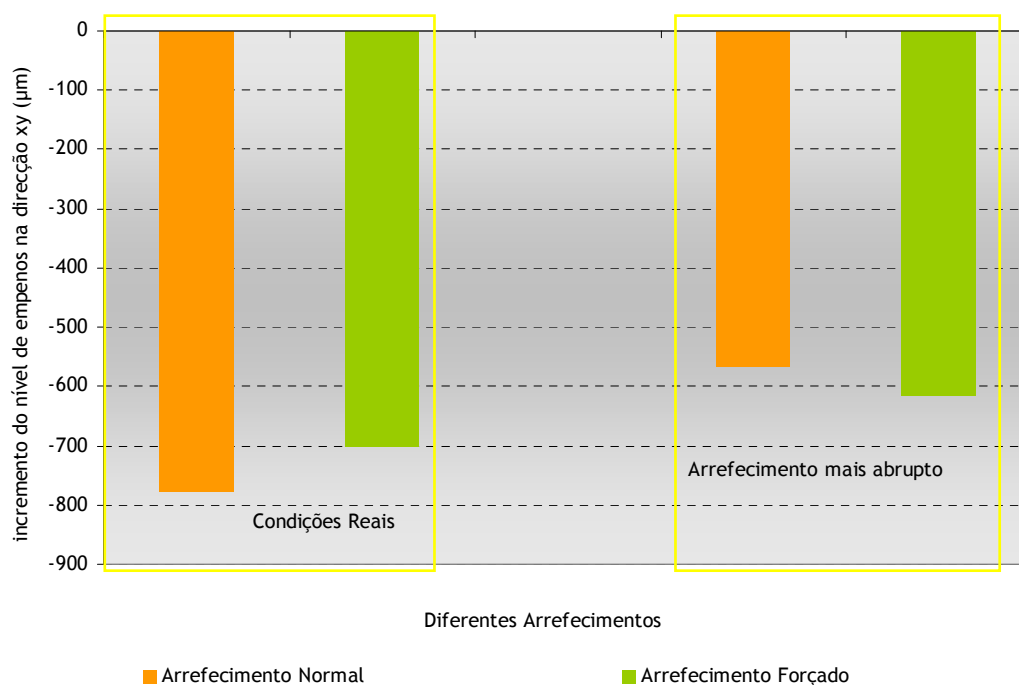


Fig.43 – Incremento do nível de empenos nos quatro tipos de arrefecimentos a que os substratos foram submetidos.

Da análise do gráfico (figura 43) concluímos que:

- O arrefecimento forçado, após *Mold Cure* não induz melhorias significativas no nível de empenos, não parecendo haver diferenças significativas entre o arrefecimento normal e o arrefecimento forçado em ambas as condições (reais e mais abruptas);

- Comparando os resultados obtidos para as condições reais e com o arrefecimento abrupto, verifica-se que este último induz uma diminuição do nível de empeno na ordem dos 200 μ m.

Após *Mold Cure* o EMC já polimerizou na sua totalidade, o que poderá explicar a não influência de um arrefecimento forçado no nível de empenos. Note-se também que em ambos os tipos de arrefecimento, os substratos são sujeitos à mesma variação de temperaturas, desde 175°C até à temperatura ambiente.

Embora o arrefecimento forçado não traga melhorias significativas no nível de empenos, permite, recorrendo ao sistema existente em MSP, arrefecer os lotes mais rapidamente, diminuindo o *cycle time* em 30 minutos.

3.6. Estudo da formulação

De acordo com a bibliografia, como referido no ponto 1.3., alterações na formulação do EMC (por exemplo, a nível de percentagem e ou dimensões médias das fibras) podem provocar alterações no nível de empenos de um produto. O EMC é, entre outros factores, escolhido de acordo com o SOR dos produtos, podendo-se subdividir em baixa, média, e alta SOR. Outro factor que deve ter sido em conta é o SVR.

Nesta etapa foram utilizadas duas formulações diferentes de EMC relativamente à formulação existente em produção para produtos de média SOR. Relativamente à formulação de EMC em produção (PROD), fez-se variar a dimensão média das fibras entre 1 a 2 μ m (o que afecta o valor do módulo de contracção – ver tabela 2), obtendo-se as formulações F1 e F2. O objectivo deste ponto do trabalho foi verificar o impacto destas formulações de EMC no nível de empenos, em três produtos seleccionados na gama média SOR.

Tabela 2 – Contracções do EMC para cada uma das formulações.

Formulações de EMC	F1	F2	PROD
Módulo de Contracção (%)	0,28	0,27	0,31

Procedimento

Dos três produtos de média ocupação de silício usados nesta etapa do estudo, consta o produto que foi alvo de estudo ao longo desta dissertação. Na tabela 3, encontram-se os valores de SOR e SVR para os produtos analisados nesta fase.

Tabela 3 – Valores de SOR e SVR dos produtos seleccionados para estudo.

SOR (%)	41	50	58
SVR (%)	20	24	22

As medições do nível de empenos foram efectuadas após *Mold*, após *Mold Cure* e após SBA (etapas críticas). Iniciou-se o estudo pelo produto dito 'crítico' (menor SOR na gama de média ocupação de silício), no sentido de seleccionar apenas uma das novas formulações na

avaliação dos outros dois produtos. Em cada uma das avaliações da formulação do EMC, para cada um dos produtos, foi medido um número diferente de substratos:

- Para F1 no produto com SOR de 41% foram medidos 15 substratos;
- Para F2 no produto com SOR de 41% foram medidos 9 substratos;
- Para F2 no produto com SOR de 50% foram medidos 12 substratos;
- Para F2 no produto com SOR de 58% foram medidos 12 substratos.

Análise e Discussão de Resultados

No gráfico da figura 44, encontram-se os valores médios obtidos nas medições do nível de empenos nas etapas críticas e o respectivo desvio padrão para as formulações F1 e F2, em cada um dos produtos; os valores PROD apresentados são valores médios da monitorização realizada em lotes produtivos, entre o mês de Março e Junho. Nesta monitorização, foram medidos 3 substratos por lote porém, para cada um dos produtos, foi medido um número diferente de lotes:

- Para o produto com SOR de 41% foram medidos 30 lotes;
- Para o produto com SOR de 50% foram medidos 33 lotes;
- Para o produto com SOR de 58% foram medidos 7 lotes.

Como a formulação F1 no produto com 41% SOR não trazia melhorias significativas no nível de empenos, comparativamente à formulação F2, aquela não foi testada nos restantes produtos. A formulação F1, relativamente aos valores PROD, possui valores médios do nível de empenos semelhantes, embora apresente um desvio padrão menor.

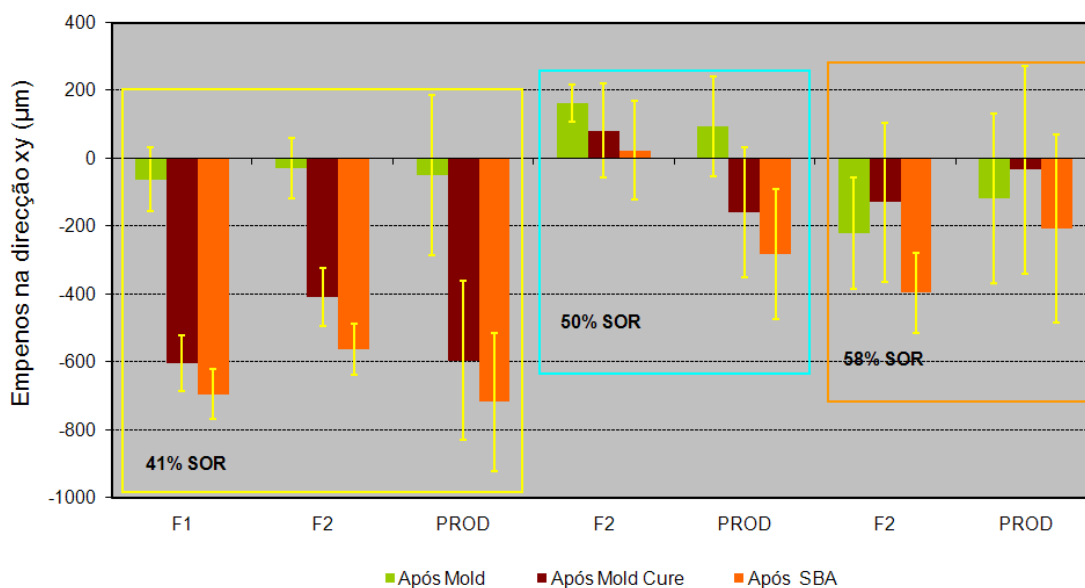


Fig.44 – Gráfico comparativo do nível de empenos nas diferentes formulações de EMC para os produtos de média ocupação de silício.

Do gráfico na figura 44 podemos verificar que:

- A melhor formulação a utilizar será a F2, já que esta induz melhorias significativas no nível de empenos em todos os produtos;
- Embora o produto de maior SOR apresente um aumento de empeno utilizando a formulação F2 o seu desvio padrão diminui; note-se que o nível de empeno não ultrapassa os valores especificados (+600 a -400 µm);
- Para o produto com SOR intermédio (50%) a formulação F2 provoca uma mudança de forma após as etapas de *Mold Cure* e SBA de *crying face* para *smiling face*;
- Variando o produto os empenos variam de comportamento, forma e nível, ao longo das etapas críticas.

Uma diminuição do módulo de contracção induzido pela diminuição do tamanho das fibras provoca melhorias no nível de empenos, para produtos de média ocupação de silício. Como descrito no ponto 1.3, verifica-se que alterações no EMC induzem diferenças ao nível de

empenos, podendo estas ter um impacto positivo em produção, ou seja, melhorando a processabilidade dos diversos produtos.

De acordo com *Chien et al.* [13], o nível de empenos é dependente: do tamanho do *die*, design do produto e das propriedades do EMC, variando o nível e forma de empenos de produto para produto. De forma a obter níveis de empenos mais baixos, os autores efectuaram alterações na formulação de EMC (adicionando proporções diferentes de resina/endurecedor flexível), alterando algumas das suas propriedades principais, nomeadamente, Tg e módulo de contracção. O aumento de resina/endurecedor flexível no EMC baixa a Tg e aumenta o módulo de contracção. Devido a diferenças entre produtos, a solução para diminuir o nível de empenos não é a mesma: para empenos com a forma *crying face*, pode-se baixar o nível de empenos usando EMC's com baixa Tg e módulo de contracção elevado enquanto para empenos com forma *smiling face*, o nível de empenos é melhorado utilizando EMC's com elevada Tg e baixos módulos de contracção.

De acordo com a bibliografia e com os resultados obtidos a melhor forma de melhorar o nível de empenos, após *Mold*, é alterar as formulações de EMC, efectuando pequenas alterações nas suas propriedades fundamentais. Desta forma, é possível diminuir o impacto dos empenos em produção. Porém, como os empenos variam de produto para produto, será necessário chegar a formulações de EMC que sejam viáveis para um leque alargado de produtos.

4. Discussão geral de resultados

De forma a entender melhor os diferentes resultados obtidos ao longo das diferentes etapas de processo do produto em estudo, a figura 45 apresenta um gráfico geral com os resultados do nível de empenos para as três etapas críticas do processo de *Assembly*, em três das fases deste trabalho: (1) influência das diversas etapas do processo de *Assembly*; (2) influência do fornecedor de substrato, e (3) influência do factor *anti-warpage*; tendo como base de comparação os resultados da monitorização efectuada em produção (PROD). Cada uma destas avaliações encontra-se demarcada pelos quadrados amarelos.

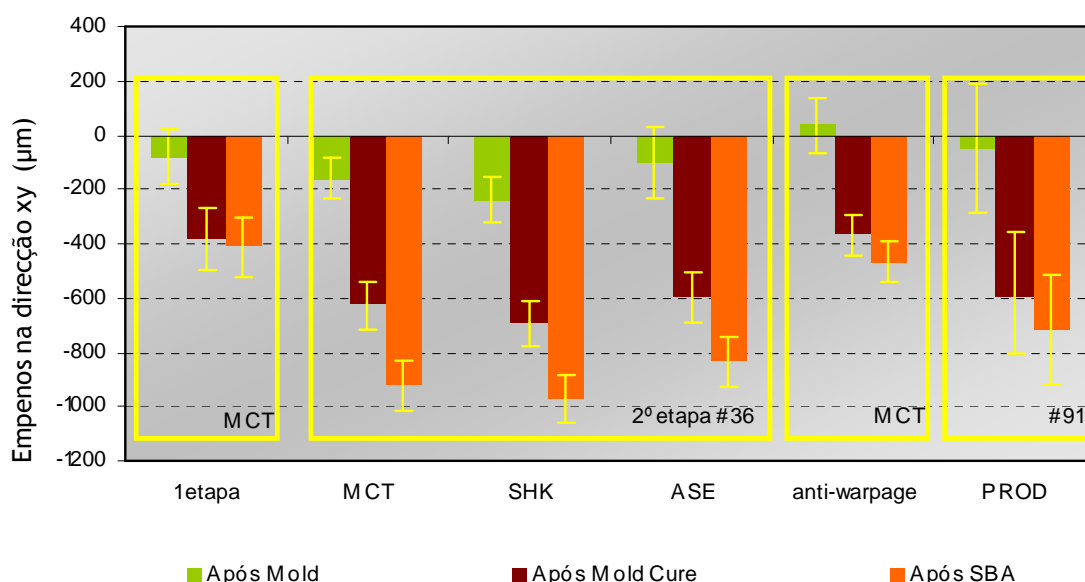


Fig.45 – Gráfico geral que engloba resultados do nível de empenos em cada etapa críticas do processo de *Assembly*, obtidos em diferentes fases do estudo.

Em todas as avaliações foi medido um número diferente de substratos: 112, 36, 12 e 91. A diferença do nível de empenos nas diferentes avaliações efectuadas pode ser explicada por estas terem sido realizadas em alturas diferentes na linha de montagem pelo que os *batches* de materiais utilizados na montagem das memórias não são os mesmos; também os equipamentos onde foram processados são diferentes. Contudo, o *batch* de MCT da 1ª avaliação é o mesmo que o utilizado na 2ª avaliação, e o *batch* de EMC utilizado na 2ª avaliação é o mesmo que o utilizado na avaliação do anti-warpage. As diferenças entre *batches* de substratos e de EMC não justificam as diferenças apresentadas no gráfico ilustrado na figura 45.

Chien e et al. [13] referem que pequenas variações em produção, quer em parâmetros do processo (utilização de equipamento diferente), quer em algumas propriedades dos materiais utilizados na montagem de memórias (o EMC e adesivo, de *batch* para *batch*, poderá ter pequenas oscilações nas propriedades Tg, E e módulo de contracção), têm impacto no nível de empenos.

5. Conclusões

O estudo de empenos em substratos durante o processo de *Assembly* realizado por etapas permitiu retirar as seguintes conclusões:

A análise da influência das etapas do processo de *Assembly* no nível de emepnos destaca 3 etapas do processo como críticas:

- Mold;
- Mold Cure;
- Solder Ball Attach.

Não foi detectada influência por parte do fornecedor de substratos no nível de empenos.

Relativamente ao factor tempo e condições de armazenamento:

- O aumento de tempo entre as etapas do processo conduz a um aumento significativo do nível de empenos em condições ambientais de sala limpa;
- O armazenamento dos lotes (entre etapas) em armário de nitrogénio reduz o aumento do nível de empenos.

A não activação do sistema anti-warpage pode levar a um incremento do nível de empeno na ordem dos 200 μ m, o que pode vir a causar problemas em produção durante as etapas de SBA e *Singulation*.

O arrefecimento forçado mostrou ter impacto positivo apenas a nível de *cycle time*, não afectando significativamente o nível de empenos após *Mold Cure*.

Uma diminuição do módulo de contracção, induzido pela diminuição do tamanho médio das fibras, provoca melhorias no nível de empenos para produtos de média ocupação de silício.

6. Considerações finais e sugestões para estudos futuros

Um estudo como este é de elevada relevância para entender o problema dos empenos em substratos, durante o processo de *Assembly*. São poucos os estudos deste tipo, existentes nesta área, sobretudo quando se trata de caracterização de empenos de produtos já em produção.

Cada produto é independente e diversas variáveis são susceptíveis de criar empenos (ponto 1.3 deste estudo). Torna-se necessário efectuar um estudo exaustivo e complexo englobando um maior leque de produtos.

Devido à grande influência negativa dos empenos no processo de *Assembly*, é necessário que se implementem procedimentos, ajustamentos e parametrizações dos equipamentos, conducentes a uma melhor estabilidade de processo (consequente maior Capacidade de Processo – Cpk), etc.

Este é um problema complexo, existem ainda questões por explicar no processo de *Assembly* existente da Qimonda PT. Em estudos futuros seria importante tentar identificar se existem outros possíveis factores e caracteriza-los de forma a melhorar o processo.

7. Glossário

Anti-warpage – sistema de transporte e arrefecimento existente na etapa de *Mold*. Este sistema serve para arrefecer os substratos após a saída destes na moldação, e transportá-los rodando-os 180° da moldação para a *degating table* (mesa onde são retirados os gitos de cada dois substratos).

ASE – Fornecedor de substratos.

Back-end – designação utilizada na indústria de semicondutores para as fábricas de montagem.

Bundle – conjunto de substratos devidamente embalados.

Batch(es) – lote(s) de um dado material utilizado na montagem de memórias.

BOC – “Board On Chip”, tipo de design utilizado na montagem de memórias. O conceito consiste em utilizar um substrato como base onde é colocado o *die* (tal como se exemplifica no ponto 3.1).

Bond Channel – área do produto onde se encontram as ligações de fio de ouro entre o *die* e o substrato.

B stage cure – ciclo de cura existente na etapa de *Printing*; pré-cura do adesivo.

Core – interior do substrato.

Crying face – designação utilizada para caracterizar a curvatura convexa dos empenos.

CTE – “Coefficient of Thermal Expansion”, coeficiente de expansão térmica ou dilatação térmica.

Cycle time – ciclo de tempo entre etapas.

Die – ou chip, parte da memória onde se encontra impresso o circuito eléctrico.

Die-Bond – etapa do processo de *Assembly* onde são colocados os *dies* nos substratos.

DRAM – “Dynamic Random Access Memory”, tipo de memória de acesso directo que armazena cada bit num condensador.

E – módulo de Young.

EMC – “Epoxy Mold Compound”, material compósito utilizado para cobrir quer os *dies* quer as ligações de fio de ouro na montagem de uma memória. Este é usualmente designado de mold compound.

FBGA – “ Fine Ball Grid Array”, tipo de encapsulamento usado para memórias.

Front-end – designação utilizada na indústria de semicondutores para as fábricas de processamento de Wafers.

G – módulo de rigidez.

Gold pad – defeito após o processo de SBA. Este consiste na não existência da bola de solda no *pad*.

Incoming – secção da Qimonda PT responsável pela distribuição e verificação do material proveniente dos fornecedores.

K – conductividade térmica.

Lancheira – estrutura de suporte utilizada em produção para transportar magazines.

Lead Frame – suporte metálico utilizado na montagem de memórias.

Magazine – estrutura de suporte utilizada em produção para transportar substratos.

MCT – fornecedor de substratos.

Mold – (molde) etapa do processo de *Assembly*, moldação dos componentes.

Mold Cure – etapa de cura no processo de *Assembly*, cura após molde.

MSP – “Mark Scan and Pack” etapa do processo de *Assembly* que consiste na marcação e embalagem de memórias.

Pad – contacto eléctrico.

Pre-Assembly – processo anterior ao processo de *Assembly*, incluindo desbaste e diminuição das *wafers*, assim como o corte destas em *dies*.

Printing – etapa do processo de *Assembly*, onde é colocado o adesivo sobre o substrato.

Processo de Assembly – processo de encapsulamento das memórias RAM/DRAM, na Qimonda PT.

RAM – “Random Access Memory”, memória de acesso aleatório, memória primária.

RDL – “Re-Distribution Layer”, etapa na Qimonda PT que permite a redistribuição do circuitos nos *dies*, de forma a estes se poderem sobrepor, sistema dual *die*.

SBA – “Solder Ball Attach”, etapa do processo de *Assembly*, colocação das bolas de solda.

Singulation – etapa do processo de *Assembly*, singularização das unidades.

SHK – fornecedor de substratos.

Smilling face – designação utilizada para caracterizar a curvatura côncava dos empenos.

Solder resist – máscara polimérica que se encontra à superfície de um substrato.

SOR – "Silicon Occupation Ratio", rácio de ocupação silício.

SVR – "Silicon Volume Ratio", rácio de volúmica de silício.

Test Operations – área de manufactura na Qimonda PT, que se dedica aos testes eléctricos (testes de memórias).

Tg – temperatura de transição vítrea.

TSOP – "Thin Small Outline Package", tipo de *design* utilizado na montagem de memórias; o conceito consiste em utilizar um suporte metálico como base.

Wafer – bolacha de silício com circuitos impressos; fatia de material semicondutor.

Wafer Test – processo onde são testadas as *wafers*.

Wire Bond – etapa do processo de *Assembly*, que consiste na conexão do *die* ao substrato através de fios de ouro

Wire Plasma – etapa do processo de *Assembly*, que consiste na limpeza das superfícies de ligação do fio de ouro através do processo de plasma antes de *Wire Bond*.

8. Referências bibliográficas

1. *Qimonda website*; Disponível em: <http://www.qimonda.com> [acedido a 02/02/08]
2. Cardoso A.: *Back-end – Assembly of FBGA semiconductor components*. Abril 2008, Curso Qimonda PT-FEUP
3. Verma K., Han B.: *Warpage measurement on dielectric rough surfaces of microelectronic devices by far infrared Fizeau interferometry*. Journal of Electronic Packaging 122: 227-232, 2000
4. Liu S.L., Chen G., Yong M.S.: *EMC characterization and process study for electronics packaging*. Thin Solid Films: 462-463, 2004
5. Ding H.U., Charles I., Zhang J., Baldwin D.F.: *integrated hardware and software for improved flatness measurement with ATC4.1 flip-chip assembly case study*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 54: 1898-1904, 2005
6. Lin T.Y., Njoman B., Crouthamel D., Chua K.H.: *The impact of moisture in mold compound preforms on the warpage of PBGA package*. International Electronics Manufacturing Technology Symposium: 273-278, 2003
7. *Process Assembly flow*. Qimonda PT, 2007
8. Almeida C., Barbosa M., Pereira P., Santos R.: *Solder Joint Robustness*. Apresentação, Setembro 2007, FEUP/Cooperação Qimonda
9. Sequeiros E.W.: *Empenos em substratos durante o processo de encapsulamento de componentes microelectrónicos*. Seminário de MIEMM FEUP, 2007-2008
10. Oliveira I.: *Módulo 8 – Materiais aplicados ao Assembly*. Abril 2008, Curso Qimonda PT-FEUP
11. Oliveira I.: *Substratos BOC*. Setembro 2006, Qimonda PT
12. Hitachi Chemical: *Epoxy mold compound*. Hitachi Chemical, fornecedor de EMC
13. Chien Y.I., Zhang J., Rector L., Todd M.: *Low- Warpage molding compound development for array packages*. Global SMT & Packaging: 30-35, January 2007
14. Zhang X, Tee T.Y.: *Advanced warpage prediction methodology for matrix stacked die BGA during assembly processes*. Electronics Components and Technology Conference: 593-600, 2004
15. Barros I.: *Substrate warpage under investigation*. Maio 2007, Qimonda PT
16. Barros I., Silva M.: *Warpage Measurements*. Julho de 2007, Qimonda PT

17. *Nanofocus website*. Disponível em:

http://www.nanofocus.info/solution_overview.php?solutionId=9 [acedido a 16/01/08]

18. Manual do *software* do NanoFocus®; *Operating Manual*; 2000