



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DO PROCESSO  
DE CORTE EM 'WAFERS' PARA SEMICONDUTORES NAS  
AVARIAS ELÉCTRICAS DEVIDAS A 'CURLING'**

**Ângelo Felisberto Martins Teixeira**





**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DO PROCESSO  
DE CORTE EM 'WAFERS' PARA SEMICONDUTORES NAS  
AVARIAS ELÉCTRICAS DEVIDAS A 'CURLING'**

**Ângelo Felisberto Martins Teixeira Maia**

**1110061**

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e co-Orientação do Doutor Manuel Jorge Dores de Castro, Professor Adjunto do Departamento em Engenharia Mecânica do ISEP.*



## Júri

### Presidente

**Doutor Alexandre Goncalves Santos Santiago Sottomayor**

*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

**Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira**

*Professor Adjunto, Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão*

**Doutor Francisco José Gomes da Silva**

*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

**Doutor Manuel Jorge Dores de Castro**

*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*



## **Agradecimentos**

São devidos agradecimentos à Nanium S.A. por me terem facilitado a realização da tese nas suas instalações e a disponibilidade de todos.

Ao meu orientador, Eng. Domingos Pinto um especial obrigado pela dedicação, pelo interesse demonstrado e ajuda prestada.

Quero demonstrar também o meu agradecimento ao meu orientador de Estudo, Doutor Francisco José Gomes da Silva e co-Orientação do Doutor Manuel Jorge Dores de Castro, pela ajuda prestada.

A toda a equipa da Nanium por toda a informação disponibilizada e em especial ao apoio prestado pelo Eng. Nuno Vieira.

Por fim, a todos os que, direta ou indiretamente, me auxiliaram através de conhecimentos e informação técnica e que tornaram possível este trabalho.

Um muito obrigado.



## **Palavras-chave**

*Semicondutores, Produção de Semicondutores, Corte de 'Wafers', Avarias no Corte de Semicondutores, 'Curling'*

## **Resumo**

*A realização deste trabalho teve por base uma solicitação por parte NANIUM, S.A., produtora de semicondutores em Vila do Conde. Esta empresa recebe as 'wafers' e procede ao seu corte, expansão das ligações e montagem de 'chips' que são posteriormente utilizados em dispositivos de telecomunicações móveis.*

*O processo de corte, tal como quase todos os outros processos envolvidos na produção destes pequenos componentes eletrónicos, necessita de uma elevadíssima precisão e rigoroso controlo do processo, sendo efectuado com serras circulares diamantadas com espessuras compreendidas entre os 20 e 300 $\mu$ m.*

*Ao efetuar o corte, estes discos passam por umas microplacas de alumínio instaladas na superfície da 'wafer', as quais servem de referência ao corte. Em determinados casos, este corte provoca a formação de 'curling' (enrolamento do alumínio) na zona de corte, quando atravessa a placa de alumínio. Estes defeitos provocam avarias elétricas que conduzem a rejeição liminar do produto e à degradação da imagem do fabricante, pelo que necessita ser convenientemente estudado e corrigido, por forma a garantir os níveis de qualidade normalmente praticados neste tipo de indústria.*

*Assim, foram elencados todos os parâmetros envolvidos no processo, foi realizada uma combinação de todos os fatores que poderão estar na origem do problema acima assinalado e foi realizada uma análise pelo método de Taguchi, por forma a eliminar combinações de parâmetros cuja análise seja redundante ou desnecessária. Seguidamente, foram realizados ensaios contemplando todas as combinações de parâmetros entendidas como importantes após a análise pelo método de Taguchi, sendo depois efetuada a respetiva análise dos resultados. Traçadas as conclusões, foi efetuada a implementação dos procedimentos entendidos como mais corretos para garantir a qualidade desejada.*



## **Keywords**

*Semiconductors, Semiconductors Production, 'Wafers' Cutting Process, Cutting Defects on 'Chips', 'Curling'*

## **Abstract**

*This study was based on a request made by NANIUM S.A., producer of semiconductors in Vila do Conde. This company receives the 'wafers' and proceeds to its cut, wiring electrical expansion and assembly of 'chips' that are then used in mobile telecommunications devices.*

*The cutting process, as almost all other processes involved in the production of these small electronic components, requires a very high precision and accurate control of the process, being carried out with diamond circular saws with thicknesses between 20 and 300  $\mu\text{m}$ .*

*When the cut is being made, these discs cross some aluminum micro-plates installed on the wafer surface, which work as a reference to the cut. In certain cases, this cut causes the formation of 'curling' (aluminum winding) in the cutting area, when the saw disc crosses the aluminum plate. These defects cause electrical failures that lead to rejection injunction of the product and the image degradation of the manufacturer, so it needs to be properly studied and overcome, in order to ensure quality levels usually practiced in this kind of industry.*

*Thus, all parameters involved in the process were listed; a combination of all the parameters involved on cutting process was done and an analysis was performed by the Taguchi method to eliminate combinations of parameters whose analysis is redundant or unnecessary. Then, tests were carried out covering all combinations of parameters understood as important following the results of the Taguchi analysis, being made the corresponding analysis of the results. Drawn the conclusions, the implementation of procedures was made, ensuring the desired quality.*



## Lista de Símbolos e Abreviaturas

Ag – símbolo químico de prata  
Al – símbolo químico do alumínio  
ANOVA – análise de variância  
C – símbolo químico do carbono  
cBN – nitrato de boro cúbico  
CI – circuito integrado  
Cu – símbolo químico do cobre  
CVD – deposição por vaporização química  
DOE – planejamento de experiência  
Ge – símbolo químico do germânio  
GL – grau de liberdade  
np – tipo de junção np  
rpm – rotações por minuto  
Si – símbolo químico do silício  
Ti – símbolo químico de titânio  
TiN – nitrato de titânio  
TiW – titânio tungstênio  
UV – ultra violeta  
Z1 – eixo de corte um  
Z2 – eixo de corte dois



## Glossário de Termos

**Backend** – designação dada à fábrica com o processo final da criação de semicondutores;

**Blades** – lâminas de corte;

**Blank Silicon**-wafer de silício que serve de substrato para a fabricação dos circuitos integrados;

**Chip**- circuito integrado;

**Chipping**- defeito de lascagem inerente ao processo de corte de wafers;

**Curling** – rebarba das estruturas de alumínio resultantes do processo de corte;

**Dicer** – equipamento que corta a wafer individualizando as unidades;

**Dress**- processo de acondicionamento da lâmina efetuados em material não produtivo;

**eWLB** – designação dada a uma tecnologia de fabricação de semicondutores;

**Frame** – moldura para suporte da wafer;

**Frontend** – designação dada à fábrica com o processo inicial da criação de semicondutores;

**Fun-Out**- tecnologias de distribuição dos contactos da unidade por todo encapsulamento.

**Grinder** – equipamento que retifica a wafer reduzindo a sua espessura;

**Laminator** – equipamento que coloca uma película protetora na parte ativa da wafer;

**LBS** – designação da área final do processo: marcação, soldadura de bolas nos contactos e individualização das unidades moldadas;

**Mold compound** – material de encapsulamento;

**Pads** – designação dada aos contactos das unidades;

**Package**- encapsulamento das unidades;

**RDL** – designação da área onde se faz a redistribuição dos contactos da wafer;

**Recon** – designação da área onde é reconstruída a wafer com mold compound;

**Recwafers**- wafers reconstruídas com mold-compound;

**Spindles** – motores de alta rotação que suportam as lâminas de corte;

**Sputtering**- processo físico de deposição de metais;

**Trays** – suporte para as unidades individualizadas;

**Wafer** – disco de silício que serve de base aos semicondutores;

**WaferPrep** – área de preparação das wafers;

**Wheel**- lâmina utilizada para a retificação as wafers;



## Índice de Figuras

Figura 1 Fases de fabrico de semicondutores.....	5
Figura 2 Vestuário de sala limpa.....	6
Figura 3 Representação da circulação do ar na sala limpa [22].....	6
Figura 4 Imagem de sala limpa antes da instalação de equipamentos .....	7
Figura 5 Imagem à esquerda Frontend, à direita Backend [23].....	7
Figura 6 Wafer de silício .....	8
Figura 7 Processo Czochralski [24].....	8
Figura 8 Lingotes de silício [25] .....	9
Figura 9 Estágios no processo de eWLB [26] .....	11
Figura 10 Flow do processo eWLB [26] .....	11
Figura 11 Tapes usadas no processo de laminação [26] .....	12
Figura 12 <i>Wafer</i> esquerda só com Z1 e à direita com Z1e Z2.....	12
Figura 13 <i>Wafer</i> montada na <i>frame</i> .....	13
Figura 14 Lâmina e processo de corte [26].....	13
Figura 15 Rua antes e depois do corte .....	13
Figura 16 <i>Mold carrier</i> [26].....	14
Figura 17 Processo de molde [26] .....	14
Figura 18 Representação da prensa de molde [26].....	14
Figura 19 Representação do processo de RDL [26] .....	16
Figura 20 Wafer com distribuição de pads por todo encapsulamento [26] .....	17
Figura 21 Representação do processo Grinder plano 2 [26] .....	17
Figura 22 Marcação da unidade a laser [26].....	18
Figura 23 Wafer com bolas de solda nos <i>pads</i> [26] .....	18
Figura 24 Unidades colocadas em <i>trays</i> [26] .....	19
Figura 25 Embalamento do lote [26].....	19
Figura 26 Representação dos eixos de corte da <i>dicer</i> [27] .....	20
Figura 27 Representação de <i>single cutting</i> [28] .....	20
Figura 28 Representação de <i>Dual Cutting</i> [28].....	21
Figura 29 Representação de <i>Step Cutting</i> [28] .....	21
Figura 30 Representação de <i>Bevel Cutting</i> [28].....	21
Figura 31 Representação de <i>Laser Grooving</i> [28].....	22
Figura 32 Composição da Lâmina [2] .....	22
Figura 33 Representação das bolsas de corte [2] .....	23
Figura 34 Lâmina antes e depois de criar as bolsas [2] .....	23
Figura 35 Desgaste e perda de grãos abrasivos [2].....	23
Figura 36 Corte de material frágil [2] .....	24
Figura 37 Corte de material dúctil [2].....	24

Figura 38 Alumínio agarrado à lâmina [2] .....	25
Figura 39 Lâmina vidrada [2] .....	25
Figura 40 Representação do raio das lâminas [3] .....	26
Figura 41 Relação entre espessura da lâmina e corte em onda/ lâmina partida [3] .....	26
Figura 42 Relação altura da lâmina com corte em onda e lâmina partida [3] .....	27
Figura 43 Cortes com aglomerante de várias durezas [4] .....	28
Figura 44 Relação entre ligante e qualidade de corte [4] .....	29
Figura 45 Lâminas com diferentes concentrações de grãos [5] .....	29
Figura 46 Cortes com diferentes concentrações [5] .....	30
Figura 47 Relação entre concentração e <i>chipping</i> frontal [5] .....	30
Figura 48 Influência da água de corte na lâmina [6] .....	31
Figura 49 Fornecimento de água desequilibrado [6] .....	31
Figura 50 Exemplos de tamanho de Mesh [7] .....	32
Figura 51 Relação tamanho de grão e do <i>chipping</i> [7] .....	33
Figura 52 Representação do sentido de rotação da lâmina e direção de corte [8] .....	33
Figura 53 Imagem de corte com rotação da lâmina no sentido direto e inverso .....	34
Figura 54 Relação do <i>chipping</i> com a velocidade de rotação da lâmina [9] .....	34
Figura 55 Relação entre velocidade de avanço e <i>chipping</i> na parte de trás. [10] .....	35
Figura 56 Relação entre velocidade de corte e <i>chipping</i> / tempo de vida da lâmina/ rendimento do processo [10] .....	36
Figura 57 Imagem de wafer cortada .....	38
Figura 58 Imagem de estruturas nas ruas de corte ( <i>pads</i> ) .....	38
Figura 59 Imagem de <i>curling</i> .....	39
Figura 60 Fatores que influenciam um processo .....	43
Figura 61 Matriz triangular [35] .....	44
Figura 62 Grafos lineares [36] .....	45
Figura 63 Imagem da Nanium [36] .....	47
Figura 64 Instalações da Nanium [36] .....	49
Figura 65 Representação da missão e valores da Nanium [36] .....	50
Figura 66 Processo de corte Step-Cut [11] .....	51
Figura 67 Rua de corte com estruturas de alumínio .....	51
Figura 68 Rua com corte das estruturas de alumínio .....	51
Figura 69 Exemplificação do alumínio depois do corte [26] .....	52
Figura 70 Curling/Secção de unidade com tecnologia Fan-Out .....	52
Figura 71 Imagem SEM representativa do problema .....	52
Figura 72 <i>Curling</i> .....	53
Figura 73 Diagrama de Causa-Efeito .....	54
Figura 74 Representação espessura da lâmina e raio de corte [13] .....	55
Figura 75 Relação entre velocidade de rotação e <i>chipping</i> frontal [19] .....	55

Figura 76 Representação dos fatores num grafo linear [35].....	58
Figura 77 Microscópio .....	59
Figura 78 Lente de 100X .....	60
Figura 79 Local de corte .....	60
Figura 80 Exemplificação da medição/ Quadra-Check .....	61
Figura 81 Wafers usadas nas experiências .....	61
Figura 82 <i>Wafers</i> identificadas com número de experiência .....	62
Figura 83 Lâminas utilizadas nas experiências (nível 1 e 2).....	62
Figura 84 Colocação da lâmina no spindle .....	63
Figura 85 Local no <i>software</i> onde alterava a profundidade de corte e velocidade de avanço.....	63
Figura 86 Local no <i>software</i> onde alterava a velocidade de rotação da lâmina .....	63
Figura 87 Alteração da espessura da Lâmina.....	64
Figura 88 Corte das várias experiências .....	64
Figura 89 Imagem da medição de <i>curling</i> / focagem na base e focagem na parte superior do curling .....	64
Figura 90 Imagem de <i>curling</i> de uma das experiências.....	65
Figura 91 Gráfico com os resultados das experiências (software CEDA) .....	66
Figura 92 Gráfico do <i>curling</i> com os níveis do fator A .....	67
Figura 93 Gráfico do <i>curling</i> com os níveis do fator B .....	67
Figura 94 Gráfico do <i>curling</i> com os níveis do fator C .....	68
Figura 95 Gráfico do <i>curling</i> com os níveis do fator D .....	68
Figura 96 Gráfico do <i>curling</i> com os fatores AxB .....	68
Figura 97 Representação gráfica das médias.....	71



## Índice de Tabelas

Tabela 1 Materiais usados nos aglomerantes [4]: .....	27
Tabela 2 Propriedades do Silício usado nas wafers [29]: .....	37
Tabela 3 Propriedades do alumínio dos <i>pads</i> [29]:.....	39
Tabela 4 Propriedade do Níquel [29]: .....	41
Tabela 5 Propriedades das resinas fenólicas [29]: .....	41
Tabela 6 Propriedades de diamante sintético [29]: .....	41
Tabela 7 Níveis dos fatores: .....	56
Tabela 8 Matriz ortogonal L8: .....	58
Tabela 9 Matriz ortogonal com alocação dos fatores e respetivos níveis:.....	58
Tabela 10 Número de experiência e níveis dos fatores: .....	65
Tabela 11 Resultados obtidos: .....	65
Tabela 12 Médias de resultados: .....	66
Tabela 13 Interação AxB: .....	68
Tabela 14 Médias (Tabela das médias): .....	69
Tabela 15 Médias obtidas pelo <i>software</i> : .....	70
Tabela 16 Resultado da análise da variância pelo software: .....	70
Tabela 17 Estimativa da melhor combinação obtida por software: .....	72
Tabela 18 Resultado da experiência de confirmação: .....	73



# Índice

Lista de Símbolos e Abreviaturas .....	xiii
Glossário de Termos .....	xv
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tabelas .....	xxi
Índice .....	xxiii
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodologia .....	2
1.4. Estrutura .....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. A fabricação de semicondutores: Conceitos gerais .....	5
2.1.1 - Obtenção das wafers (Frontend) .....	8
2.1.2 - Preparação das wafers (Backend).....	10
2.1.2.1 WaferPrep.....	11
2.1.2.2 Recon .....	14
2.1.2.3 RDL.....	15
2.1.2.4 LBS .....	18
2.2. O processo de corte das ‘wafers’ de silício .....	19
2.2.1 O processo de corte de ‘wafers’ através de discos diamantados .....	22
2.3. Influência das variáveis no corte .....	25
2.3.1. Influência da espessura do disco de corte.....	25
2.3.2. Influência do material em que é realizado o disco de corte.....	27
2.3.3. Influência da concentração de partículas de diamante no disco de corte .....	29
2.3.4. Influência do líquido de refrigeração no corte .....	30
2.3.5. Influência da geometria da partícula de diamante no disco de corte .....	32
2.3.6. Influência do sentido de rotação do disco de corte .....	33
2.3.7. Influência da velocidade de rotação do disco de corte .....	34
2.3.8. Influência da velocidade de avanço do disco de corte .....	35
2.3.9. Influência da profundidade de corte .....	36
2.4. Propriedades dos materiais usados nas ‘wafers’ .....	36
2.4.1 Propriedades do Silício .....	36
2.4.2 Propriedades do Alumínio .....	38
2.5. Principais propriedades dos materiais envolvidos nos discos de corte .....	40

2.6. Breve introdução à metodologia de Taguchi .....	42
3. Desenvolvimento .....	47
3.1. Caracterização da empresa que acolheu o projeto .....	47
3.2. Identificação do problema.....	51
3.3. Elencagem de todos os parâmetros envolvidos no corte .....	53
3.3.1. Identificar contribuidores .....	53
3.3.2. Identificação dos fatores mais influentes .....	54
3.4. Aplicação da metodologia de Taguchi ao caso em questão.....	56
3.4.1. Seleção dos níveis dos fatores .....	56
3.4.2. Interação a analisar .....	56
3.4.3. Atribuição dos fatores à matriz.....	57
3.4.4. Alocação dos fatores e interação à matriz .....	58
3.5. Realização das experiências.....	59
3.5.1. Método de medida .....	59
3.5.2. Implementação das experiências .....	61
3.5.3. Mapeamento das experiências a realizar e resultados.....	65
3.5.4. Análise crítica dos resultados .....	66
3.5.5. Resumo dos resultados.....	72
3.5.6. Ações a implementar .....	73
3.6. Análise dos resultados obtidos com os novos procedimentos .....	73
4. Conclusões.....	75
5. Bibliografia e Outras Fontes de Informação .....	77
Referências Bibliográficas .....	77

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A indústria de semicondutores é ainda relativamente recente em Portugal, estando cá implantada há pouco mais de uma década. Este tipo de indústria assenta essencialmente em sistemas de tecnologia intensiva, onde a mão-de-obra requerida tem que obedecer a um rigoroso processo de formação.

Os meios materiais envolvidos na produção de semicondutores são extremamente específicos, necessitando de ambientes devidamente resguardados de contaminações. Todos os procedimentos são estudados até à exaustão, com vista a minimizar os problemas de qualidade que, replicados em massa num sistema de produção contínuo deste género, ou acontecendo sob a forma de eventos fortuitos, implicariam sérios problemas de confiança aos clientes e, conseqüentemente, aos produtores.

A indústria de semicondutores está segmentada, competindo a diferentes empresas proceder a cada uma das fases de produção, ou então a um determinado conjunto de etapas de produção. A produção de 'wafers' requer um determinado tipo de tecnologia (processos de difusão/dopagem, entre outros), enquanto o resto do ciclo de produção pode ser feito em uma ou mais empresas, até chegar ao 'chip' que é colocado no dispositivo eletrónico a que se destina.

O corte das 'wafers' de Silício é um processo extremamente delicado, envolvendo discos de espessura micrométrica e elevadíssimo rigor dimensional. Neste processo estão envolvidos diversos parâmetros, tais como o material e espessura do disco, a velocidade de rotação do disco, velocidade de avanço e profundidade de corte, assim como o sentido de rotação. Sendo o disco provido de partículas de diamante embebidas em resina, estão ainda outros fatores em jogo no processo, tais como o tamanho das partículas, número de partículas por unidade de área, concentração e respetiva geometria das partículas. Atendendo a que os discos atravessam zonas providas de alumínio, material com elevada ductilidade, estão criadas as condições necessárias ao aparecimento de avarias, consideradas inadmissíveis neste processo.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal proceder ao estudo do fenómeno de aparecimento de *'curling'* no processo de corte de *'wafers'* de Silício. Como corolário deste estudo, pretende-se:

- Elencar todos parâmetros envolvidos no processo;
- Estudar as possíveis interações entre parâmetros envolvidos no corte;
- Estudar e encontrar as causas do defeito;
- Elaborar procedimentos alternativos que conduzam a soluções de corte fiáveis.

Para a prossecução dos objetivos anteriormente referidos, tornar-se-á necessário:

- Estudar a influência de cada um dos parâmetros elencados no corte;
- Estudar a interação entre os mesmos e aplicar a metodologia de Taguchi com vista à minimização das experiências a realizar;
- Realizar as experiências necessárias ao isolamento do efeito de *'curling'* nas placas de alumínio colocadas na superfície das *'wafers'*, no corredor destinado ao corte;
- Estudar parâmetros alternativos no corte;
- Implementar as novas soluções;
- Realizar testes intensivos de validação dos novos parâmetros/metodologias de corte;
- Proceder à validação dos resultados;
- Proceder à elaboração do presente relatório.

## 1.3. Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a metodologia que seguidamente se descreve:

- Análise detalhada do problema;
- Pesquisa bibliográfica sobre problemas idênticos em outros tipos de indústria, mas igualmente em escala micrométrica;
- Estudo da influência de cada parâmetro no processo de corte;
- Estudo da interação entre os diversos parâmetros;
- Aplicação da metodologia de Taguchi;

- Mapeamento das experiências a realizar;
- Realização de experiências;
- Tratamento dos dados;
- Análise crítica dos resultados;
- Análise de técnicas de corte alternativas e de conjugação de parâmetros com vista à resolução do problema;
- Realização massiva de experiências com os novos parâmetros ou com novas metodologias de corte;
- Análise crítica dos resultados;
- Validação das soluções encontradas;
- Redação da presente dissertação.

#### **1.4. Estrutura**

A estrutura deste trabalho está assente essencialmente em duas partes: uma Revisão Bibliográfica inicial, onde se pretende enquadrar o leitor com os temas envolvidos nesta dissertação, passando em revista o processo de produção dos semicondutores envolvido neste trabalho e os desenvolvimentos técnicos e científicos que foram publicados em livros e periódicos científicos dedicados à matéria; e o Desenvolvimento do Trabalho Prático propriamente dito, com a referência ao estudo desenvolvido, soluções encontradas, assim como o tratamento e análise crítica dos resultados.

ESTA PÁGINA FOI, INTENCIONALMENTE, DEIXADA EM BRANCO.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. A fabricação de semicondutores: Conceitos gerais

A fabricação de semicondutores divide-se em duas fases ou processos: processos de Frontend e processos de Backend.

No 'Frontend' são produzidas as 'wafers' e realizados os processos para a criação dos circuitos integrados.

No 'Backend' é acrescentado suporte físico, encapsulamento, marcação das unidades e poderá também ser feito o teste das mesmas.

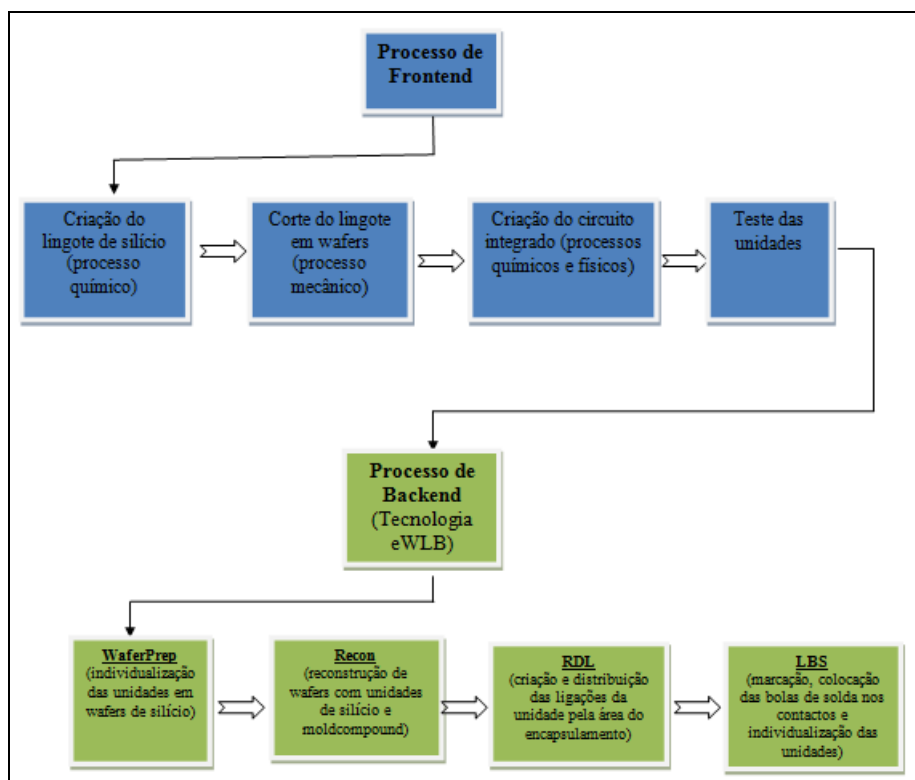


Figura 1 Fases de fabrico de semicondutores

A produção de circuitos integrados (CI) necessita de um controlo elevado do ambiente, uma vez que se trata de uma tecnologia de dimensões micro. As contaminações e partículas reduzem ou impedem o bom funcionamento do componente.

Uma sala limpa tem um sistema de manutenção e tratamento que assegura constantemente a qualidade do ar interior, contendo o nível de contaminantes e partículas dentro dos limites estabelecidos por norma, para determinada atividade.

Como tal, os colaboradores que trabalham neste tipo de ambiente usam vestuário apropriado, mediante o rigor que o processo exige.



Figura 2 Vestuário de sala limpa

Tanto os equipamentos como todos os materiais usados são concebidos para o uso em salas limpas, de forma a não libertarem partículas.

As salas limpas são classificadas mediante a pureza do seu ar. O método universalmente aplicado para esta classificação é dado pelo número de partículas igual ou maior do que 0,5mm num pé cúbico de ar.

O sistema de insuflação nas salas é feito através de fluxo laminar e com pressão positiva.

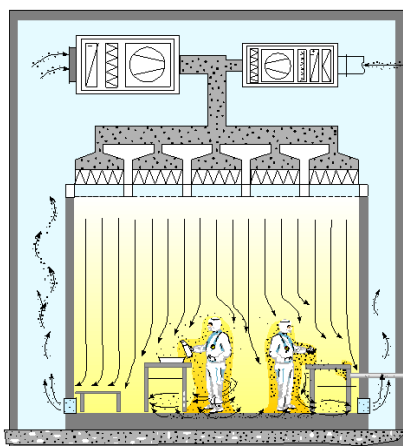


Figura 3 Representação da circulação do ar na sala limpa [22]

As salas que exigem maior grau de pureza do ar devem possuir pressão superior às adjacentes e essas às outras, evitando assim a passagem de partículas.



Figura 4 Imagem de sala limpa antes da instalação de equipamentos



Figura 5 Imagem à esquerda Frontend, à direita Backend [23]

Os semicondutores são materiais cujas propriedades elétricas variam mediante determinadas condições.

Podem ser semicondutores intrínsecos (puros) e semicondutores extrínsecos ou dopados que possuem certas impurezas para melhor se controlar as suas características elétricas.

São exemplo destes materiais o carbono (C), germânio (Ge) e o mais utilizado, silício (Si).

A base para a fabricação de semicondutores ou circuitos integrados são as *'wafers'*, discos de silício.

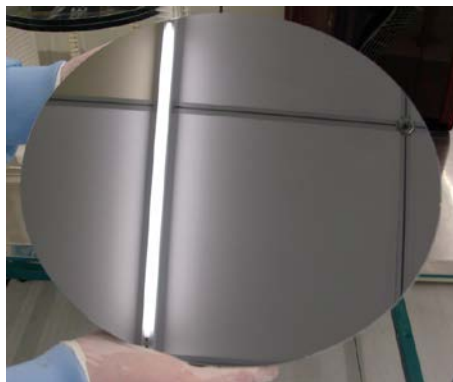


Figura 6 Wafer de silício

### 2.1.1 - Obtenção das wafers (Frontend)

O silício para a fabricação das 'wafers' encontra-se na natureza sob a forma de areia, ou no quartzo, e a primeira fase consiste numa refinação. O silício é aquecido até aos 1700°C para eliminar as impurezas por reação gasosa.

O material resultante é silício puro com uma estrutura policristalina e necessita de uma uniformidade na sua orientação atómica. Para poder ser usado na fabricação de 'wafers' necessita de uma estrutura monocristalina, uma vez que esta estrutura apresenta as propriedades elétricas desejadas.

O método mais usado para o crescimento do lingote de silício é o método de "Czochralski", onde o silício puro é colocado num cadinho de quartzo e aquecido até ao seu ponto de fusão (1415°C). Em seguida é introduzido um cristal de silício no silício derretido no cadinho, e por rotação dá-se o crescimento do lingote.

Para crescer do tipo p ou n são introduzidas impurezas na massa fundida, por exemplo, o fósforo para o tipo n e o boro para o tipo p.

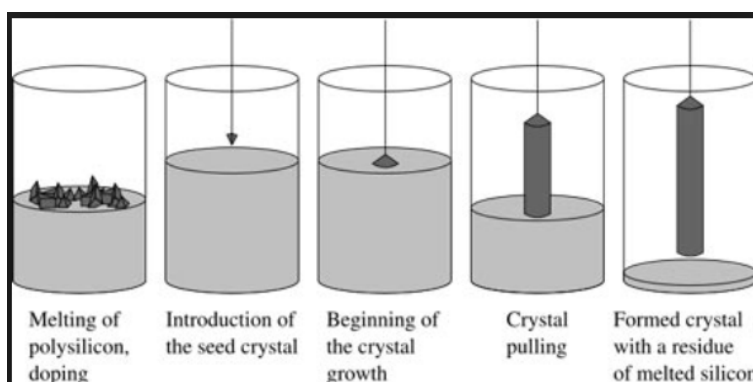


Figura 7 Processo Czochralski [24]

As *'wafers'* são cortadas com uma serra de fios com 0,170mm de diâmetro em aço inoxidável revestidos com bronze e refrigeração líquida. São posteriormente polidas numa ou duas faces até apresentarem um aspeto espelhado. As *'wafers'* podem ter diâmetros variados desde 25,4mm até 300mm. [1]



Figura 8 Lingotes de silício [25]

A criação dos circuitos integrados, dos quais fazem parte resistências, transístores e condensadores, é realizada nas *'wafers'* através de várias sequências de processos químicos e físicos:

- Oxidação - é o processo de criação de uma camada de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) na *'wafer'*. Esta é aquecida entre  $900^\circ\text{C}$  a  $1200^\circ\text{C}$  numa atmosfera rica em oxigénio. Este processo proporciona um bom dielétrico.
- Fotolitografia – é o processo pelo qual os elementos que constituem o CI são transferidos para a *'wafer'*. Inicia-se com a aplicação de uma camada de fotoresiste de forma uniforme por cima da oxidação. Seguidamente é colocada uma máscara com a estrutura do CI. Por imposição de luz UV vão ser polarizadas ou não determinadas áreas na *'wafer'*, conforme estrutura da máscara. Nas áreas polarizadas o fotoresiste endurece, nas áreas não polarizadas não endurece. Posteriormente a *'wafer'* é lavada com um solvente químico para a remoção do fotoresiste e áreas oxidadas não protegidas pela máscara, sendo o resultado final uma *'wafer'* com o padrão dos CI em óxido de silício na *'wafer'*.
- Difusão – é o processo utilizado para a criação de junções do tipo np. Neste processo são implantados átomos impuros num cristal de silício puro, de forma a convertê-lo em tipo n ou p. São exemplos destes elementos dopantes o antimónio, arsénio e fósforo.

- Deposição Epitaxial – é o processo utilizado para a colocação de uma camada fina de silício (25 um) que é dopada da mesma forma que na Difusão. Existem outros métodos de Deposição Química, como a Deposição Química a Vapor (CVD).
- Metalização – Este processo consiste na deposição de material condutor para as ligações dos componentes constituintes do CI. Os materiais usados para estas ligações são: alumínio, ligas de alumínio, platina, titânio, tungsténio, molibdénio e ouro. O alumínio é o mais usado. Para a deposição deste material condutor é usado igualmente um processo fotoresiste e uma técnica de deposição por vácuo. Outro método utilizado é o *'Sputering'*, processo físico de deposição (um gás inerte como o árgon é ionizado e projetado contra uma placa de alumínio - estas partículas separam os átomos do alumínio que são depois depositados na *'wafer'*). Um problema que pode ocorrer quando o alumínio puro está em contacto com o silício é que ao ser aquecido, pode formar um eutético de alumínio e silício. A liga pode penetrar na *'wafer'* e formar curtos circuitos nas ligações pn. Para evitar essa situação é colocada uma camada de isolamento em titânio tungsténio (TiW) ou nitrato de titânio (TiN) – entre o alumínio e o silício.
- Passivação – é o processo pelo qual é colocada uma camada de um elemento passivante para proteger a metalização da humidade e contaminantes. A passivação consiste em colocar sobre a forma de vapor, dióxido de silício ou nitreto de silício, deixando expostas apenas os *'pads'* (área de contacto) para as ligações do CI. [1]

Foram descritos até agora os processos de *'Frontend'*. Depois de concluídos os processos de criação dos circuitos integrados, as wafers são enviadas para o Backend, onde recebem processos de encapsulamento e individualização das unidades.

### **2.1.2 - Preparação das wafers (Backend)**

A NANIUM tem um contrato de parceria com a Infineon Technologies para a produção de volume em 300mm da tecnologia eWLB. Este contrato permite à NANIUM ser uma das primeiras empresas de semicondutores a fabricar 300mm em eWLB.

A tecnologia eWLB usa uma combinação entre processos de *'Frontend'* e *'Backend'*, utilizando técnicas de fabricação de processos paralelos, mantendo todos os *chips* na *'wafer'* até à

conclusão do processo, tendo como objetivo melhorar a performance do produto e os custos de produção. eWLB (*embed wafer level ball grind array*) é uma tecnologia de encapsulamento revolucionária desenvolvida pela Infineon em finais de 2007. Esta tecnologia torna-se *'benchmark'* a nível de integração e eficiência energética, com grande desempenho para os dispositivos móveis.

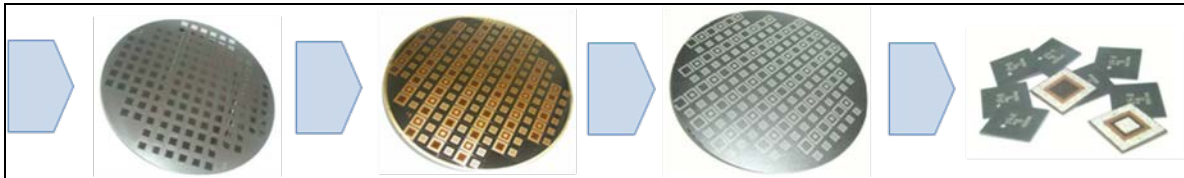


Figura 9 Estágios no processo de eWLB [26]

O processo eWLB é realizado em quatro áreas: WaferPrep, Recon, RDL e LBS. As *'wafers'* em cada uma das áreas estão sujeitas a diversos processos.

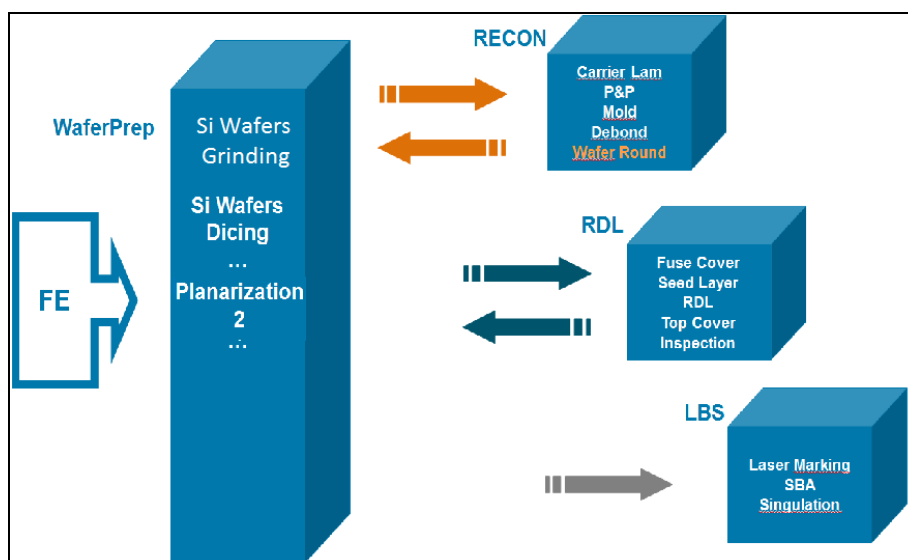


Figura 10 Flow do processo eWLB [26]

As *'Wafers'* chegam do *'Frontend'* em silício e são direcionadas para o início do processo que se realiza no *WaferPrep*.

### 2.1.2.1 WaferPrep

- Si Wafer Lamination

O objetivo deste primeiro processo é preparar as *'wafers'* para a redução de espessura, corte e consequente individualização das unidades.

Começa com uma laminação (*Lamination*) e consiste na colocação de uma película protetora na parte ativa das 'Wafers', para proteção durante os processos seguintes.

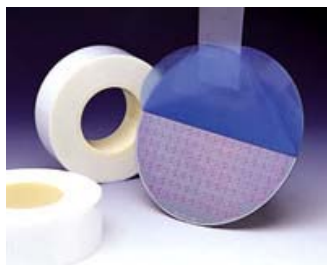


Figura 11 Tapes usadas no processo de laminação [26]

- Si Wafers Grinding

Este processo tem a função de redução da espessura das 'wafers' vindas do 'Frontend' em silício. Essa redução é feita através de um processo de desgaste mecânico por contacto na parte de trás das 'wafers'. A máquina baseia-se na técnica de 'in-feed grinding'. Para esse efeito, a máquina possui 2 'Spindles' e com diferentes tipos de 'grinding wheels'. A primeira 'Spindle/Grinding Wheel' (Z1), faz o desbaste da 'wafer' até uma espessura quase próxima da espessura final. A segunda 'Spindle/Grinding Wheel' (Z2) encarrega-se de fazer o acabamento da 'wafer', que consiste em polir a parte de trás da mesma.

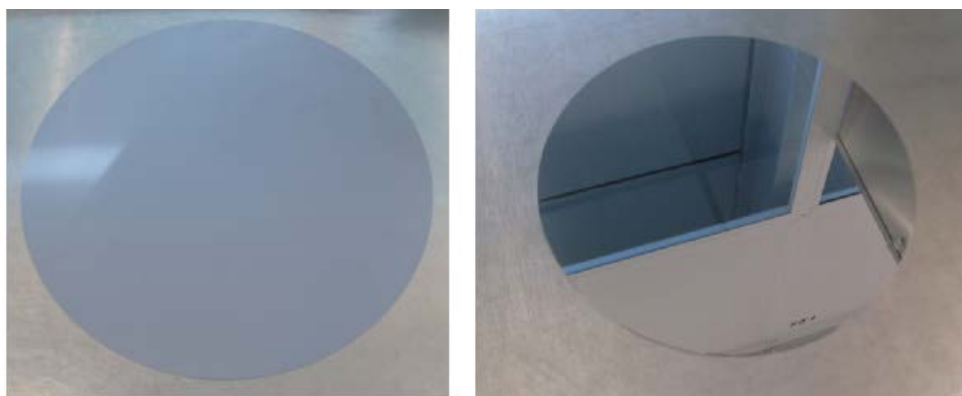


Figura 12 Wafer esquerda só com Z1 e à direita com Z1e Z2

- Si Wafers Dicing

Depois do 'Grinding' as 'Wafers' são montadas (*Mounting*) numa moldura (*frame*) com o auxílio de um plástico (*tape*), que servirá de suporte para o corte. A 'tape' colocada em laminação é retirada no final deste processo.

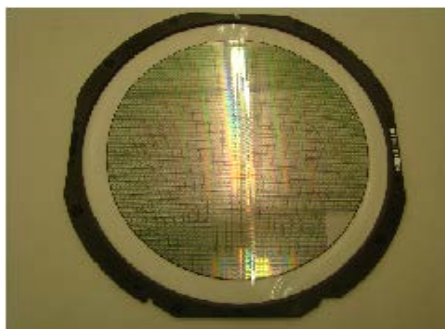


Figura 13 Wafer montada na frame

Por fim, as 'wafer' são cortadas (*Dicing*) e neste processo é realizada a individualização das unidades.

É nesta fase que ocorre o 'curling', problema inerente ao processo e consiste em rebarbas de alumínio de estruturas de teste que se encontram nas ruas de corte (tema principal da tese e que por isso será abordado mais em pormenor no CAP 2.2)

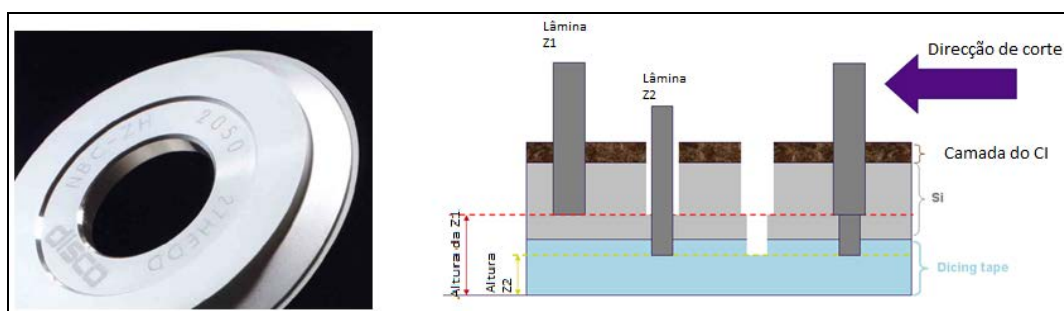


Figura 14 Lâmina e processo de corte [26]

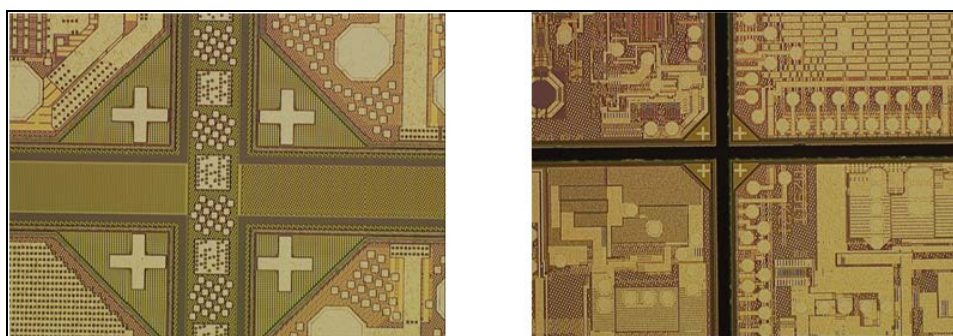


Figura 15 Rua antes e depois do corte

Os materiais usados nestes processos são: 'tape' de laminação e montagem; lâminas de corte.

Após este processo inicial em *WaferPrep*, as *Wafers* passam à área de *Recon*.

### 2.1.2.2 Recon

Nesta área a finalidade do processo é a de construir 'wafers', utilizando os chips de silício, anteriormente cortados, envolvendo-os com um material aglomerante (*mold compound*).

O processo inicia com a colocação de uma película adesiva (laminação), sobre uma peça metálica (*mold carrier*). Em seguida os chips são retirados (Pick&Place) da 'waferframe' e colocados no adesivo no 'mold carrier'.

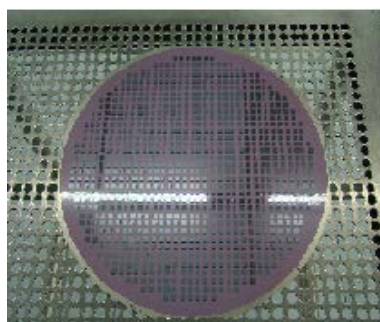


Figura 16 Mold carrier [26]

No processo seguinte (Mold), a 'wafer' reconstruída recebe o aglomerante (*mold compound*). Com uma prensa é realizada a sua conformação.



Figura 17 Processo de molde [26]

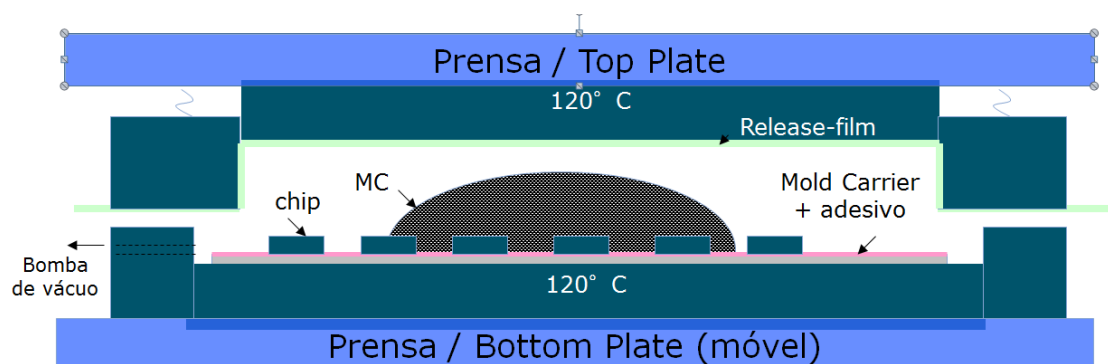


Figura 18 Representação da prensa de molde [26]

Por fim é necessário separar (*Debond*) o adesivo e o '*mold carrier*' da '*wafer*' reconstruída.

O excedente resultante do '*molding*' é retirado com um processo chamado de '*Wafer Rounding*'.

Os materiais usados nesta área são: a tape adesiva e o '*mold compound*'.

Cada wafer de silício dá para reconstruir 3 '*Recwafers*' (com unidades de silício e moldcompound) de 300mm. O objetivo é obter uma área maior por cada unidade para permitir a distribuição das ligações por todo o encapsulamento.

Depois da reconstrução das '*wafers*' com '*mold compound*' (*recwafers*), vão para a área de RDL.

### **2.1.2.3 RDL**

Os processos em RDL têm a finalidade de, através de recursos fotolitográficos e químicos, aumentarem a superfície que permite um maior número de contactos entre o exterior e o chip.

O processo (*Fuse Cover*) começa com a aplicação de uma cobertura fotossensível (químico). Posteriormente é aplicada a uma máscara a luz UV, transferindo assim a forma geométrica pretendida para o químico fotossensível.

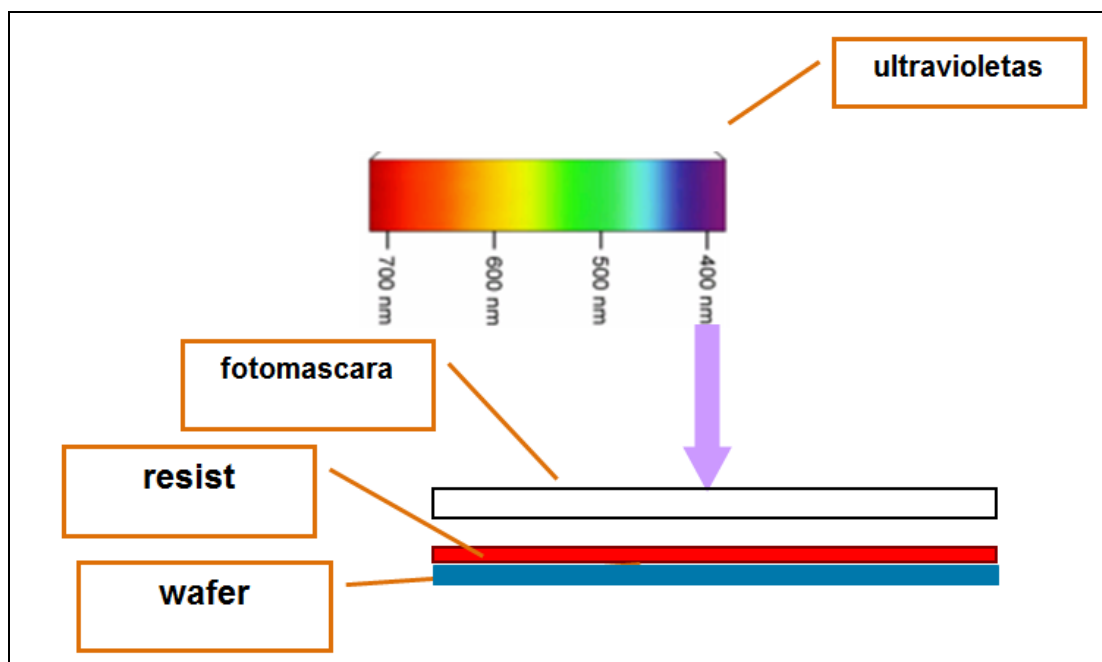


Figura 19 Representação do processo de RDL [26]

No processo seguinte dá-se a deposição de titânio e cobre ( *Seed Layer*).

É novamente colocada uma película de químico fotossensível e transferida uma máscara com um padrão (RDL\_Pattern), por incidência de luz UV. As pistas de cobre são depositadas por eletrodeposição.

É removido o químico, cobre e titânio, exceto as pistas.

A 'wafer' é coberta com químico que solidifica através de uma cura.

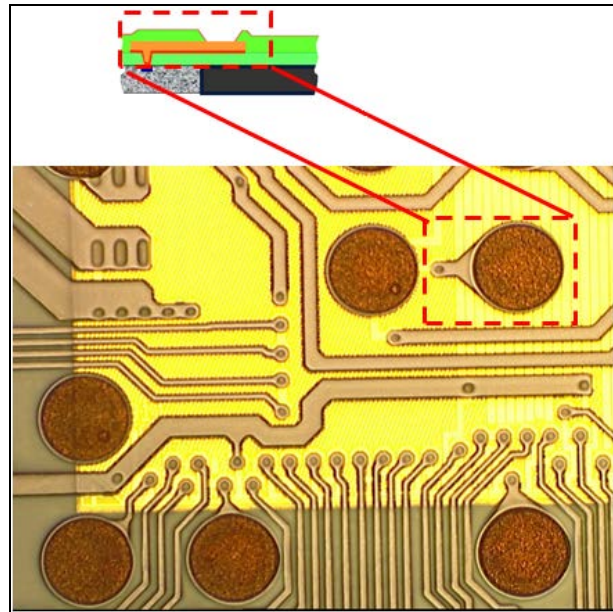


Figura 20 Wafer com distribuição de pads por todo encapsulamento [26]

Os materiais usados nesta área são: químicos, ácidos, cobre e titânio.

No final deste processo o material volta ao WaferPrep receber um processo de retificação semelhante ao descrito na preparação dos wafers (waferprep/planarization 2).

- WaferPrep/Planarization 2

O objetivo deste processo é novamente a redução da espessura da 'wafer' através de desbaste mecânico na parte de trás, obtendo assim a espessura final do produto.

Inicia-se o processo com a colocação de uma película protetora e posteriormente faz-se o desbaste (GrindWP2).

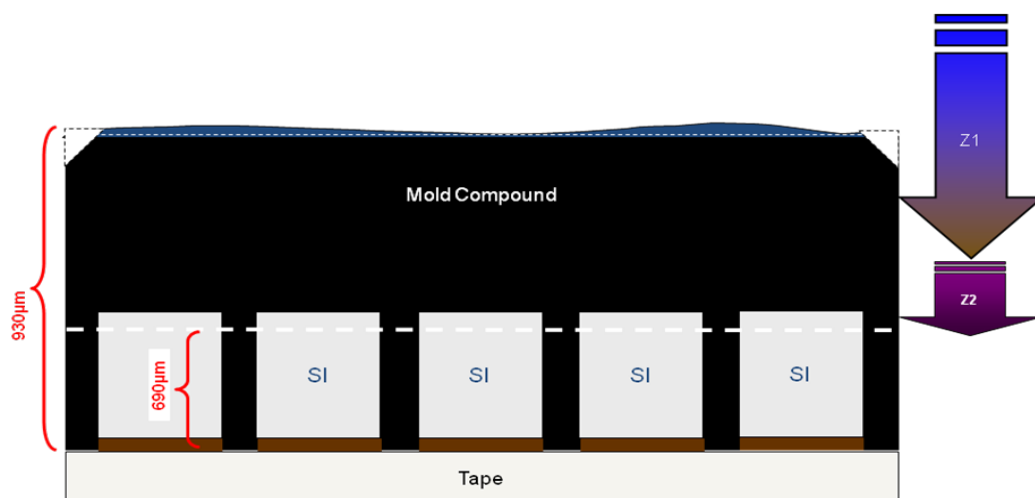


Figura 21 Representação do processo Grinder plano 2 [26]

### 2.1.2.4 LBS

Nesta área a finalidade é a marcação de todas as unidades. Estas são individualizadas e expedidas para o armazém.

O primeiro processo é então o LaserMark, pelo qual todas as unidades na 'wafer' são marcadas através de raios laser.

A marcação é efetuada conforme layout estipulado onde consta o código do produto e o número de série da unidade.

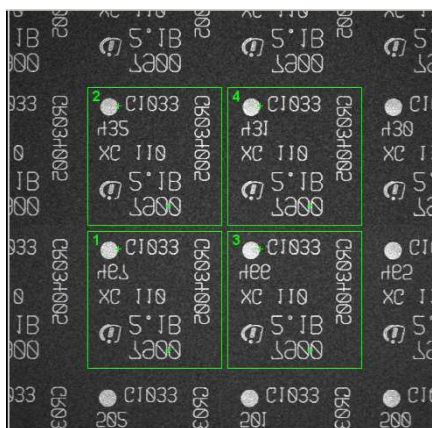


Figura 22 Marcação da unidade a laser [26]

Depois são colocadas as esferas de solda nos 'pads' (SBA) que vão permitir a ligação elétrica e mecânica às aplicações para que foram construídas. Para facilitar a soldadura das esferas de solda aos 'pads' recebem fluxo e o processo realiza-se num forno.

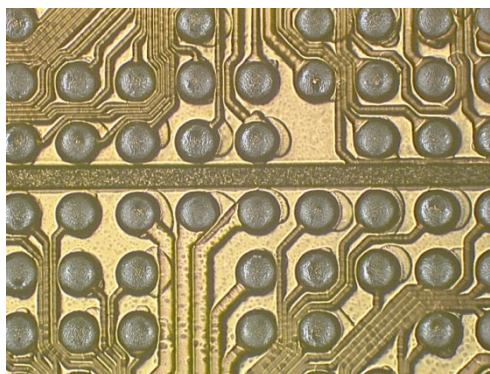


Figura 23 Wafer com bolas de solda nos pads [26]

As unidades que estão em wafer são individualizadas (*Singulation*), cortadas por lâminas inspecionadas e colocadas em 'trays'.

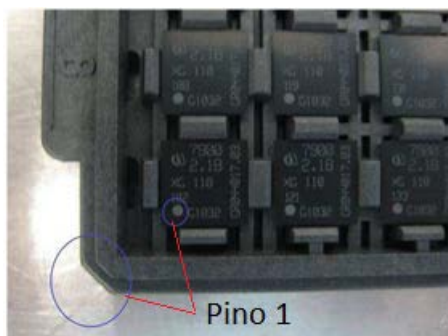


Figura 24 Unidades colocadas em trays [26]

- Packing e Shipping

Finalmente é executado o último passo do processo. O lote é embalado e colocado em armazém.



Figura 25 Embalamento do lote [26]

## 2.2. O processo de corte das 'wafers' de silício

O processo de corte de 'wafers' é realizado por um equipamento denominado de 'Dicer'. O sistema responsável pelo corte é constituído por dois motores (*spindles*), cujo rotor está suspenso numa almofada de ar. Desta forma consegue atingir rotações elevadas efetuando um corte com extrema precisão. Os '*spindles*' estão colocados frente a frente, e com a ajuda de um sistema de eixos, efetuam movimentos em Y e Z. A wafer é colocada numa mesa por baixo deste sistema de eixos e com movimento segundo o eixo XX efetua o corte.

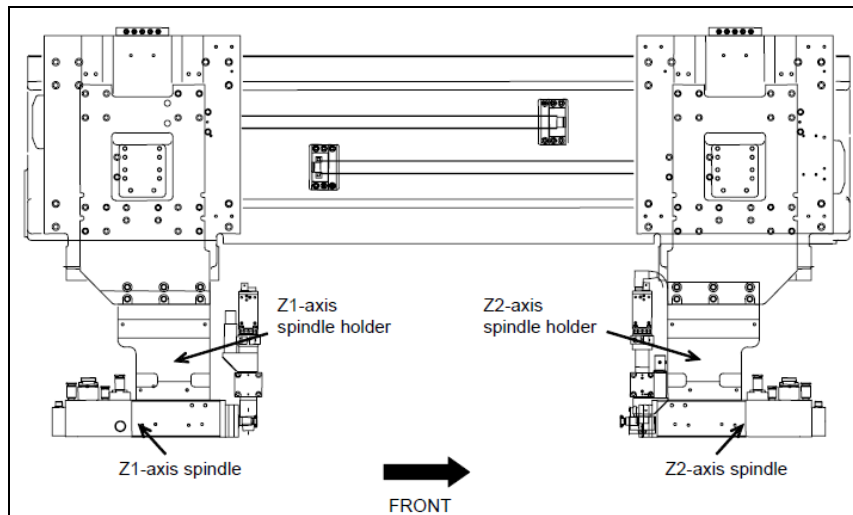


Figura 26 Representação dos eixos de corte da dicer [27]

O corte consiste na individualização das unidades da *'wafer'*. Os *'spindles'* estão equipados com lâminas (*blades*) constituídas por grãos de diamante e material ligante.

Existem várias formas de efetuar o corte de *'wafers'*:

- *"Single Cutting"* – método que utiliza um *'spindle'* equipado com uma lâmina e efetua o corte do silício até à *'tape'* com uma única passagem.

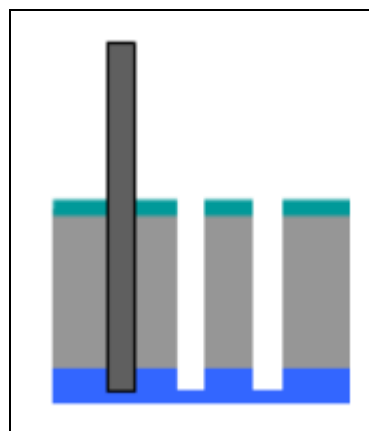


Figura 27 Representação de *single cutting* [28]

- *"Dual Cutting"* – este método é idêntico ao método anterior, com a diferença da utilização em simultâneo dos dois *'spindles'* para executar o corte. Este método oferece um elevado rendimento em termos de *'output'*.

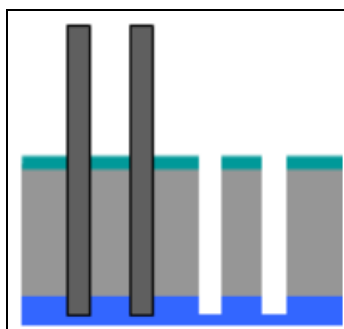


Figura 28 Representação de *Dual Cutting* [28]

- “*Step Cutting*” – neste método os ‘*spindles*’ estão equipados com lâminas de diferentes espessuras ( $Z1$  e  $Z2$ ). O corte é efetuado por duas passagens, a primeira com  $Z1$  de maior espessura e na segunda com  $Z2$ , mais fina. Este método de corte traz benefícios em termos da redução da lascagem (*shipping*) na parte inferior da ‘*wafer*’.

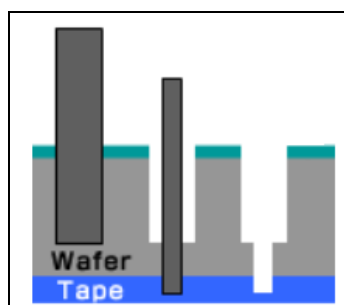


Figura 29 Representação de *Step Cutting* [28]

- “*Bevel Cutting*” – este método é semelhante ao ‘*Step Cutting*’, com a diferença em que a lâmina  $Z1$  é em forma de V. Na primeira passagem é efetuado um chanfro, em que a largura do corte é resultante em função da profundidade da passagem. As unidades são individualizadas numa segunda passagem com uma lâmina reta standard. Este método dá ao ‘*chip*’ um chanfro na parte superior, o que resulta num aumento da sua resistência.

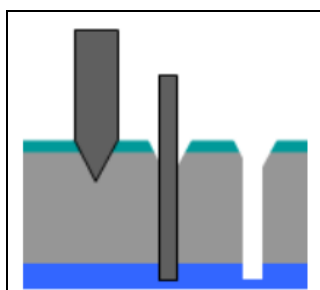


Figura 30 Representação de *Bevel Cutting* [28]

- “*Lazer Grooving Process*” – neste método o primeiro corte é efectuado por laser e em seguida as unidades são individualizadas pela passagem de uma lâmina ‘*standard*’. Este método é indicado para ‘*wafers*’ cujas ruas tenham metais duros. Assim, consegue-se o corte a velocidades normais e evitam-se defeitos relacionados com o corte de lâminas normais. Tem a desvantagem de poder apresentar uma área termicamente afetada.

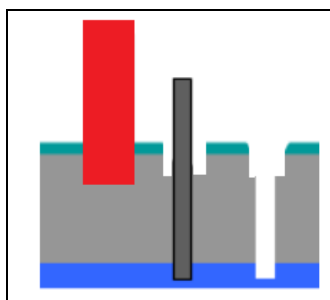


Figura 31 Representação de *Laser Grooving* [28]

### 2.2.1 O processo de corte de ‘*wafers*’ através de discos diamantados

O corte de ‘*Wafers*’ é realizado por lâminas (*blades*) construídas com características próprias para o corte de silício.

A lâmina é constituída por partículas abrasivas (normalmente diamante) e um material aglomerante para as manter coesas.

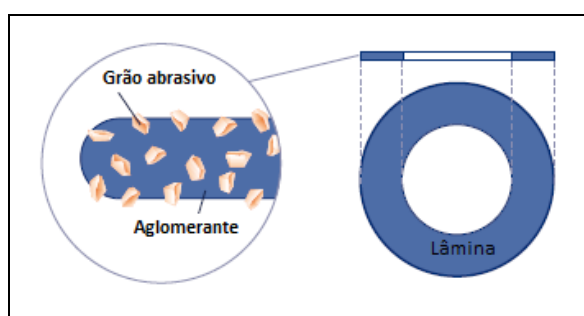


Figura 32 Composição da Lâmina [2]

A lâmina realiza o corte através de um desgaste abrasivo em que o espaço entre os grãos do abrasivo tem um papel importante. Entre os grãos abrasivos, no material ligante da lâmina é importante que se crie bolsas ou depressões para ajudarem e permitirem a remoção dos resíduos de silício resultantes do corte.

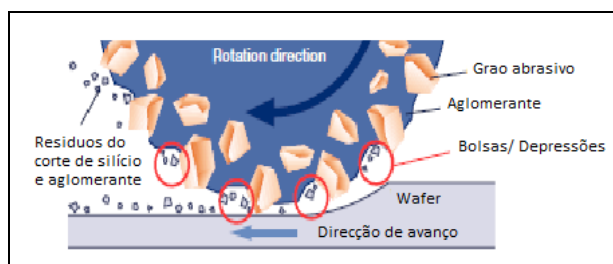


Figura 33 Representação das bolsas de corte [2]

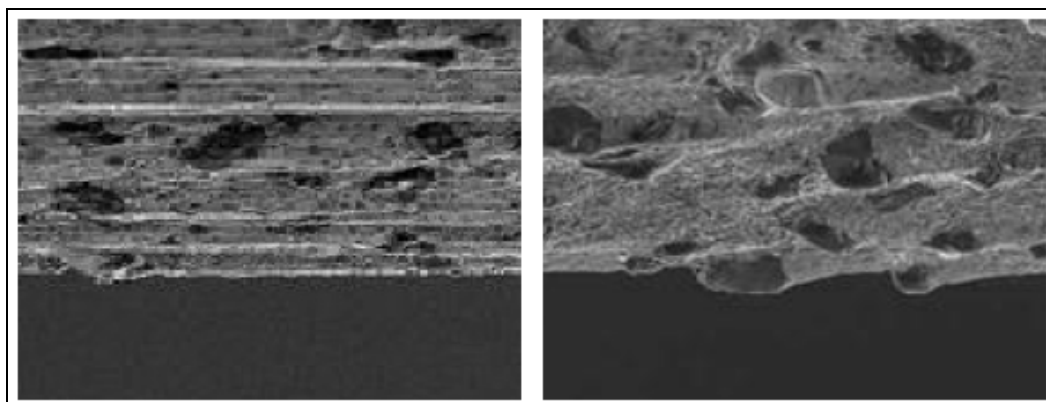


Figura 34 Lâmina antes e depois de criar as bolsas [2]

As bolsas entre os grãos e o abrasivo têm a função de recolha e transporte dos resíduos para fora do corte, mas também têm a função de transporte de água para a zona de corte e assim efetuar a refrigeração do mesmo.

Uma lâmina nova não apresenta estas bolsas, mas após a colocação de uma lâmina nova, é efectuado um procedimento denominado 'dress', ou seja, são efetuados vários cortes numa 'wafer' de silício, para permitir a criação das bolsas.

Estas lâminas têm a característica de se auto-afiarem, ao contrário das outras ferramentas de corte, durante o processo de corte. Isto acontece devido ao desgaste do material ligante, ou seja, conforme as partículas abrasivas vão desaparecendo, vai-se desgastando também o material ligante, permitindo o aparecimento de novas partículas e a desagregação de outras, pelo que mantém sempre uma aresta de corte afiada.

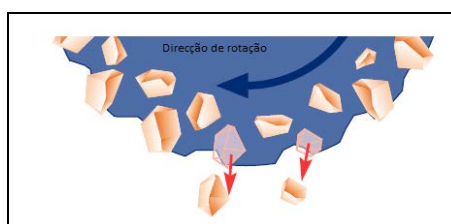


Figura 35 Desgaste e perda de grãos abrasivos [2]

Existem dois modos de processamento de corte, conforme a natureza do material que se pretende cortar: modo frágil e modo dúctil.

O modo frágil é aplicado para materiais frágeis, como é o caso do silício. Neste modo os grãos abrasivos partem pequenos pedaços ao entrarem em contacto com o material a cortar.

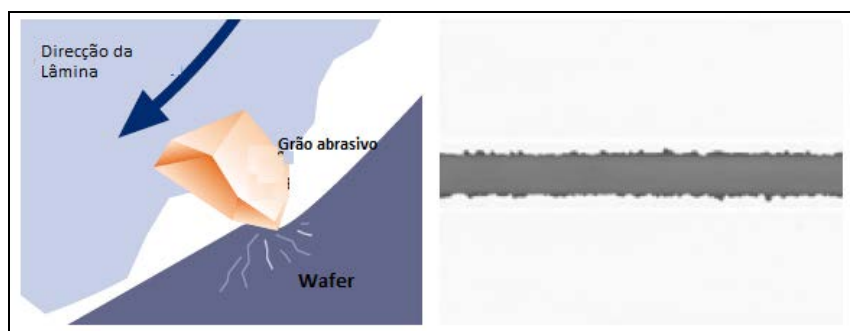


Figura 36 Corte de material frágil [2]

O modo dúctil é aplicado para materiais dúcteis, como é o caso do alumínio. Neste modo os grãos abrasivos raspam o material que se deforma e cria pequenas projeções ou caracóis de alumínio no material cortado. O aparecimento deste fenómeno, caracóis de alumínio (curling) está inerente ao processo de 'dicing' e é o objeto de estudo desta tese.

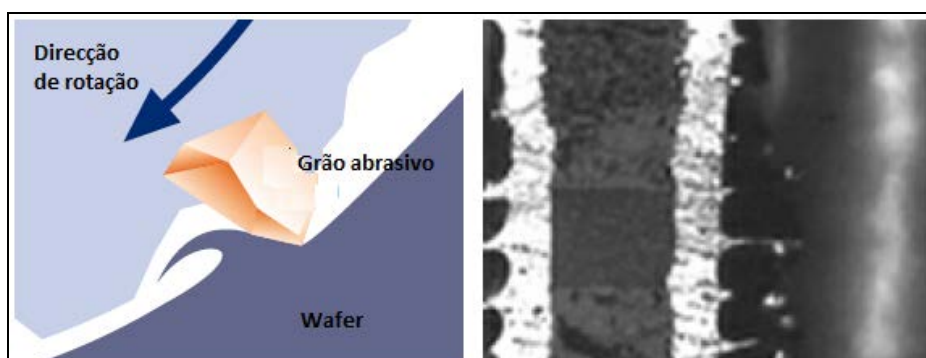


Figura 37 Corte de material dúctil [2]

Quando o processo de auto-afiação não é realizado convenientemente, proporciona problemas na qualidade do corte e reduz a vida nominal da lâmina.

Os modos de falha da lâmina podem ser por adição de material dúctil (Al, Cu, Ag), que cobre e enche as bolsas, ou por a lâmina ficar vidrada: o material aglomerante não se desgasta devido à elevada tenacidade do grão. [2]

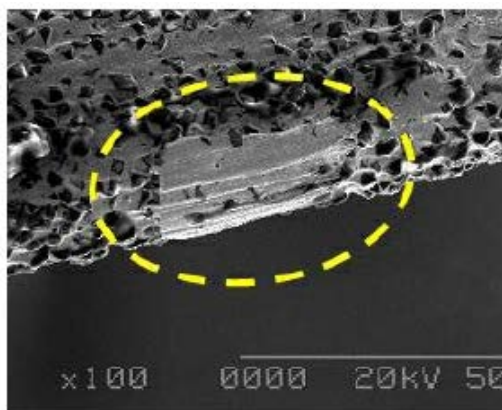


Figura 38 Alumínio agarrado à lâmina [2]

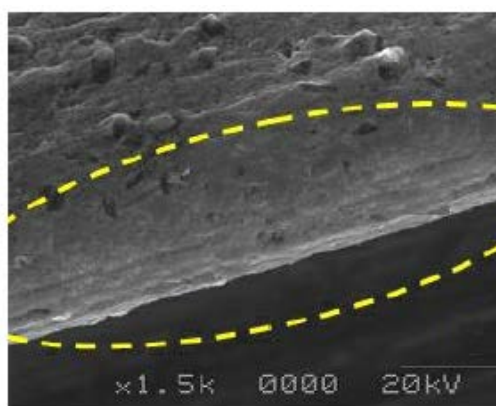


Figura 39 Lâmina vidrada [2]

### **2.3. Influência das variáveis no corte**

Devido à natureza frágil do silício, o corte de 'wafers' é um processo crítico com inúmeras variáveis que o influenciam. Desta forma, é fundamental conhecer essas variáveis de processo, monitorá-las e ter sob controle o maior número possível, de forma a garantir a reprodutibilidade de resultados com o mínimo de desvio e ruído.

#### **2.3.1. Influência da espessura do disco de corte**

A espessura e a altura da lâmina têm influência na qualidade do corte. Quando se aumenta a espessura da lâmina, aumenta o raio do corte na aresta da lâmina, o que vai provocar um aumento da força aplicada durante o corte. Isto resulta no aparecimento de defeitos

denominados de *'chipping'*, tanto na parte superior do corte na *'wafer'* como na parte inferior desta.

*'Chipping'* está inerente ao *'dicing'* de silício devido à sua fragilidade. Corresponde à irregularidade do corte (efeito de dente de serra), poderá ser um problema de qualidade se não for controlado.

Por outro lado, se se usar ou diminuir a espessura da lâmina, aumenta a probabilidade desta se partir.

No corte de *'wafers'* é crítica a escolha da espessura da lâmina no sentido de se evitarem estes problemas.

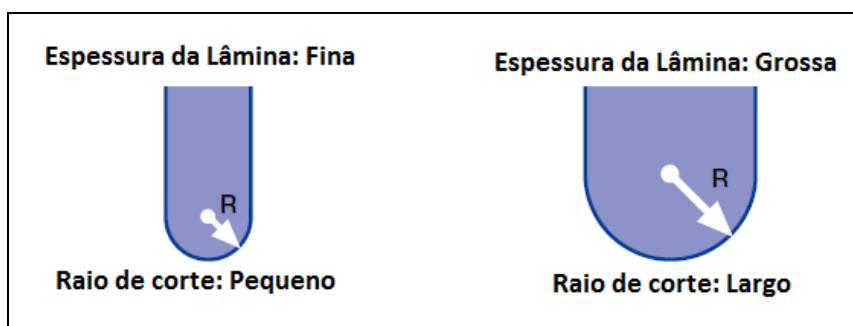


Figura 40 Representação do raio das lâminas [3]

Na indústria dos semicondutores existe uma tendência para diminuir a espessura das ruas de corte, para aumentar ao número de unidades em cada *'wafer'*. Existe de igual forma a tendência para se aumentar a altura da lâmina, no sentido do aumento de vida útil da mesma.

Quando a altura da lâmina é muito elevada em relação à espessura, pode ocorrer o fenómeno de corte em onda, devido à falta de resistência da lâmina. A altura da lâmina não deve exceder 25 vezes a espessura da mesma, para se evitar o aparecimento de corte em onda e consequentemente a lâmina partida. [3]

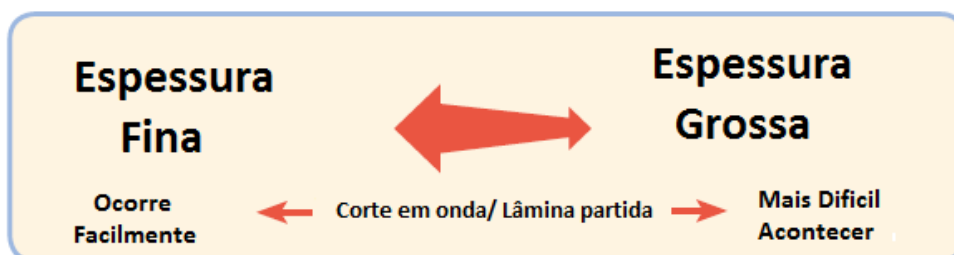


Figura 41 Relação entre espessura da lâmina e corte em onda/ lâmina partida [3]

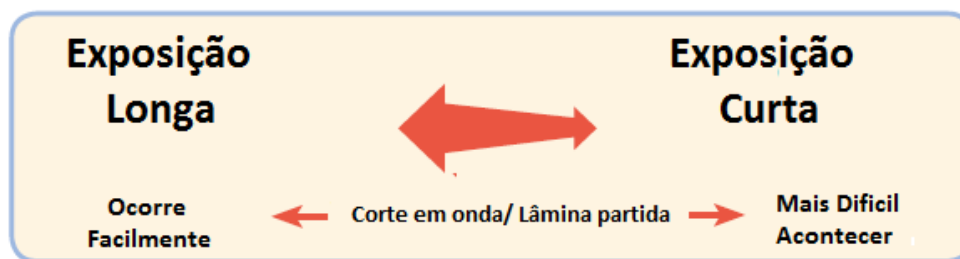


Figura 42 Relação altura da lâmina com corte em onda e lâmina partida [3]

### 2.3.2. Influência do material em que é realizado o disco de corte

Conforme dito anteriormente, a lâmina é constituída por grãos abrasivos (ex. partículas de diamante) e um material ligante. O tipo de material ligante influencia os resultados do corte. Existem 4 tipos de material ligante: metal, resina, vitrificado e galvanizado.

Os grãos abrasivos não estão ligados quimicamente ao aglomerante, apenas existe uma ligação mecânica.

A resina é o aglomerante mais fraco em termos de ligação mecânica aos grãos. A ligação mecânica aumenta gradualmente no material vitrificado, metálico e por fim galvânico.

Tabela 1 Materiais usados nos aglomerantes [4]:

Tipo	Material	Características	Aplicações
Resina	Resina	Fabricada por sinterização com resina termo-endurecida. É elástica e tem boa capacidade de corte, mas desgaste elevado.	Vidro; Semicondutores; Cerâmicas, etc.
Metal	Metal (Sinterizado)	Fabricada por sinterização com pó de metal. Alta capacidade de ligação com o abrasivo pelo que apresenta resistência ao desgaste.	Componentes eletrônicos; Peças óticas; Semicondutores; Cerâmicas; Ferrite; Vidro, etc.

Vitrificado	Vitrificado	Fabricado por sinterização com pó de porcelana. Menor deformação elástica, adequado quando é necessário elevada carga de corte.	Adequado para corte de materiais duros e frágeis; Vidro; Cristal, etc.
Eletrodeposição Galvânica	Metal (Impregnando)	Principal material é o Níquel. Feita por eletrodeposição. Apresenta menor desgaste e elevada resistência. Possibilita a obtenção de espessuras reduzidas.	<i>Wafers</i> de silício; <i>Wafers</i> oxidadas; Cerâmicas; Materiais duros e frágeis, etc.

A influência de ligantes mais macios apresenta menor capacidade de ligação mecânica aos grãos, logo tem melhor capacidade de se auto-afiarem, elevado desgaste mas com corte de qualidade. Ligações mais elásticas têm maior capacidade de amortecer impactos do material abrasivo, logo apresenta menos defeitos tal como o 'chipping'.

Ligantes mais duros têm maior capacidade de ligação mecânica aos grãos, mas menor elasticidade e menor consumo ou desgaste, conseqüentemente menor capacidade de absorver os impactos no material abrasivo, logo proporciona um corte com menor qualidade. [4]

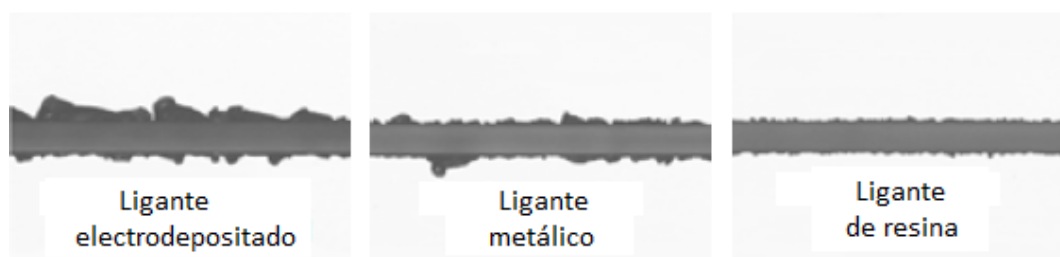


Figura 43 Cortes com aglomerante de várias durezas [4]

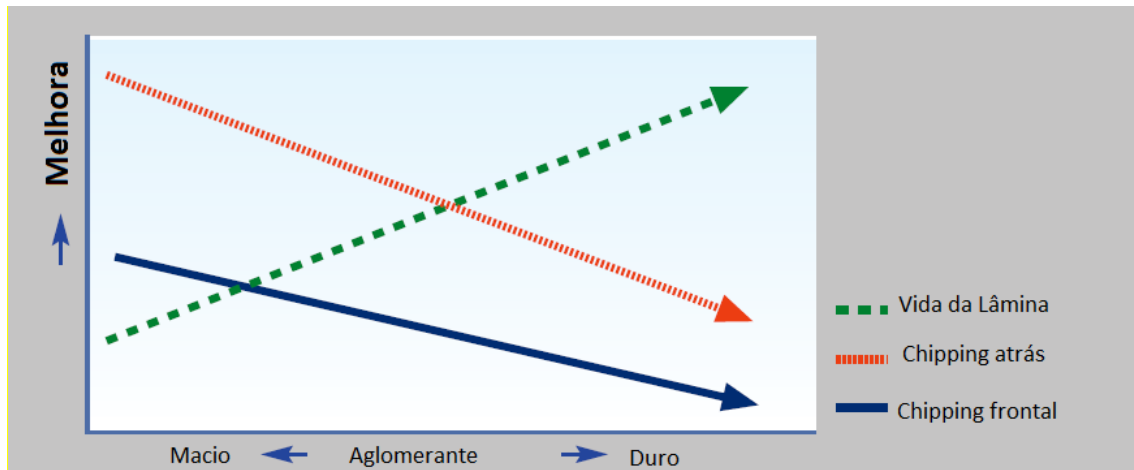


Figura 44 Relação entre ligante e qualidade de corte [4]

### 2.3.3. Influência da concentração de partículas de diamante no disco de corte

A concentração mede a quantidade de grãos abrasivos que uma lâmina contém. A diferença de concentração de grãos abrasivos influencia a qualidade de corte.

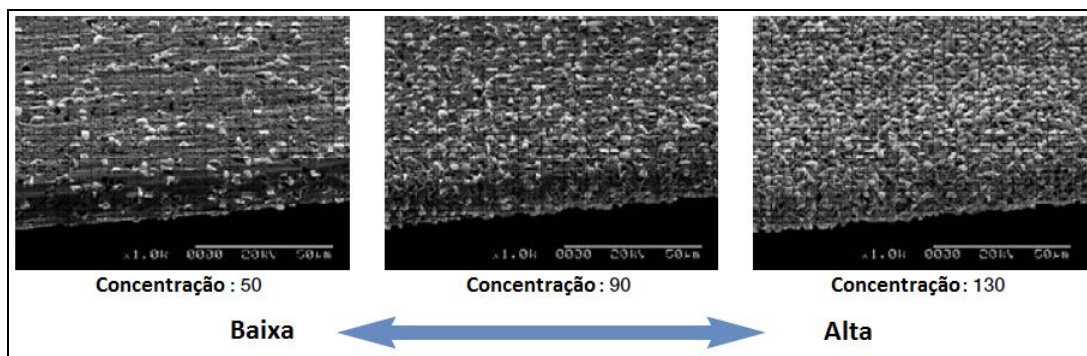


Figura 45 Lâminas com diferentes concentrações de grãos [5]

Uma menor concentração de grãos abrasivos produz um aumento da força em cada um, o que aumenta o desgaste e conseqüentemente maior capacidade de auto-fiação e qualidade de corte.

O aumento da concentração reduz a carga em cada grão abrasivo e diminui o desgaste da lâmina. Um aumento de concentração aumenta o 'chipping' na parte de trás do corte. [5]

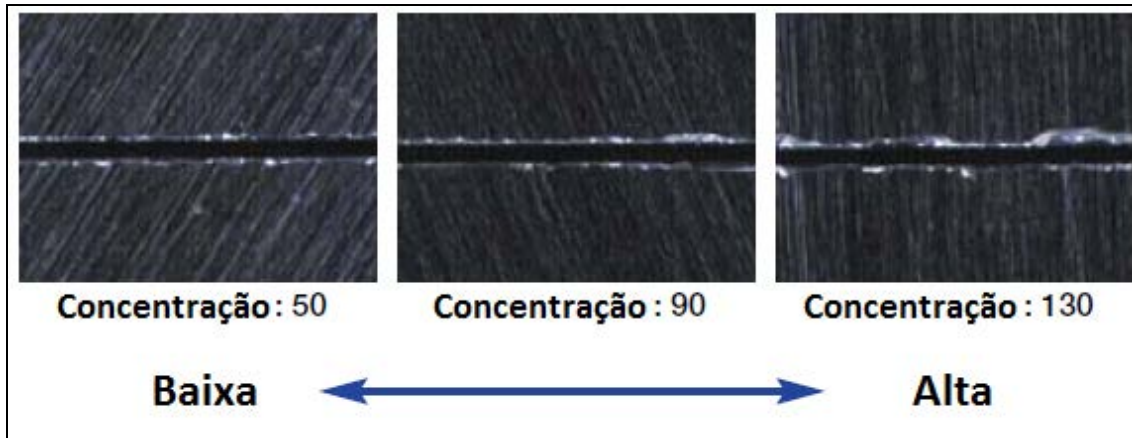


Figura 46 Cortes com diferentes concentrações [5]

O 'chipping' na parte da frente da 'wafer' diminui de tamanho com o aumento da concentração.

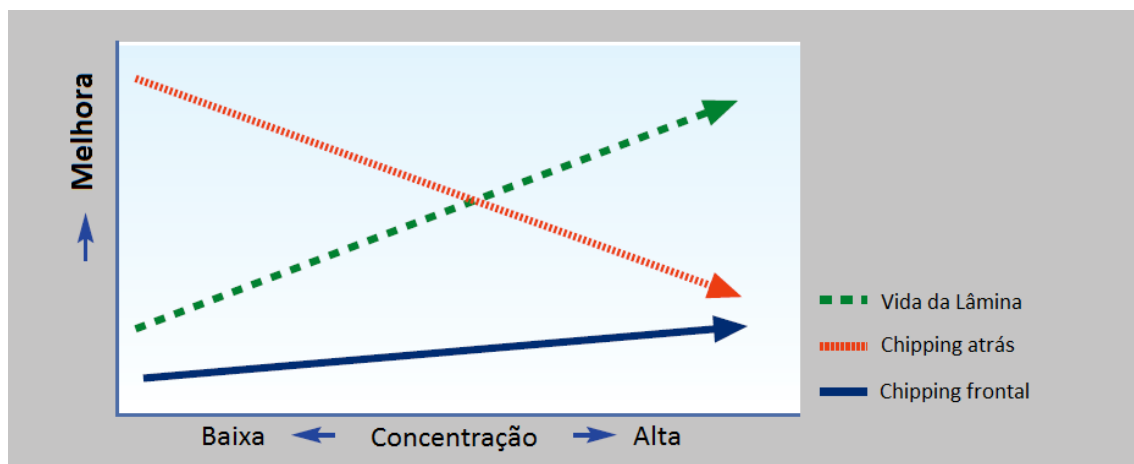


Figura 47 Relação entre concentração e *chipping* frontal [5]

#### 2.3.4. Influência do líquido de refrigeração no corte

No processo do corte do silício um dos fatores importantes que influenciam a qualidade de corte é a água de refrigeração. A orientação desta é fundamental para o bom desempenho da lâmina.

A água de corte tem dois objetivos: tem a função de refrigeração e remover resíduos de silício do ponto de corte.

O fornecimento da água de corte influencia o desgaste da lâmina, quando é insuficiente aumenta esse desgaste. Refrigeração insuficiente provoca deterioração e oxidação dos grãos abrasivos da lâmina proporcionando um desgaste superior da mesma, dando origem a um problema de qualidade como a falta de profundidade do corte (não corta completamente o material).

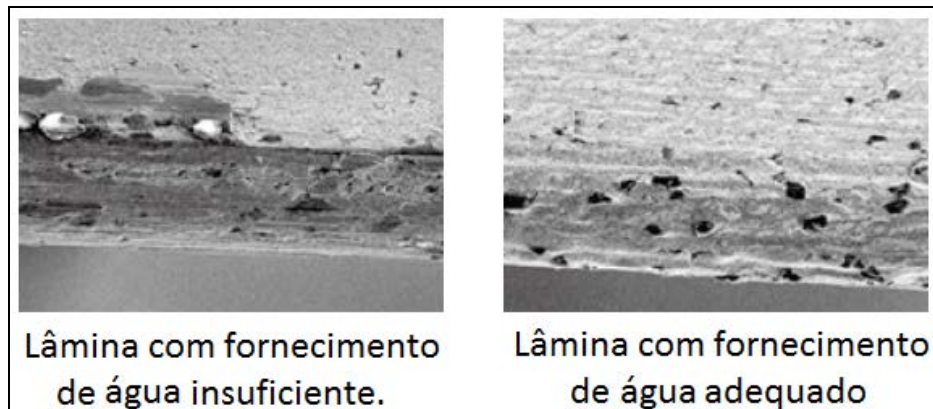


Figura 48 Influência da água de corte na lâmina [6]

A lâmina roda normalmente entre 10000 e 60000 rpm, pelo que o atrito provocado no ponto de processamento é elevado e conseqüentemente provoca aquecimento. Devido a isto é importante um adequado arrefecimento pela água de corte. O calor excessivo provoca uma zona grande termicamente afetada, pondo em causa a qualidade do material.

A água de corte, além de ter de ser suficiente, também deve ser bem distribuída pela lâmina. Caso isso não aconteça, pode proporcionar um desgaste desigual, ou se for mais forte de um lado, provocar a inclinação da lâmina durante o corte. [6]

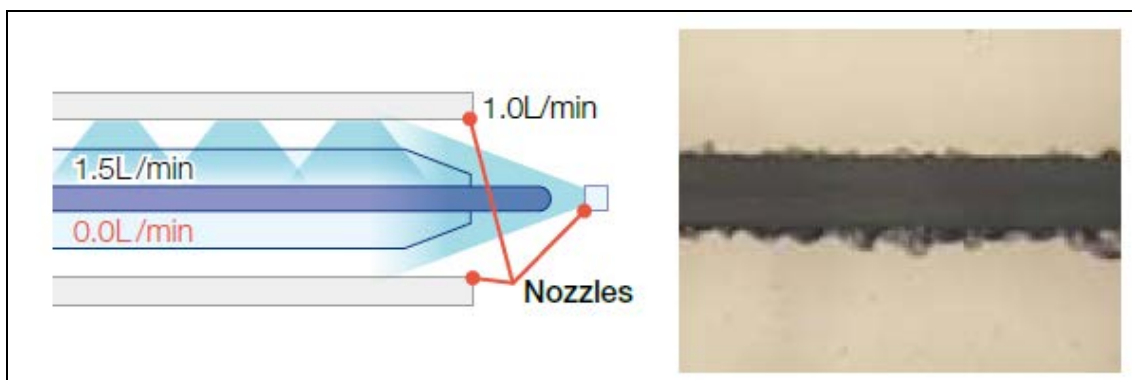


Figura 49 Fornecimento de água desequilibrado [6]

### 2.3.5. Influência da geometria da partícula de diamante no disco de corte

Os grãos abrasivos são na realidade, o que corta o silício, por isso a sua geometria e dimensão tem influência na qualidade do processo.

Existem basicamente dois tipos de grãos abrasivos:

- super-abrasivos (diamantes e CBN, etc.)
- abrasivos normais (GC (SiC), WA (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>))

O tamanho da partícula ou grão é normalmente designado por '*Mesh*' e um número. Quanto maior for o número, menor é o tamanho do grão abrasivo.

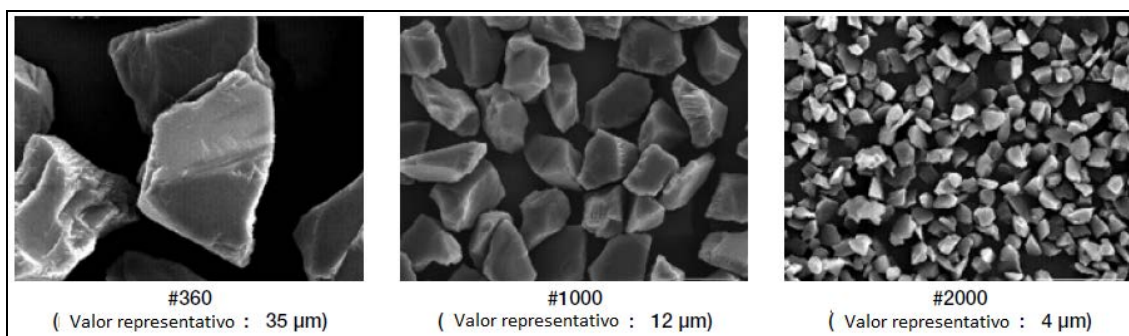


Figura 50 Exemplos de tamanho de Mesh [7]

Quando o tamanho das partículas é grande, existe pouco desgaste devido à maior área abrasiva, portanto o material a retirar apresenta menor resistência durante o corte.

Quando o tamanho do grão é menor, existe maior desgaste. Os impactos durante o corte são menores, portanto o corte apresenta melhor qualidade.

Quando o tamanho do grão é grande, tem maior capacidade de corte, é aplicada menor carga à lâmina, o que reduz o defeito de '*chipping*' na parte de trás da '*wafer*'.

Quando o tamanho do grão é menor, apresenta menor '*chipping*' na parte da frente da '*wafer*', porque a área do grão é menor, provocando menor impacto no corte. [7]

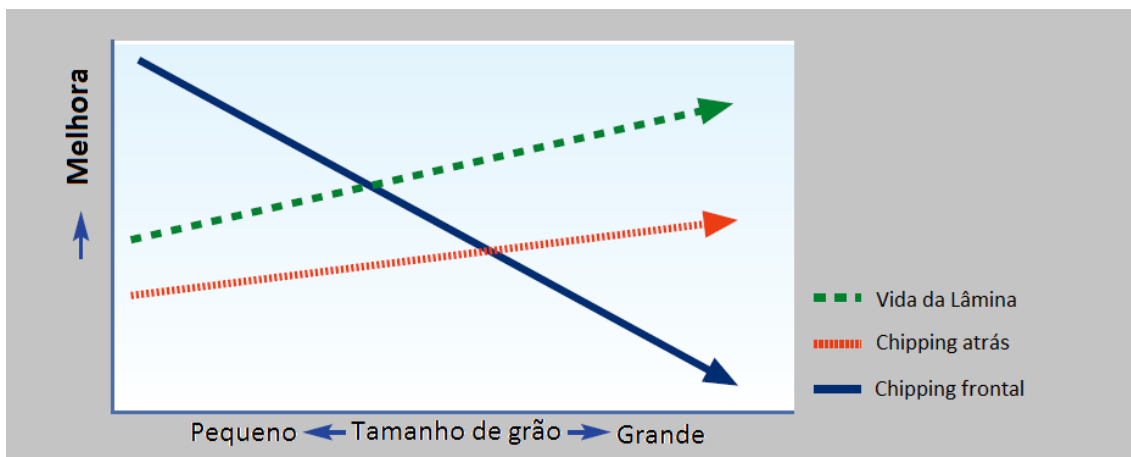


Figura 51 Relação tamanho de grão e do *chipping* [7]

### 2.3.6. Influência do sentido de rotação do disco de corte

O sentido de rotação do disco de corte recomendado, é que deve rodar no mesmo sentido em que a wafer se desloca durante o corte.

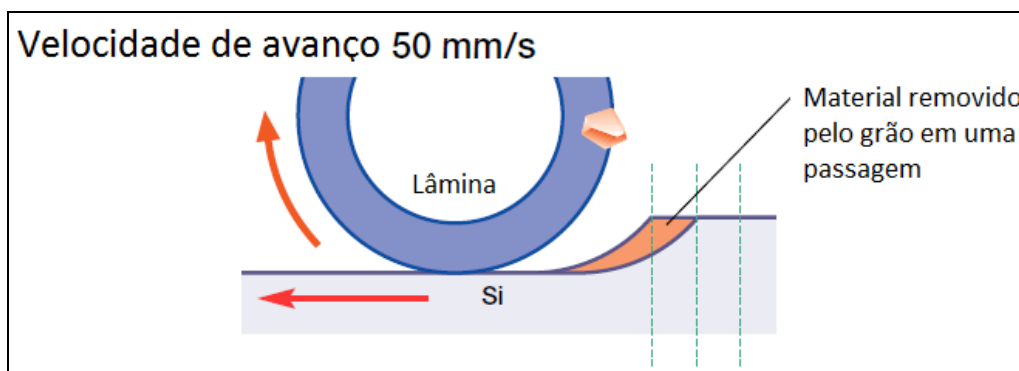


Figura 52 Representação do sentido de rotação da lâmina e direção de corte [8]

Desta forma, o material resultante do processo de corte (silício do desgaste e pequenos pedaços), devido á sua fragilidade, têm um canal para que com a ajuda da água de refrigeração sejam convenientemente removidos. Obtém-se assim um corte com qualidade, minimizando defeitos como o '*chipping*'.

Quando o sentido de rotação de corte é contrário ao deslocamento da '*wafer*', o canal aberto pela lâmina é de maior espessura, provocando maior vibração na lâmina e a limpeza pela água de refrigeração não é eficaz. Como a carga exercida pelos grãos da lâmina é maior, os '*cracks*' de silício são também maiores. O desgaste da lâmina é elevado e fomenta o aparecimento de fissuras, levando a que esta parta frequentemente. [8]

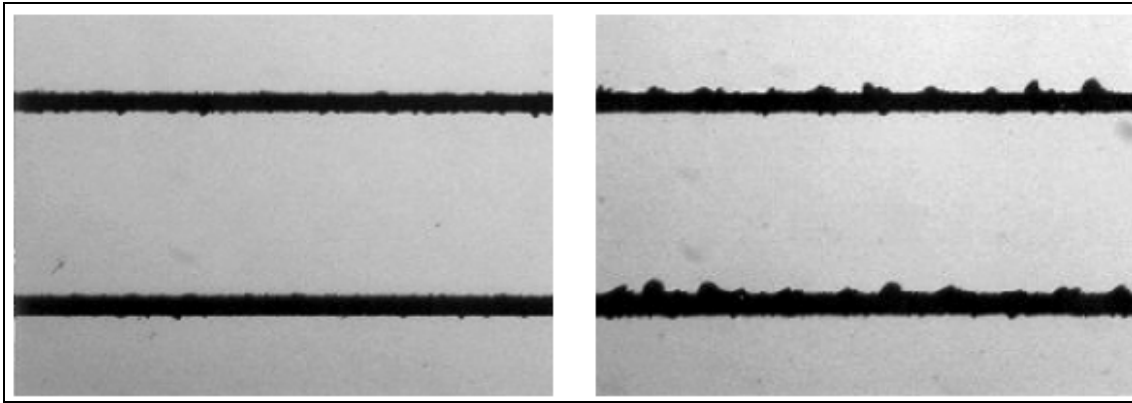


Figura 53 Imagem de corte com rotação da lâmina no sentido direto e inverso

### 2.3.7. Influência da velocidade de rotação do disco de corte

Tão importante como selecionar a lâmina correta para um determinado processo é a definição dos melhores parâmetros de processo, como a velocidade de rotação.

Nas máquinas de corte de *'wafers'* as lâminas são fixas nos motores (*spindles*), os quais podem atingir rotações elevadas. Normalmente trabalham entre as 10 000 até às 60 000 rpm. A velocidade na periferia da lâmina ou velocidade de superfície influencia muito o resultado do corte. Esta velocidade depende do diâmetro e rotação da lâmina.

Com o aumento da rotação a carga necessária para o corte distribuída por cada grão diminui, logo aumenta o tempo de vida útil da lâmina e reduz o *'chipping'* frontal. Por outro lado, como reduz a carga no grão, reduz a capacidade de auto-fiação e a lâmina começa a ficar com material incrustado e aumenta o *'chipping'* na parte de trás da wafer.

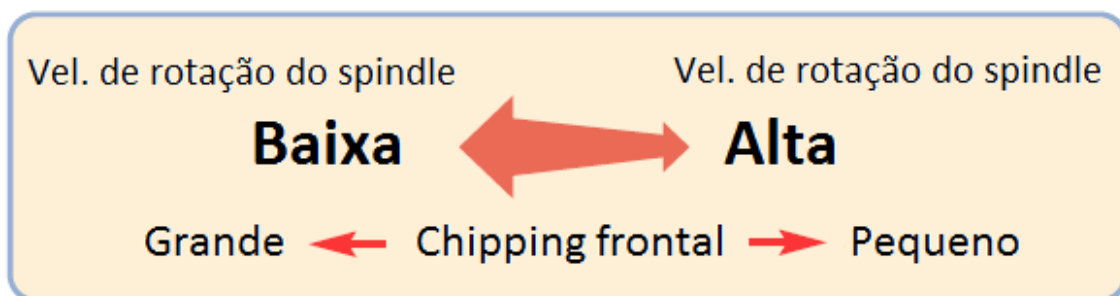


Figura 54 Relação do *chipping* com a velocidade de rotação da lâmina [9]

Como a velocidade de rotação influencia o *'chipping'* tanto na parte da frente como de trás da *'wafer'*, é necessário também ter em conta o tipo de lâmina escolhida (tamanho do grão), o material a cortar e a qualidade que se pretende. [9]

### 2.3.8. Influência da velocidade de avanço do disco de corte

Outro parâmetro importante é a velocidade de avanço do disco de corte, embora nestes equipamentos de corte de 'wafers' o avanço é realizado por uma mesa onde a 'wafer' se encontra fixa.

A velocidade de avanço de corte é definida pela mesa (*feed speed*) que varia entre 1mm/s até aos 300mm/s.

Quanto maior a velocidade de avanço, maior será a velocidade de processamento, maior será a carga sobre a lâmina e consequentemente produz um impacto negativo na qualidade de corte.

A alta velocidade de avanço aumenta a carga por grão e a área do material da 'wafer' a retirar. Como produz maior impacto no corte, aumenta o '*chipping*' e o desgaste da lâmina.

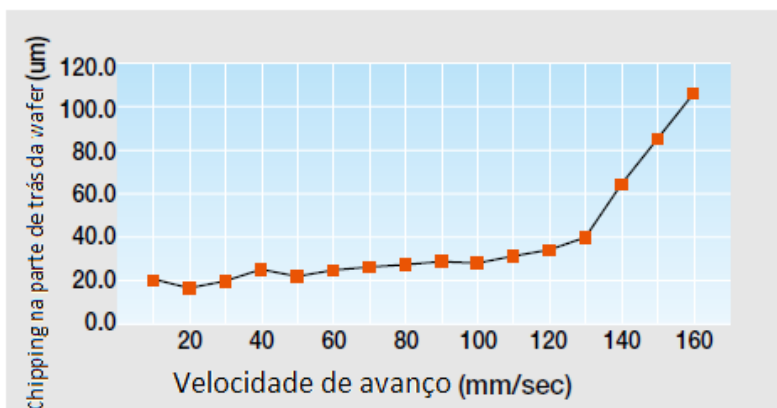


Figura 55 Relação entre velocidade de avanço e *chipping* na parte de trás. [10]

Quando a velocidade de avanço é muito elevada pode aparecer corte em onda e mais ocorrências de lâmina partida.

Por outro lado, se a velocidade de avanço for extremamente lenta, a carga durante o corte reduz o efeito de auto-fiação, aumentando o '*chipping*'.

Resumindo, a velocidade de avanço tem elevado impacto tanto no rendimento do processo como na qualidade do corte, pelo que, para a seleção deste parâmetro do processo é necessário ter em conta o tipo de lâmina, o material a cortar e a qualidade necessária.

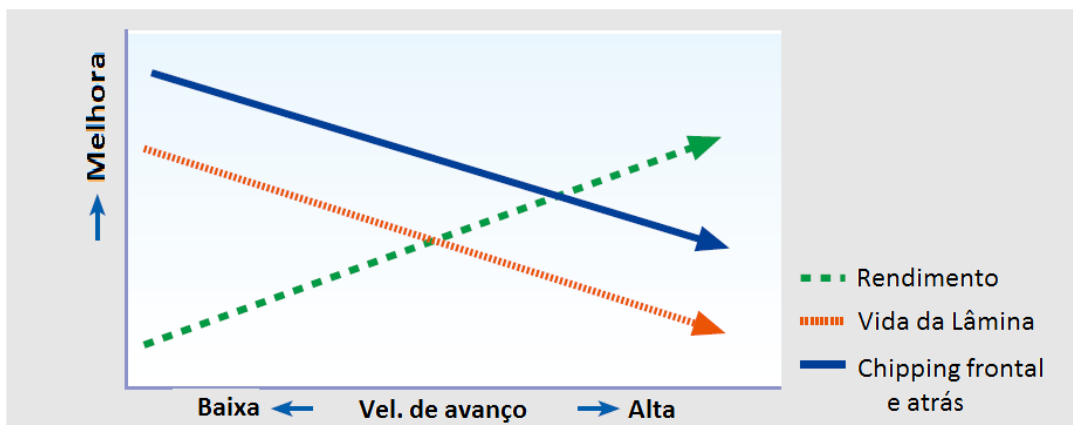


Figura 56 Relação entre velocidade de corte e *chipping*/ tempo de vida da lâmina/ rendimento do processo [10]

### 2.3.9. Influência da profundidade de corte

Conforme já mencionado neste documento, as lâminas têm a característica de se auto-afiarem, devido ao desgaste do material aglomerante e desagregação do grão. Para que este processo de auto-afiação ocorra é necessário que a lâmina corte uma quantidade mínima de silício.

Se a profundidade de corte for insuficiente, por exemplo os materiais mais dúcteis aderem à lâmina e esta acaba por vidrar, reduzindo o tempo de vida útil e corte com problemas de qualidade.

Da mesma forma se a profundidade de corte for elevada também as tensões a que a lâmina vai estar sujeita serão maiores, isto provoca o corte de maiores quantidades de material prejudicando a qualidade do corte, aumenta o desgaste e reduz a vida da lâmina.

## 2.4. Propriedades dos materiais usados nas 'wafers'

### 2.4.1 Propriedades do Silício

O silício usado nas wafers é 99,9% puro obtido a partir de processos físicos e químicos.

É um elemento da família do carbono, apresenta uma cor cinzenta e brilho metálico. Tem uma estrutura cristalina CFC-cubica de faces centradas, átomos que partilham eletrões e por conseguinte apresentam fortes ligações interatómicas que influenciam as propriedades mecânicas.

Algumas propriedades importantes são:

- Alta resistência elétrica- efectuado um bom isolamento aos circuitos adjacentes;
- Boa condutividade térmica- facilita a dissipação do calor gerado pelos circuitos elétricos em funcionamento;
- Resistência à temperatura- alguns processos na fabricação circuitos integrados são efetuados a altas temperaturas;
- Resistente à corrosão química- a estrutura química do silício deve resistir a solventes e outros químicos durante a fabricação dos CI

Tabela 2 Propriedades do Silício usado nas wafers [29]:

Silício	Valor	UNIDADES
Densidade	2.33	g/cm <sup>3</sup>
Dureza	7.0	Mohs
Módulo de elasticidade	112.4	GPa
Módulo elasticidade transversal (G)	98.74	GPa
Coefficiente de Poisson	0.28	N.A
Resistividade eléctrica	0.0100	ohm-cm
Temperatura de fusão	1800	J/g
Estrutura cristalina	Cúbica	N.A

As propriedades de maior relevância para o corte são a dureza e a tenacidade (muito quebradiço), por isso os discos de corte são constituídos por grãos abrasivos de diamante, cuja dureza é de 10 na escala de Mohs. Os discos efetuam o corte com as arestas dos grãos, por desgaste abrasivo e quebra de pequenas quantidades de silício, devido á baixa resistência ao impacto.

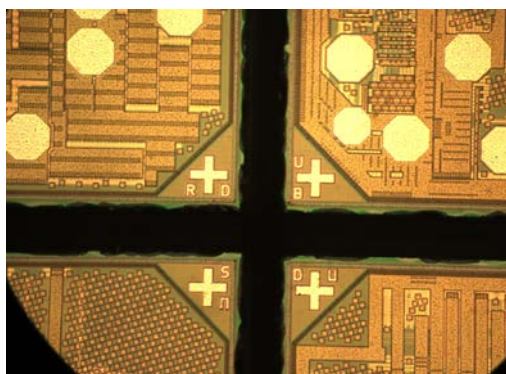


Figura 57 Imagem de wafer cortada

O silício também é muito abrasivo o que provoca o desgaste do grão dos discos de corte. Este perde a capacidade de remoção de material, e com o aumento das forças de corte, aumenta a temperatura no ponto de processo. Como as temperaturas que são geradas durante o corte podem ser elevadas e danificar os CI, é necessário utilizar líquido de refrigeração, o qual também é muito importante para a remoção de detritos e diminuição do atrito.

No entanto o facto de ser abrasivo é importante para a capacidade de auto afiação das lâminas. É importante que o ligante seja desgastado para que se desprendam os grãos já gastos e novos apareçam, formando nova aresta de corte. [11][30][31][32]

#### 2.4.2 Propriedades do Alumínio

Durante a fabricação dos circuitos elétricos nas 'wafers' são necessárias estruturas denominadas de 'Pads', são superfícies de contacto e ligação dos circuitos elétricos com o exterior. Os 'Pads' são pontos de teste para a verificação do bom funcionamento das unidades ainda em 'wafer'. Alguns são colocados em série nas ruas de corte.

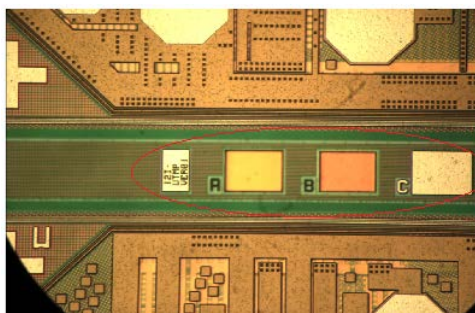


Figura 58 Imagem de estruturas nas ruas de corte (pads)

Para estes pontos de teste um dos materiais mais usados é o Alumínio. Para minimizar alguns problemas como a criação de '*Spikes*' devido a solubilidade entre o Al e Si e problemas electromigração, são adicionados alguns elementos de liga em percentagens muito reduzidas como Cu Si e Ti.

O Alumínio é um material que adere bem ao silício e ao óxido de silício, apresenta boa condutividade eléctrica e térmica entre outras propriedades apresentadas na seguinte tabela:

Tabela 3 Propriedades do alumínio dos *pads* [29]:

Alumínio	Valor	UNIDADES
Densidade	2.7	g/cm <sup>3</sup>
Dureza	15	Vickers
Módulo de elasticidade	68.0	GPa
Coefficiente de Poisson	0.36	N.A.
Resistividade eléctrica	0.00000270	ohm-cm
Temperatura de fusão	386.9	J/g
Ductilidade	Alta	Atributo
Resistência à corrosão	Elevada	Atributo
Ductilidade	Alta	Atributo

Devido às propriedades, como a ductilidade e viscosidade elevada, o alumínio influencia negativamente o corte e proporciona o aparecimento de rebarbas que têm impacto na qualidade do corte.

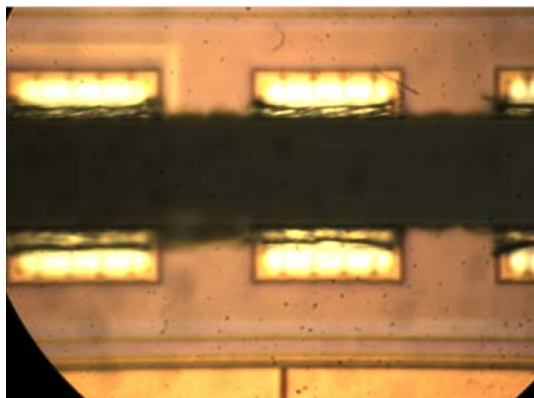


Figura 59 Imagem de *curling*

O modo de falha está relacionado com a ductilidade do alumínio, os grãos abrasivos deformam plasticamente o alumínio, este é removido não por corte mas por rotura plástica ficando as rebarbas.

Devido à sua plasticidade elevada, o alumínio fica colado na lâmina, aumentando a carga necessária e diminuindo a capacidade de corte, diminuindo a qualidade.

Existem várias formas para minimizar os problemas relacionados com o corte do alumínio:

- Lâmina com menor concentração- a qualidade de corte pode ser melhorada com o uso de lâmina com menor concentração dos grãos abrasivos, melhora o processo de auto-afiação melhorando a sua capacidade de corte;
- Aumento da rotação- reduz a quantidade removida pelo grão abrasivo em cada revolução da lâmina, diminuindo o tamanho das rebarbas;
- Tamanho do grão- quanto menor o grão menor a quantidade de alumínio que é puxado durante o corte. [1][12][13]

## **2.5. Principais propriedades dos materiais envolvidos nos discos de corte**

Os discos de corte são constituídos por uma matriz de um material ligante e grãos abrasivos. A função do ligante é manter a coesão dos grãos abrasivos durante o corte. Quando é perdida a capacidade de corte o ligante deve libertar os grãos gastos e expor os que se encontram nas camadas inferiores.

Os materiais aglomerantes normalmente usados são resinas fenólicas e metais como o níquel.

A aresta da lâmina é fabricada por deposição de camadas abrasivas ou por crescimento de cristais abrasivos. As partículas abrasivas podem ser Alumina ( $Al_2O_3$ ), Nitreto de Boro Cúbico (CBN) ou de diamante. As propriedades mais importantes deste elemento são a dureza e a tenacidade.

Para o corte de silício é normalmente usada uma matriz de níquel. Para este tipo de materiais duros e quebradiços as lâminas devem apresentar uma matriz fraca. Desta forma permitem a libertação dos grãos desgastados e assim o aparecimento de outros novos na aresta de corte. [14][33]

O Níquel apresenta boa condutividade elétrica e térmica, é um metal dúctil e maleável, resistente à corrosão e pode ser usado na eletrodeposição, portanto apresenta boas propriedades para ser usado como material aglomerante para lâminas. [34]

Tabela 4 Propriedade do Níquel [29]:

Níquel	Valor	Unidades
Densidade	8.88	g/cm <sup>3</sup>
Tensão de rutura	59.0	MPa
Módulo de elasticidade	207	GPa
Coeficiente de Poison	0.31	N.A.
Resistividade eléctrica	0.00000640	ohm-cm
Temperatura de fusão	305.6	J/g

As resinas fenólicas apresentam elevada resistência ao calor, ao impacto, agentes químicos, à deformação e excelentes propriedades dieléctricas, não conduzem eletricidade e apresentam alta resistência à temperatura. [15]

Tabela 5 Propriedades das resinas fenólicas [29]:

Resinas Fenólicas	Valor	Unidades
Densidade	1.49	g/cm <sup>3</sup>
Dureza	83.0	Rokwell E
Módulo de elasticidade	10.95	GPa
Módulo elasticidade transversal (G)	183	MPa
Resistividade eléctrica	$2.0 \times 10^{12}$	ohm-cm
Resistência ao impacto	0.175	J/cm

Os grãos de diamante são normalmente sintetizados. Um dos métodos é através de processos de deposição química CVD (Chemical Vapor Deposition) que consiste num processo de aceleração do crescimento por aplicação de gases de carbono e hidrogénio, numa câmara despressurizada.

As propriedades dos cristais obtidos são similares às dos diamantes naturais. São quimicamente inertes, ótimos isolantes eléctricos, alto coeficiente de atrito e alta condutividade térmica.

Tabela 6 Propriedades de diamante sintético [29]:

Diamante sintético	Valor	Unidades
Densidade	3.39	g/cm <sup>3</sup>
Dureza	98	Vickers
Módulo de elasticidade	862.5	GPa
Módulo elasticidade transversal (G)	5.150	MPa
Coeficiente de Poison	0.2	N.A.
Resistência à fractura	8.35	MPa-√m
Estrutura cristalina	Cúbica	N.A

Sendo a dureza a principal propriedade do diamante para o corte por abrasão, a capacidade de remover rapidamente grandes quantidades de calor da aresta de corte é outra característica muito importante. A estabilidade térmica é influenciada pela condutividade térmica que no diamante sintético é de 2000 W/m·K.

Outra grandeza importante é o coeficiente de dilatação térmica do grão abrasivo e do ligante, que não devem ser muito diferentes, porque com o aumento da temperatura traduz-se num aumento de tensões e diminuem as forças de ligação e conseqüentemente estas perdem-se. [16].

## **2.6. Breve introdução à metodologia de Taguchi**

O objetivo no método de Taguchi é melhorar um produto ou otimizar um processo através de experiências a partir de combinações dos fatores cuja influência se pretende estudar.

Com o método poder-se-á não resolver totalmente o problema, mas descobrir uma aproximação através da análise da variância, no sentido de o minimizar.

No planeamento de experiências é importante diferenciar entre fatores de controlo e fatores de ruído.

Os fatores de controlo são parâmetros/variáveis que podem influenciar a característica que se pretende melhorar/otimizar. Os fatores de controlo são aqueles onde se pretende e pode intervir.

Os fatores de ruído, por diversas razões (técnicas, económicas) não se pretendem/quer intervir. Os fatores de ruído são fatores indesejáveis e incontroláveis, responsáveis pela dispersão ou desvio da característica do valor que se pretende. O ruído afeta a qualidade, mas a sua eliminação pode ser muito difícil ou mesmo impossível.

A interação de fatores significa que a sua atuação conjunta pode ter efeito positivo ou negativo em relação ao objetivo pretendido.

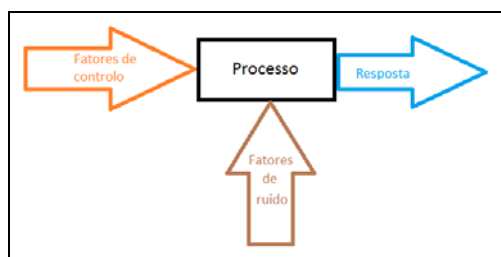


Figura 60 Fatores que influenciam um processo

A Anova (Analysis Of Variance) é uma técnica de análise estatística que permite determinar a contribuição de cada fator para o resultado. É calculada a variância e o seu valor indica quanto estão afastados os valores obtidos do valor esperado.

Os desvios podem ser devido às diferenças entre as médias dos resultados e erros aleatórios cometidos durante a realização das experiências.

Quanto menor for a variância dos fatores, melhor. Do quociente entre as variâncias resulta o fator F (fator de Fisher).

A aplicação de testes de hipótese permite identificar os fatores que produzem efeitos importantes na característica. O fator F obtido é comparado com o fator F tabelado para um determinado nível de confiança.

Na realização de experiências podem ser utilizados vários métodos:

No método “um fator de cada vez” em que um fator varia e os outros permanecem constantes.

No método “fatorial completo” são estudadas todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores, contudo pode originar problemas de excitabilidade resultante do número de experiências necessárias e consequentemente, maior consumo de tempo e dinheiro.

No método “fatorial parcial” pode ser utilizada apenas uma fração do total das combinações possíveis, correndo-se o risco de perda de alguma informação. Quando se estabelece um plano fatorial parcial, o objetivo é manter as estimativas dos efeitos principais e se possível das interações de segunda ordem, livres de interferências mútuas.

O método das “matrizes ortogonais” permite reduzir o número de experiências e ao mesmo tempo comparar diferentes níveis de fatores em circunstâncias distintas. Nas matrizes

ortogonais cada um dos fatores é colocado em cada um dos seus diferentes níveis o mesmo número de vezes.

O grau de liberdade representa a quantidade de informação que se pode obter de um fator. Um fator com dois níveis tem um grau de liberdade, se tiver três níveis temos dois graus de liberdade. O grau de liberdade de um fator é igual ao número de experiências menos uma unidade. Através dos resultados das combinações obtidas identificam-se as variáveis que mais influenciaram a característica em estudo.

Genichi Taguchi foi um estatístico e engenheiro eletrotécnico japonês, que a partir de 1950 rejeitou a abordagem clássica das experiências planeadas, uma vez que eram pouco práticas e dispersas para aplicações industriais. Desenvolveu uma metodologia estatística (métodos de Taguchi), para melhorar a qualidade de produtos fabricados.

Taguchi propõe várias matrizes ortogonais normalizadas que variam em nº de linhas e colunas. A seleção das matrizes depende do nº de variáveis e interações entre elas, bem como do número de níveis de cada uma. As matrizes são denominadas por  $L_x$  em que o  $x$  representa o número de experiências a realizar.

Na construção das matrizes ortogonais a colocação dos fatores e interações não é aleatória. Após a colocação dos fatores, é necessário deixar colunas livres para o caso de existir uma forte interação entre elas, de forma a podermos estimar o seu efeito.

Taguchi utiliza matrizes ortogonais e simplifica o seu uso através de grafos lineares.

Para a correta colocação nas matrizes das interações usam-se matrizes triangulares ou grafos lineares.

Matrizes triangulares:

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)	7
						(7)

Figura 61 Matriz triangular [35]

Se colocarmos o fator A e B na coluna 1 e 2 respectivamente, a sua interação terá que ser colocada na coluna 3. Se pretendermos estudar a interação de um fator colocado na coluna 1 e 4, a sua interação deverá ser colocada na coluna 5.

Grafos lineares:

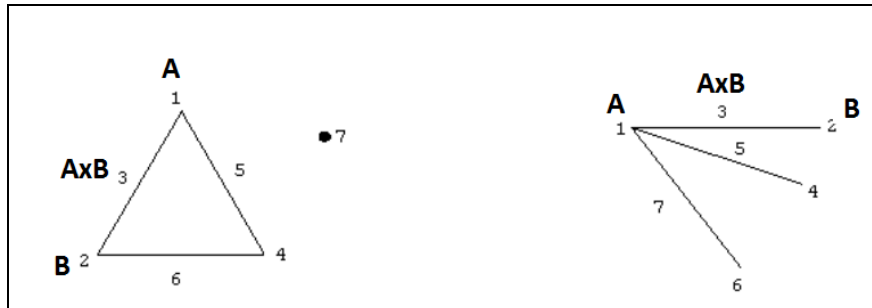


Figura 62 Grafos lineares [36]

Os fatores são representados por pontos e as interações por segmentos de reta que os une. Se não existirem interações entre fatores, estes não estarão unidos por segmentos de reta. Os números assinalados aos pontos e aos segmentos de reta indicam as colunas da matriz.

Um DOE (Design of Experiments) consiste no planeamento de experiências dividido em três fases principais:

1º - Planeamento

2º - Experiências

3º - Análise

#### Planeamento:

- Caracterização do problema;
- Definição do objetivo;
- Identificar o método de medida e determinar a sua capacidade;
- Identificar os fatores que influenciam a característica;
- Definir os níveis para os fatores;
- Selecionar a matriz ortogonal;

- Identificar as interações que influenciam a característica.

#### Experiências:

- Execução das experiências com diferentes níveis dos fatores.

#### Análise:

- Interpretação dos resultados;
- Realização de experiências de confirmação.

Após a obtenção dos resultados, através da análise da variância, determina-se a influência de cada fator na característica em estudo.

Para esta análise são construídas tabelas e gráficos de resposta com as diferenças entre as médias dos efeitos dos factores [17][18][19][20][21][35]:

- Determinar a média das respostas para cada um dos níveis dos fatores;
- Determinar os melhores níveis de cada fator através da comparação das médias;
- Estimar a média do processo para melhor combinação (melhores níveis);
- Realizar uma experiência de confirmação usando a melhor combinação de fatores;
- Comparar o resultado da experiência com o previamente estimado.

### 3. Desenvolvimento

#### 3.1. Caracterização da empresa que acolheu o projeto

A Nanium S.A. é um centro de competências na produção, desenvolvimento e fornecimento de serviços de engenharia na área dos semicondutores, graças aos 16 anos de experiência no negócio como Siemens Semicondutores, Infineon Technologies e mais recentemente Qimonda Portugal. Está localizada na Av. 1º de Maio, nº801, 4485-629 Vila do Conde.

Recentemente a empresa sofreu uma grande reestruturação tornando-se uma empresa independente de semicondutores com a ambição de criar um futuro sustentável.

Neste momento a Nanium possui uma equipa altamente qualificada e competente com instalações e equipamentos capazes de superar as expectativas dos clientes.



Figura 63 Imagem da Nanium [37]

A empresa foi fundada em 1996 sob a designação de “Siemens Semicondutores”. Em 1999 o grupo Siemens efetuou uma separação de negócios, e a parte de semicondutores passou a designar-se “Infineon Technologies-Fabrico de semicondutores, Portugal”.

Em 2006 é realizada uma nova reestruturação nos negócios, ficando a empresa ligada à produção de memórias, chamando-se a partir daí “Qimonda Portugal S.A.”

Mais recentemente, em 2009 a empresa passou por graves dificuldades, e depois do pedido de insolvência da Qimonda AG em Munique-Alemanha, a empresa portuguesa sofre nova reestruturação, tornando-se independente, com a nova designação de “Nanium S.A.”

Atualmente conta com mais de 600 colaboradores.

A NANIUM oferece soluções competitivas a nível de produção em:

- Tecnologia em 'Wafers'
- Capacidade para 200 e 300mm;
- Estado de equipamentos de última geração;
- Sistemas de inspeção visual automática.
- Tecnologia de circuitos integrados
- Ampla gama de tecnologias;
- Robusta capacidade de processos.
- Montagem de módulos
- Capacidade a nível de engenharia para prototipagem;
- Produção de complexas e pequenas séries com elevados padrões de qualidade.

#### **O significado da palavra "Nanium":**

A palavra Nanium deriva da junção do prefixo "nano" de origem Grega que tem como significado objetos pequenos, com o sufixo "ium" originário do Latim e que inclui a formação de termos científicos, como o nome de elementos (ex: Bhorium).

O logotipo sugere uma estrutura atómica cristalina, como um símbolo unificador de recursos diferentes.

#### **Infra-estruturas**

A Nanium ocupa uma área total de 155000m<sup>2</sup>, tendo uma área interna de sala limpa de 20600 m<sup>2</sup>.

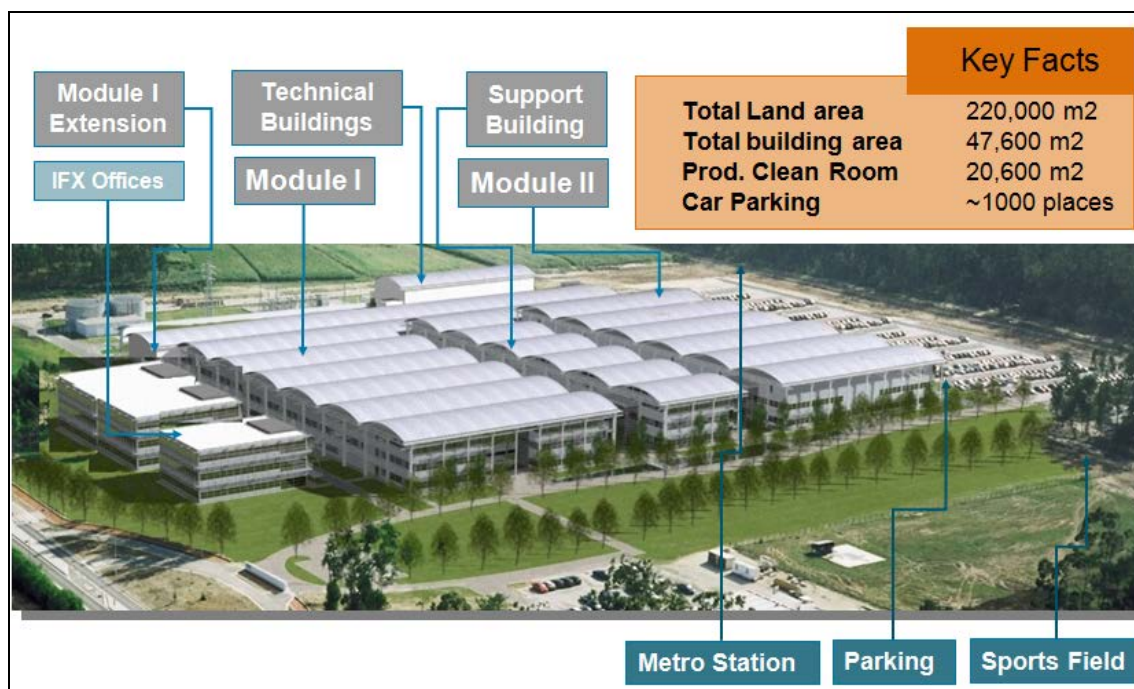


Figura 64 Instalações da Nanium [37]

Para além da área de produção, as instalações incluem áreas técnicas, armazenamento e áreas sociais. As instalações de produção incluem os laboratórios de alta tecnologia e as salas limpas têm classificação de 1K (ISO 6), 10K (ISO 7) e 100K (ISO 8).

As áreas técnicas fornecem apoio 24h à produção: armazém geral, armazém de químicos e resíduos, sistemas de exaustão, sistemas de vácuo, água e suporte de IT (tecnologias de informação).

As infra-estruturas sociais incluem um posto médico bem equipado, um auditório com capacidade para 350 pessoas, várias salas de reuniões, refeitório e cantina com capacidade para 400 pessoas e campo desportivo ao ar livre.

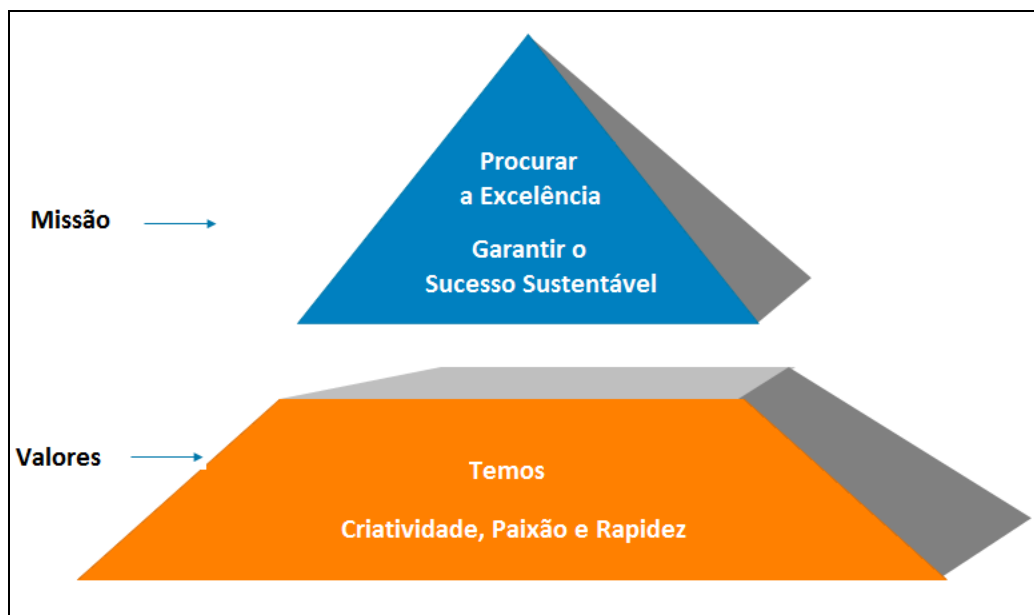
**Missão e valores:**

Figura 65 Representação da missão e valores da Nanium [37]

A Nanium tem como missão procurar a excelência e garantir o sucesso sustentável.

- A procura pela excelência: com a satisfação dos clientes através da qualidade, serviços e produtos fiáveis, cumprindo prazos a um custo competitivo.
- Garantir o sucesso sustentável: criando valor para os clientes, fornecendo lucro aos acionistas, utilizando uma força de trabalho altamente competente e motivada.

A Nanium definiu como valores:

- Criatividade: pretende-se ser criativo desafiando as regras existentes para facilitar o futuro.
- Paixão: Adorar explorar ideias e trabalho árduo para as tornar realidade.
- Rapidez: Antecipar as oportunidades e executá-las eficientemente.

### 3.2. Identificação do problema

O processo de 'Dicing' (corte) de 'wafers' mais frequente é o designado por 'Step Cut' – neste método o corte é efectuado com lâminas de diferentes espessuras (Z1 e Z2), sendo o primeiro corte feito com a lâmina mais espessa (Z1) e o segundo com a lâmina menos espessa (Z2).

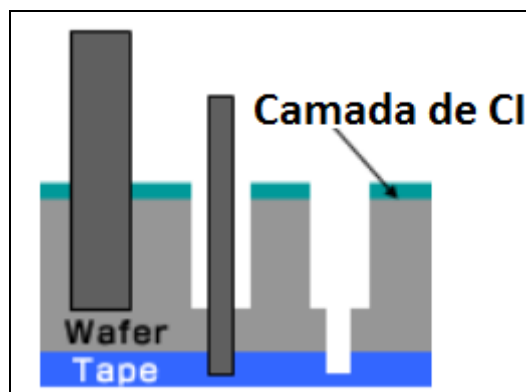


Figura 66 Processo de corte Step-Cut [11]

O corte é efectuado nas "ruas" (espaço entre *chips*) onde existem estruturas de alumínio que podem variar entre 50 a 80  $\mu\text{m}$  de espessura.

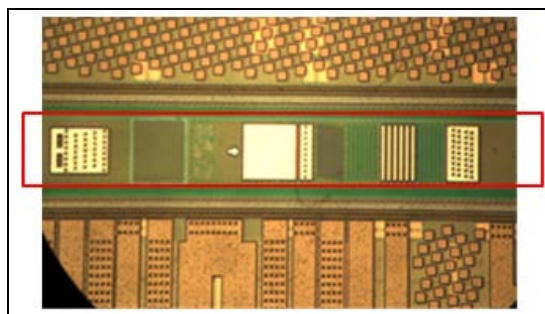


Figura 67 Rua de corte com estruturas de alumínio

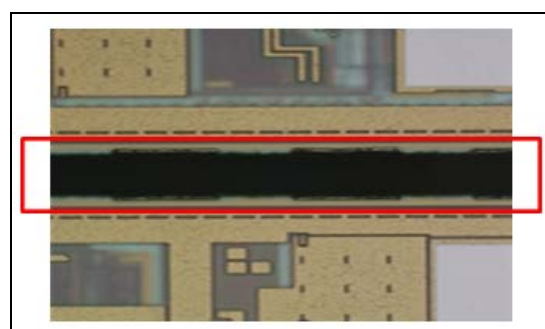


Figura 68 Rua com corte das estruturas de alumínio

Durante o corte efectuado pela lâmina Z1, as estruturas de alumínio que não são completamente removidas, podem, devido à sua ductilidade, ser arrancadas plasticamente e enrolar-se dando origem ao fenómeno de 'Curling'.

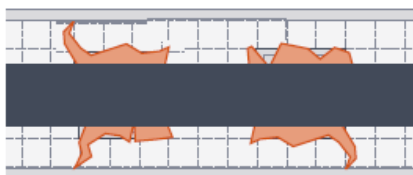


Figura 69 Exemplificação do alumínio depois do corte [26]

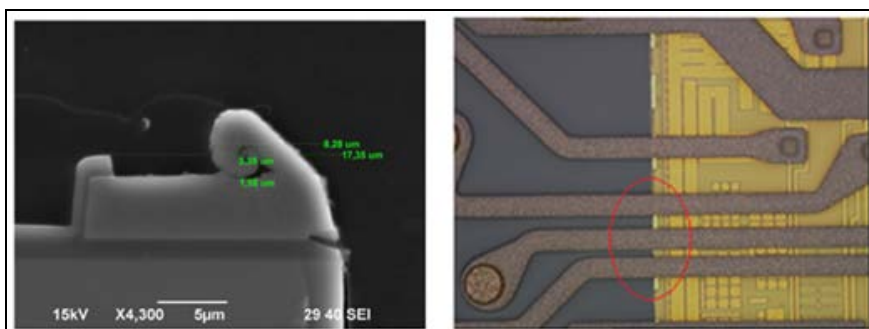


Figura 70 Curling/Secção de unidade com tecnologia Fan-Out

Devido à tecnologia usada de 'Fan-out', que consiste em criar estruturas ou vias metálicas efetuando a distribuição dos 'pads' por todo o encapsulamento (*package*) da unidade, a existência do 'curling', dependendo da sua dimensão, poderá provocar curto-circuito entre as vias do 'Fan-out'.

Antes do processo de criação das vias é efectuado um isolamento dielétrico com um verniz cuja sua espessura pode variar entre 10 a 6 µm. Por causa disto o curling acima de 5 µm é considerado um problema de qualidade.

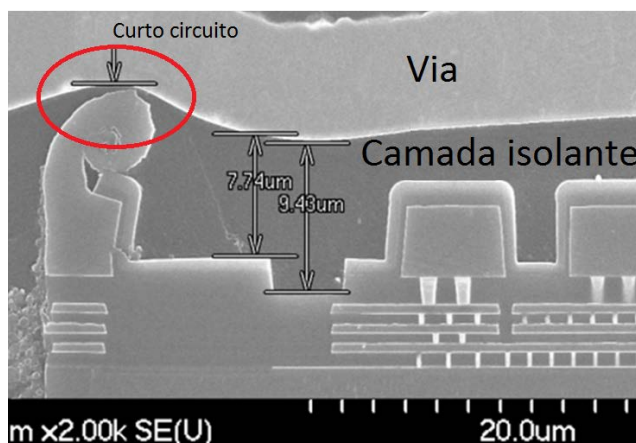


Figura 71 Imagem SEM representativa do problema

O 'Curling' gerado durante o processo de 'dicing' das 'wafers' de silício, originam falhas elétricas e consequentes perdas de Yield.

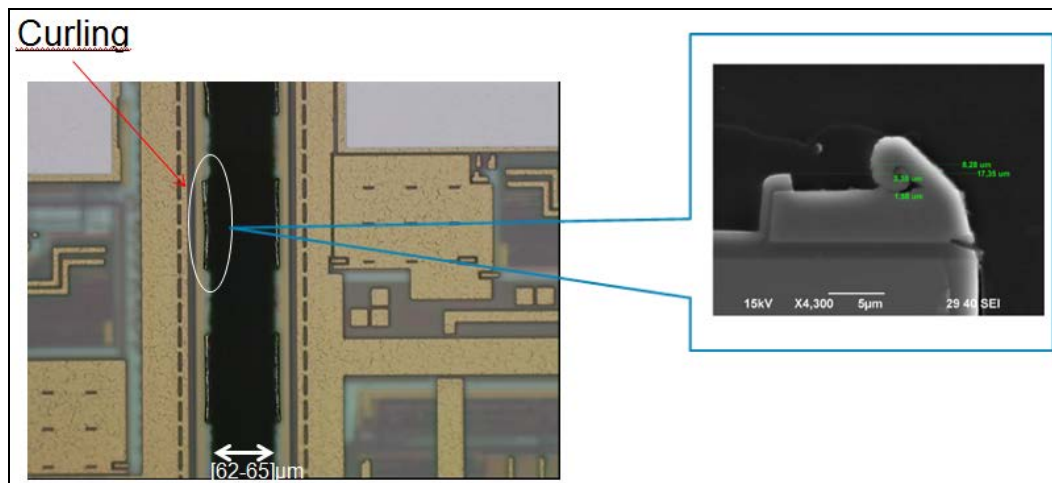


Figura 72 Curling

### 3.3. Elencagem de todos os parâmetros envolvidos no corte

#### 3.3.1. Identificar contribuidores

A identificação dos principais contribuidores na variação da característica 'Curling', foi feita por uma equipa multidisciplinar de especialistas no processo, criada para o efeito.

Os parâmetros envolvidos no processo de corte podem ser divididos em quatro categorias:

- Equipamento / máquina: incorreto funcionamento;
- Pessoas: procedimentos incorretos de ajuste de corte;
- Materiais:
  1. Tipo de lâmina (espessura da mesma);
  2. Tipo de diamante;
  3. Concentração;
  4. Frontend;
  5. Material usado nos 'pads' de teste;

## 6. Dimensão.

- Métodos:
  1. Processos de 'Dicing - step cut, single cut, V – groove, lasergrooving'.
  2. Parâmetros de processo – velocidade de avanço, rotação da lâmina, altura de corte, água de refrigeração do corte.

Classificaram-se as ideias e foram agrupadas utilizando a técnica do diagrama de Ishikawa, mais vulgarmente designado por diagrama Causa-Efeito.

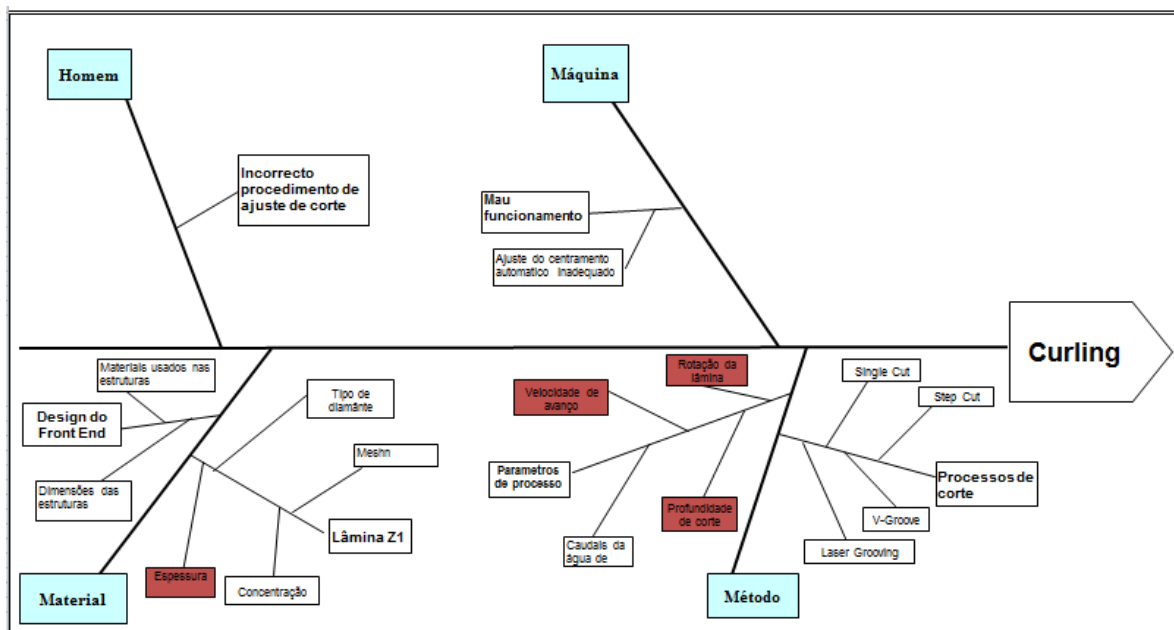


Figura 73 Diagrama de Causa-Efeito

### 3.3.2. Identificação dos fatores mais influentes

Completado o diagrama Causa-Efeito, passou-se á fase de seleção dos fatores mais influentes a incluir no estudo. Para cada fator selecionado, foi necessário justificar tecnicamente de que forma cada um dos fatores contribuía para a variação na resposta a estudar.

- Espessura da lâmina

A espessura da lâmina tem influência na qualidade do corte. Quanto maior a espessura da lâmina, maior o raio do corte na aresta da lâmina, provocando um aumento da força aplicada durante o corte podendo gerar *'curling'*.

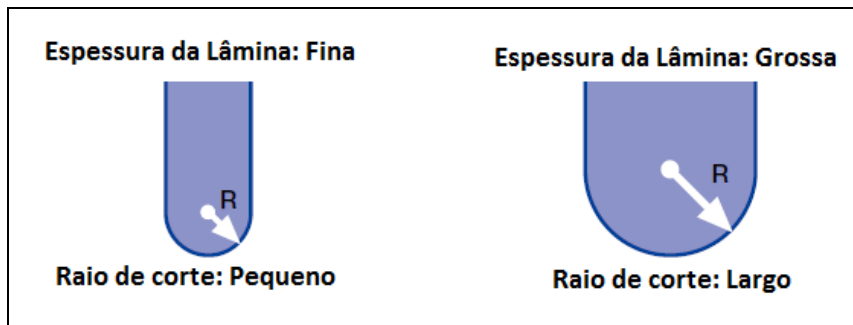


Figura 74 Representação espessura da lâmina e raio de corte [13]

- Velocidade de avanço

Quanto maior a velocidade de avanço, maior será a velocidade de processamento, maior será a carga sobre a lâmina e conseqüentemente produz um impacto negativo na qualidade de corte, podendo gerar *'curling'*.

- Rotação da lâmina:

A velocidade de rotação da lâmina tem influência na qualidade do corte. O aumento da rotação diminui a carga necessária para o corte podendo melhorar o *'curling'*.

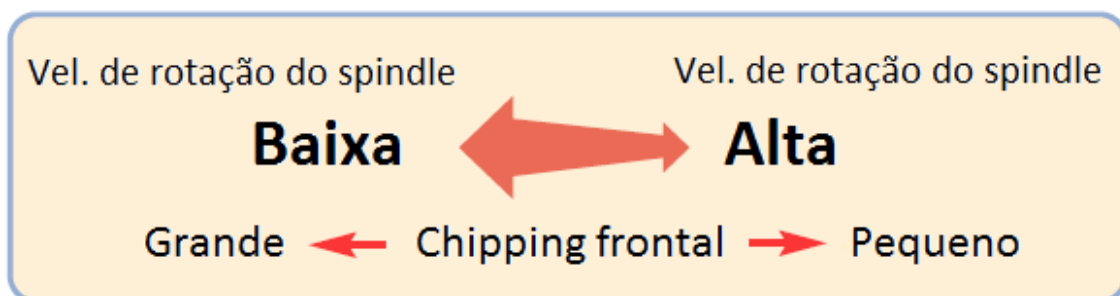


Figura 75 Relação entre velocidade de rotação e *chipping* frontal [19]

- Profundidade de corte:

As lâminas têm a característica de se auto-afiarem. Para que este processo de auto-afiação ocorra é necessário que a lâmina corte uma quantidade mínima de silício.

Se a profundidade for insuficiente, os materiais mais dúcteis aderem à lâmina e esta acaba por vidrar, podendo provocar *curling*.

Se a profundidade de corte for elevada também as tensões a que a lâmina vai estar sujeita serão maiores, podendo piorar em termos de 'curling'.

### 3.4. Aplicação da metodologia de Taguchi ao caso em questão

#### 3.4.1. Seleção dos níveis dos fatores

Após a Identificação dos fatores a analisar, foram selecionados os níveis para cada um.

Nível 1 – Nível mais baixo

Nível 2 – Nível mais alto

Tabela 7 Níveis dos fatores:

	Factor	Unid.	Nível 1	Nível 2
<b>A</b>	Vel. Avanço Z1	mm/s	20	50
<b>B</b>	Rot. Lâmina Z1	rpm	45000	60000
<b>C</b>	Profu. Corte Z1	um	380	490
<b>D</b>	Esp. Lâmina Z1	um	25	60

#### 3.4.2. Interação a analisar

Por se entender que os efeitos do fator A (Velocidade de avanço) possam depender do nível do fator B (Rotação da spindle), decidiu-se incluir no estudo a análise à interação entre estes dois fatores (AxB).

**A•B = Velocidade de avanço x Rotação do spindle**

Assim, pretende-se fazer uma otimização de processo, através da análise a quatro fatores (A,B,C,D) e uma interação (AxB).

### 3.4.3. Atribuição dos fatores à matriz

Entende-se como Grau de Liberdade (GL), a medida da quantidade de informação que se pode obter de um fator e resulta do número de níveis a avaliar.

#### Cálculo dos graus de liberdade(GL):

Dos fatores(F):  $F_{GL} = n^{\circ} \text{ Fatores} \times (n^{\circ} \text{ Niveis}-1)$

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

$$F_{GL} = 4$$

Das interações(I):  $I_{GL} = n^{\circ} \text{ interações} \times (\text{GL variável 1} \times \text{GL variável 2})$

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

$$I_{GL} = 1$$

Total(T):  $T_{(GL)} = F_{GL} + I_{GL} + 1$  (+1 para a média)

$$T_{(GL)} = 4 + 1 + 1$$

$$T_{(GL)} = 6$$

#### Seleção da matriz:

Os graus de liberdade totais são usados para determinar a menor matriz ortogonal possível, devendo esta ser compatível com, pelo menos, o mesmo número de graus de liberdade total TGL.

$$Lx, x \geq (TGL + 1)$$

Como os graus de liberdade totais da experiência são 6, a matriz ortogonal selecionada foi uma **L8**.

Tabela 8 Matriz ortogonal L8

Exp.	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

### 3.4.4. Alocação dos fatores e interação à matriz

Alocação dos fatores e interações às colunas com auxílio da matriz triangular:

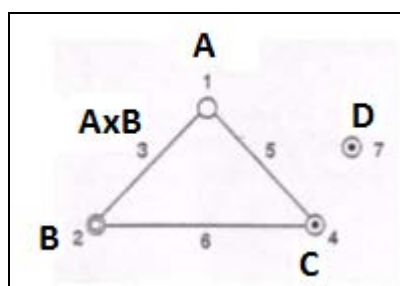


Figura 76 Representação dos fatores num grafo linear [35]

Matriz ortogonal L8 com quatro fatores (A, B, C, D) e uma interação (AxB):

Tabela 9 Matriz ortogonal com alocação dos fatores e respectivos níveis:

Exp.	A	B	AxB	C	Erro	Erro	D
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

Os restantes fatores que não são considerados neste estudo vão para o erro.

### 3.5. Realização das experiências

#### 3.5.1. Método de medida

A existência de um processo de medida robusto e capaz é fundamental. Variações introduzidas pelo processo de medida, teriam influência direta negativa nas conclusões, pondo em causa todo o estudo. As medidas serão efetuadas por operadores certificados para o efeito.

#### Procedimento

- O valor do 'curling' vai ser medido através de um microscópio óptico, sendo obtido através das leituras em Z;



Figura 77 Microscópio

Microscópio UHL VMM200, aquisição de imagem Leica DC300.

- Ampliação usada será de 100x.

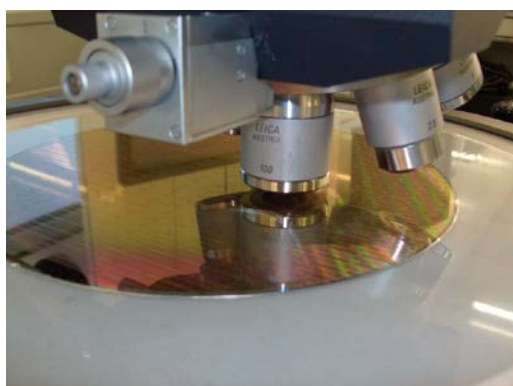


Figura 78 Lente de 100X

- Pontos de medida

Na figura seguinte pode ver-se uma 'wafer' do tipo utilizado nas experiências e uma ampliação da área com as estruturas de alumínio onde foi medido o 'curling' depois do corte.

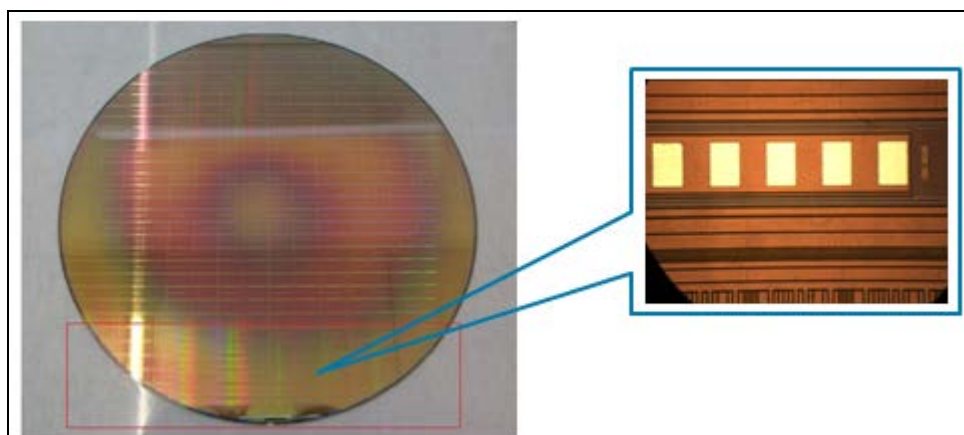


Figura 79 Local de corte

- A medição do 'curling' gerado durante o processo de 'dicing', será obtida através do cálculo da distância entre a superfície da 'wafer' na base do 'curling' e a parte de cima do mesmo.
  - a) Focar na base do 'curling', seguido de Reset no Quadra-Check (Ponto1).
  - b) Focar na parte de cima do 'curling' e retira-se a medida (**D**) do Quadra-Check em Z (ponto 2).

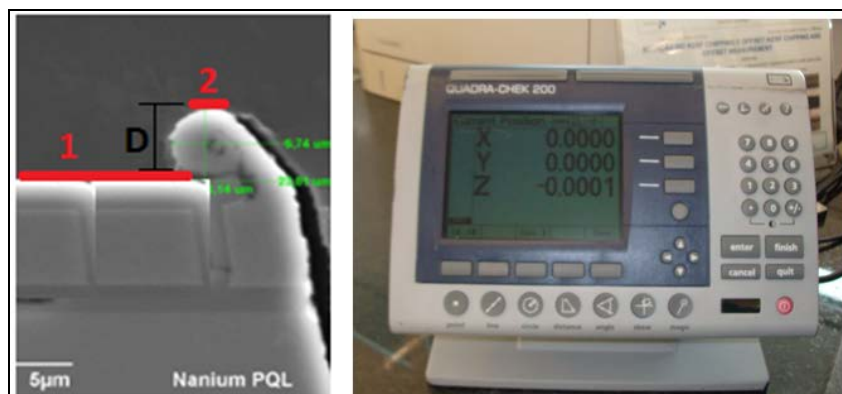


Figura 80 Exemplificação da medição/ Quadra-Check

- Definição da amostra

Para cada uma das oito experiências a realizar, vai ser processada uma *'wafer'*. Desta forma, será garantido que se mede sempre os mesmos pontos, com as mesmas estruturas, reduzindo desta forma o ruído que seria causado pela medição feita em pontos com características diferentes.

Como o número de "ruas" por *'wafer'* é elevado, serão cortadas quinze ruas e será medido o pior caso de *'curling'* em cada rua (15 medidas por experiência).

### 3.5.2. Implementação das experiências

Para a realização das experiências foram utilizadas oito *'wafers dummies'*, uma para cada experiência. *'Wafers dummies'* são *'wafers'* idênticas às *'wafers'* de produção com estruturas de teste nas ruas, mas com unidades não funcionais. *Wafers* propositadamente fabricadas para serem usadas em testes.

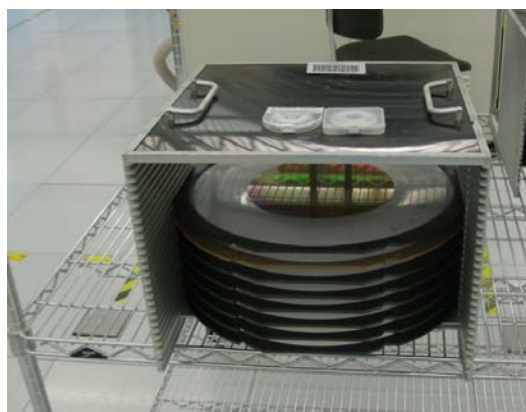


Figura 81 Wafers usadas nas experiências

Cada 'wafer' foi previamente identificada com o número correspondente à experiência com a qual iria ser realizada.



Figura 82 Wafers identificadas com número de experiência

As experiências consistiram em efetuar o corte controladamente, efetuando as alterações exigidas por cada uma, conforme previamente definido na matriz ortogonal L8.

As lâminas eram de constituição semelhante e tinham o mesmo Mesh, o fator espessura é que variava, uma tinha 25 e a outra 60  $\mu\text{m}$ , nível 1 e nível 2 respectivamente.



Figura 83 Lâminas utilizadas nas experiências (nível 1 e 2)

Instalação no equipamento das lâminas:

As lâminas são de espessuras muito reduzidas e partem facilmente. Foi garantida a correta colocação, de forma a introduzir o mínimo de ruído nas experiências.

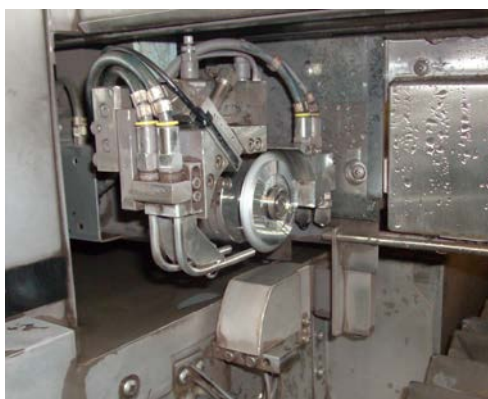


Figura 84 Colocação da lâmina no spindle

A alteração dos restantes fatores, bem como o seu monitoramento durante as experiências, foi efetuada no 'software' do equipamento:

No.	Height1 [mm ]	Height2 [mm ]	Feed spd [mm/s ]	Y-index [mm ]	Times
1	0.380	0.230	50.000	11.6032	0
2	0.000	0.000	0.000	0.0000	0
3	0.000	0.000	0.000	0.0000	0
4	0.000	0.000	0.000	0.0000	0

Factor "C" points to the Height1 field in row 1. Factor "A" points to the Feed spd field in row 1.

Figura 85 Local no software onde alterava a profundidade de corte e velocidade de avanço

**Device Data (3.1.2)**

Device data No. ENG-EWLB / EXPCURL I

ID EXP-CURLING

Unit  mm  inch

Spindle rev. Z1 60000 /min Z2 50000 /min

Cut mode SUB\_INDEX

Cut method Z1

Factor "B" points to the Z1 spindle speed field.

Figura 86 Local no software onde alterava a velocidade de rotação da lâmina

**Blade Replacement (4.1)**

Unit  mm  inch

Axis to blade replacement

Z1 blade

Lot ID: M130328215421C

Spec: SD400

New / Used:  ▼

Blade 0. D.: 54.000 mm

Blade thickness: 0.060 mm

Blade life: 0 lines

3000.000 m

Factor "D"

Figura 87 Alteração da espessura da Lâmina

Realização das experiências com o corte das 'wafers' nas condições já previamente estipuladas:

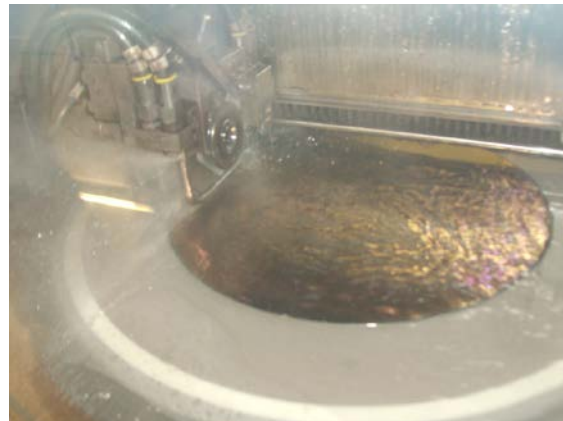


Figura 88 Corte das várias experiências

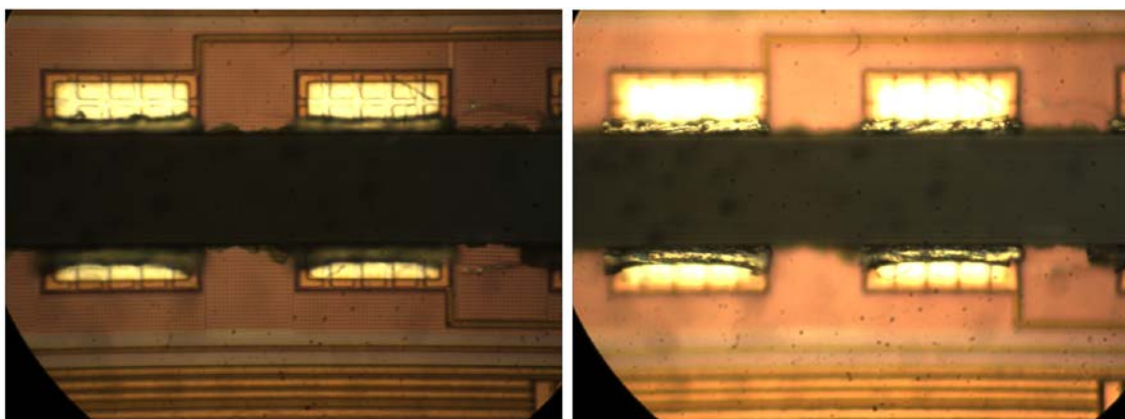


Figura 89 Imagem da medição de *curling*/ focagem na base e focagem na parte superior do *curling*

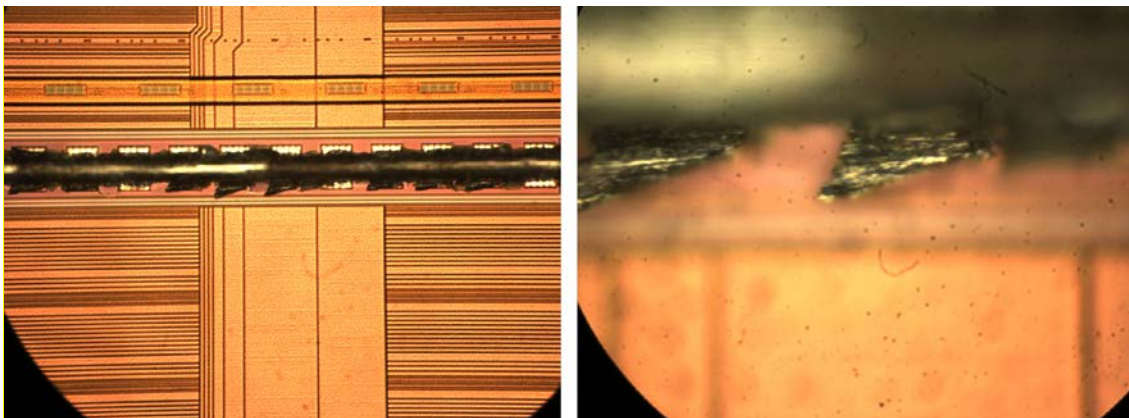


Figura 90 Imagem de *curling* de uma das experiências

### 3.5.3. Mapeamento das experiências a realizar e resultados

A tabela seguinte apresenta o número de experiências, bem como os respetivos níveis de cada fator de entrada:

Tabela 10 Número de experiência e níveis dos fatores:

Exp.	Factores						
	A	B	AxB	C	Erro	Erro	D
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 tabela seguinte apresenta os resultados de saída da característica '*curling*':

Tabela 11 Resultados obtidos:

Exp.	Curling_Linhas															Média	Sigma	Unid.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
1	5,7	3,1	5	4,9	4,7	4	4,4	4,2	3,4	5	4	4,7	3,9	4,5	4,4	4,39	0,66	µm
2	7,8	5,5	7,1	7	7,8	7,7	6,7	7,5	5,6	5,8	7,8	6,7	7,4	7	8,2	7,04	0,85	µm
3	4,6	6,4	7,1	4,8	5,4	6,2	5,8	5,7	5,3	6,7	8,3	6,3	6,7	6,6	8	6,26	1,05	µm
4	3,2	3,8	4	4,6	3,9	4,1	3,4	3	3,7	4,7	3,5	4	6,4	3,8	4,1	4,01	0,80	µm
5	4,9	6,8	6,5	6	6,2	7,7	5,9	5,7	7,4	6,8	6,1	6,2	6,8	7,4	5,4	6,39	0,78	µm
6	10,5	10,3	10,7	12,1	11,6	11,7	14,3	13,1	10,1	10,6	10,3	13,7	11,5	12,1	11,1	11,58	1,29	µm
7	6,7	8,4	5,6	6	5,3	4,8	5,1	5,1	5,2	5,7	6	7	5,4	6,5	3,7	5,77	1,09	µm
8	7,6	9	7,3	8,2	7	6,1	6,3	7,9	6,3	7,6	7,7	7,8	9,2	6,7	8,2	7,53	0,93	µm

Os valores de resposta foram introduzidos no '*software*' de análise estatística CEDA para uma primeira interpretação, dando origem ao seguinte gráfico:

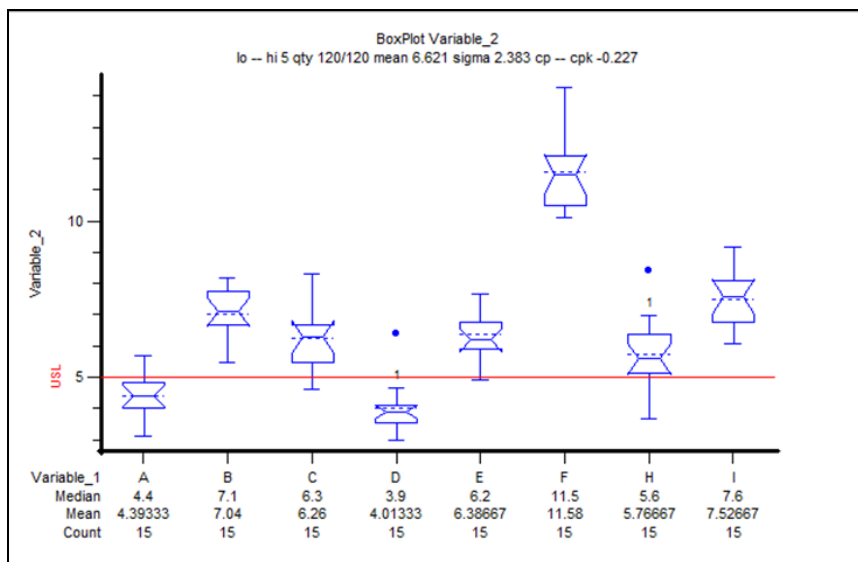


Figura 91 Gráfico com os resultados das experiências (software CEDA)

Os resultados obtidos de 'curling' das várias experiências apresentam valores estatisticamente diferentes. A experiência seis (F) é evidente ser a que apresenta pior resultado (média= 11.58  $\mu\text{m}$ ), enquanto que as experiências um (A) e quatro (D) foram as que obtiveram melhores resultados (médias = 4.39 e 4.0  $\mu\text{m}$  respectivamente).

### 3.5.4. Análise crítica dos resultados

Tabela 12 Médias de resultados:

Exp.	Média	Sigma	Unid.
1	4,39	0,66	$\mu\text{m}$
2	7,04	0,85	$\mu\text{m}$
3	6,26	1,05	$\mu\text{m}$
4	4,01	0,8	$\mu\text{m}$
5	6,39	0,78	$\mu\text{m}$
6	11,58	1,29	$\mu\text{m}$
7	5,77	1,09	$\mu\text{m}$
8	7,53	0,93	$\mu\text{m}$

Cálculo do somatório das médias:

$$\sum \bar{T} = 52.97 \mu\text{m}$$

Cálculo da média das médias:

$$\bar{\bar{T}} = \frac{52.97}{8} = 6.62 \mu\text{m}$$

Construção da tabela das médias:

Para a construção da tabela das médias realiza-se primeiro o cálculo da média para o nível 1 e para o nível 2 de cada fator.

Após o cálculo da média efetua-se a diferença entre os resultados dos níveis de cada fator. O valor da diferença determina a influência que o fator tem na característica, neste caso o 'curling'.

Cálculo da média para o fator A:

$$\begin{aligned}\overline{A1} &= 5.43\mu\text{m} \\ \overline{A2} &= 7.82\mu\text{m} \\ A &= |\overline{A1} - \overline{A2}| = 2.39\mu\text{m}\end{aligned}$$

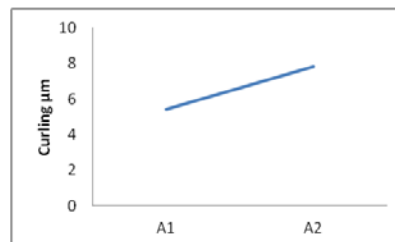


Figura 92 Gráfico do *curling* com os níveis do fator A

Cálculo da média para o fator B:

$$\begin{aligned}\overline{B1} &= 7.35\mu\text{m} \\ \overline{B2} &= 5.89\mu\text{m} \\ B &= |\overline{B1} - \overline{B2}| = 1.46\mu\text{m}\end{aligned}$$

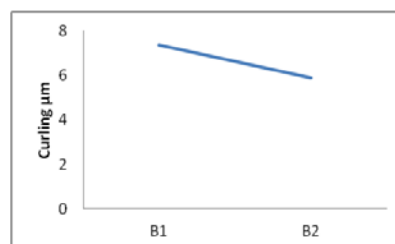


Figura 93 Gráfico do *curling* com os níveis do fator B

Cálculo da média para o fator C:

$$\begin{aligned}\overline{C1} &= 5.70\mu\text{m} \\ \overline{C2} &= 7.54\mu\text{m} \\ C &= |\overline{C1} - \overline{C2}| = 1.84\mu\text{m}\end{aligned}$$

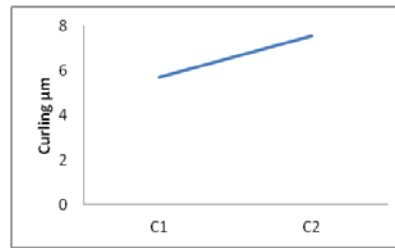


Figura 94 Gráfico do *curling* com os níveis do fator C

Cálculo da média para o fator D:

$$\begin{aligned}\overline{D1} &= 6.44\mu\text{m} \\ \overline{D2} &= 6.80\mu\text{m} \\ D &= |\overline{D1} - \overline{D2}| = 0.37\mu\text{m}\end{aligned}$$

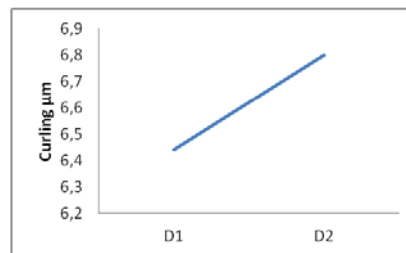


Figura 95 Gráfico do *curling* com os níveis do fator D

Cálculo da média da interação AxB:

$$\begin{aligned}\overline{A1B1} &= \frac{4.39+7.04}{2} = 5.72\mu\text{m} \\ \overline{A1B2} &= \frac{6.26 + 4.01}{2} = 5.14\mu\text{m} \\ \overline{A2B1} &= \frac{6.39+11.58}{2} = 8.98\mu\text{m} \\ \overline{A2B2} &= \frac{5.77 + 7.53}{2} = 6.65\mu\text{m}\end{aligned}$$

Tabela 13 Interação AxB:

	<b>B1</b>	<b>B2</b>
<b>A1</b>	5.72	5.14
<b>A2</b>	8.98	6.65

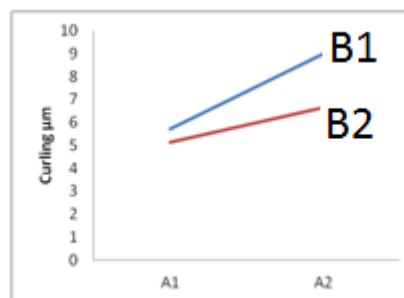


Figura 96 Gráfico do *curling* com os fatores AxB

Após o cálculo da média e analisando a representação gráfica de variação do '*curling*' em função dos níveis de cada fator, pode dizer-se que a melhor combinação é: **A1; B2; C1; D1**.

Tabela 14 Médias (Tabela das médias):

	A	B	AB	C	D
Nível 1	5.43	7.35	5.72	5.70	6.44
Nível 2	7.82	5.89	6.65	7.54	6.80
Diferença	2.39	1.46	0.93	1.84	0.37
Ranking	1	3	4	2	5

A diferença das médias permite criar um 'ranking' do mais influente para o menos influente. Da análise da tabela das médias pode-se verificar que o mais influente é o fator A, C e B respectivamente, e com menor influência a interação AB e o fator C.

Cálculo da estimativa da média para a melhor combinação:

O cálculo da estimativa da média ou média do processo é obtido pela adição dos efeitos principais.

Só são considerados os efeitos mais influentes porque o erro da variância está diluído em cada uma das médias.

Existe uma regra simples para facilitar a identificação dos fatores mais influente e menos influente. Consiste em identificar na tabela das médias a diferença maior e dividi-la por dois. Todos os valores iguais ou superiores a este são considerados como fatores com efeito forte.

Neste caso a maior diferença é  $2.39\mu\text{m}$ :

$$\frac{2.39}{2} = 1.195\mu\text{m}$$

Logo a melhor combinação é  $\overline{A1}; \overline{B2}; \overline{C1}$ , sendo que  $\overline{AB}$  e  $\overline{D}$  são considerados pouco influentes e como tal identificados para o erro.

Estimativa da média para a melhor combinação obtém-se com a seguinte fórmula:

$$\mu = \overline{T} + (\overline{A1} - \overline{T}) + (\overline{B2} - \overline{T}) + (\overline{C1} - \overline{T})$$

$$= 3.78 \mu\text{m}$$

$\mu$  - Estimativa da média do processo na melhor combinação

$\overline{T}$  - Média das médias

Foi efectuada a análise da variância utilizando 'software' específico para este fim (Anova-TM 4.0).

Tabela 15 Médias obtidas pelo software:

Source	Pool	DF	S	V	F	S'	rho
A		1	11.4481	11.4481			
B		1	4.2486	4.2486			
AB		1	1.5400	1.5400			
C		1	6.7528	6.7528			
ERROR		2	14.0364	7.0182			
D		1	0.2701	0.2701			
e1							
e2							
(e)	UnPool						
Total	Auto	7	38.2961	5.4709			

S= soma dos quadrados

V=variância ( $V=S/G_L$ )

$G_L$ = grau de liberdade

Utilizando a mesma regra já mencionada anteriormente, os fatores ou interações menos influentes são enviados para o erro. A contribuição da interação AxB e do fator D foi enviado para o erro dando origem à seguinte tabela:

Tabela 16 Resultado da análise da variância pelo software:

Source	Pool	DF	S	V	F	S'	rho
A		1	11.4481	11.4481	12.6490	10.5430	27.53
B		1	4.2486	4.2486	4.6943	3.3435	8.73
AB	(e)	1	1.5400	1.5400			
C		1	6.7528	6.7528	7.4612	5.8478	15.27
ERROR		2	14.0364	7.0182	7.7544	12.2263	31.93
D	(e)	1	0.2701	0.2701			
e1							
e2							
(e)	UnPool	2	1.8101	0.9051		6.3354	16.54
Total	Auto	7	38.2961	5.4709			

F= fator de variância do erro ( $F= V/V_e$ )

S'= fator de variação pura ( $S'=S-V_e$ )

rho= Rácio de contribuição de cada fator ( $\rho= S/S_{Total}$ )

A contribuição de cada fator para o 'curling' pode ser observado na tabela pelo rácio "rho" (em %). Da análise da tabela verifica-se que a contribuição para o 'curling' do fator A é de 27.53%, do fator C é de 15.27% e do fator B é de 8.73%. A soma destes contribuidores é igual a 51.53%, o que significa que 51.53% da variância do processo se deve a estes fatores.

O erro que apresenta um valor de 31.93%, valor este relativamente alto que representa a variação natural do processo e a influência de alguma interação que não foi alvo neste estudo.

Representação gráfica da diferença das médias em cada um dos fatores:

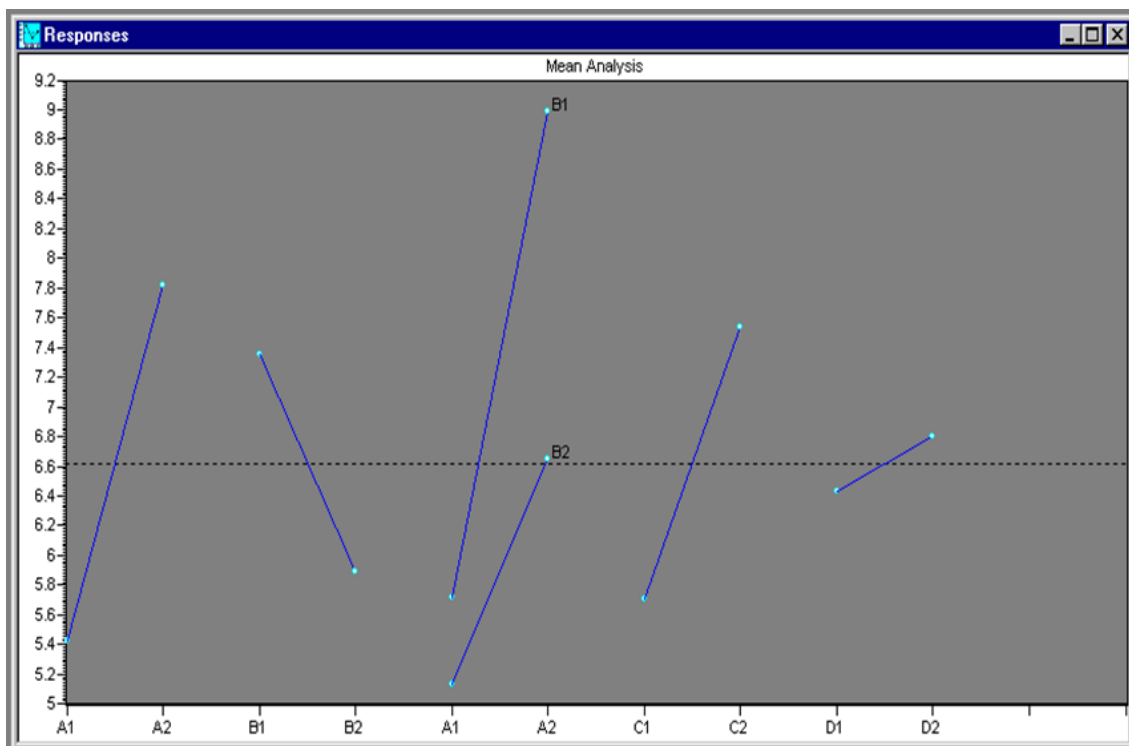


Figura 97 Representação gráfica das médias

A representação gráfica proporciona uma compreensão fácil do comportamento dos fatores.

A análise gráfica permite verificar que existe interação entre o fator A e B, embora o efeito não seja forte porque as linhas não se intercetam.

Quanto maior for a inclinação maior é o efeito, com maior inclinação tem-se o fator A, B e C. O fator D é o menos influente e com menos inclinação.

Confirma-se ainda que a melhor combinação de fatores é  $\overline{A1}$ ;  $\overline{B2}$ ;  $\overline{C1}$ ;  $\overline{D1}$ .

Tabela 17 Estimativa da melhor combinação obtida por software:

**Prediction & Optimum Conditions**

Conditions to estimate  
A1 B2 C1

Initial

Optimum

Calculate It

Factor label	Level	Interaction	Level
A	1		
B	2		
C	1		
D	1		

Summary of Mean Prediction ( $\bar{\mu}$ )

Average	Value	C.I.
Grand	6.6212	$\pm 2.0239$
$\bar{\mu}$ Initial		
$\bar{\mu}$ Optimum	3.7775	

Confidence level: 95%

Para um grau de confiança de 95% obteve-se um valor para curling de  $3.78\mu\text{m} \pm 2.0\mu\text{m}$ .

### 3.5.5. Resumo dos resultados

A melhor combinação de fatores corresponde respectivamente: à velocidade de avanço de 20 mm/s, à rotação da lâmina a 60000 rpm, profundidade de corte de 380  $\mu\text{m}$  e à espessura da lâmina de 25  $\mu\text{m}$ .

O fator que mais contribui para o 'curling' é a velocidade de avanço da 'wafer' com 27.53%, seguido da profundidade de corte com 15.27% e por fim a rotação da lâmina com 8.73%. A influência da espessura, embora não tenha relevância estatística, apresenta resultados ligeiramente melhores com espessura mais fina de 25  $\mu\text{m}$ .

### 3.5.6. Ações a implementar

Este estudo permitiu verificar os melhores níveis para os fatores estudados e propostos sendo que, sempre que for necessário efetuar o corte de uma 'wafer' de um novo produto com risco de ocorrência de 'curling', estes níveis serão aplicados como ponto de partida.

No entanto não podemos descurar outros fatores de risco influentes como é o caso da geometria dos 'pads' e sua constituição, sendo todo o material proposto para corte objeto de estudo contínuo.

Resumindo para minimizar os efeitos de curling devem ser utilizadas baixas velocidades de avanço, altas velocidades de rotação e elevadas profundidades de corte.

### 3.6. Análise dos resultados obtidos com os novos procedimentos

Para validar a robustez da melhor combinação de fatores encontrada, efetuou-se a execução de novas amostras com esses parâmetros.

Para um grau de confiança de 95%, o valor estimado de 'curling' é de  $3.78 \mu\text{m} \pm 2.0 \mu\text{m}$ . Efetuou-se uma experiência de confirmação onde é esperado 'curling' entre 1.78 a  $5.78 \mu\text{m}$ .

O resultado obtido da experiência de confirmação é apresentado na tabela seguinte:

Tabela 18 Resultado da experiência de confirmação:

Exp.	Curling Linha															Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Confirmação	5,3	5,4	5	3,4	4,3	3,9	4,6	4	4,1	5,5	3,8	3,4	3,6	4,2	3,6	4,2

O valor médio obtido foi de  $4,2 \mu\text{m}$ , o que significa que o 'curling' se encontra dentro do intervalo esperado, confirmando a validade da melhor combinação encontrada.

A aplicação destes níveis trazem ainda uma melhoria geral à qualidade do produto, o único ponto menos favorável prende-se com o uso de uma velocidade de avanço de  $20 \text{ mm/s}$  a qual influencia negativamente o output do equipamento.



## 4. Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta tese contribuiu para o aumento do conhecimento do processo de corte de *'wafers'*, uma vez que foram aprofundados os conhecimentos sobre os parâmetros envolvidos neste processo bem como na influência na característica *'curling'*. Contribuiu também para a aplicação na prática do método de Taguchi.

Este método permite efetuar um estudo de forma ordenada para obter uma indicação dos melhores níveis dos fatores envolvidos no processo de corte de *'wafers'*.

Com este método consegue-se reduzir o número de experiências, o custo e o tempo para identificar os melhores níveis, de forma a tornar um processo mais robusto.

Com o estudo conclui-se que a interação AB (velocidade de avanço e rotação da lamina) para os níveis utilizados, não têm um efeito forte na característica *'curling'*.

O fator A (velocidade de avanço) individualmente provou ser o mais influente na geração do fenómeno *'curling'* com uma contribuição de 27.53%, deve ser usada uma velocidade de avanço baixa.

A profundidade de corte com uma contribuição de 15.27%, uma maior profundidade proporciona uma melhor regeneração da lâmina.

A influência da rotação da lâmina aparece em terceiro lugar, uma rotação elevada traduz-se numa melhoria do *'curling'*, aumenta a velocidade de regeneração e limpeza da lâmina durante o corte.

Em último lugar e estatisticamente menos influente aparece a espessura da lâmina.

Com este DOE não se conseguiu eliminar o problema, mas foi minimizado para um valor de 3.78 $\mu$ m.

Futuramente poderá realizar-se novo estudo com este método utilizando outros fatores, de forma a reduzir o valor agora alcançado, como por exemplo utilizar lâminas com diferentes concentrações, diferente tamanho de grão (Mesh). Estes fatores têm influência na carga necessária para o corte e na capacidade de autorregeneração da lâmina. A sua importância tem relevância para a qualidade de corte e será interessante estudar a sua influência no *'curling'*.



## **5. Bibliografia e Outras Fontes de Informação**

### **Referências Bibliográficas**

- [1]- Charles Cohn, "Development and Fabrication of IC Chips", McGraw-Hill, 2004
- [2]- Disco Corporation, "Blade Processing Mechanism", Disco Corporation, 2006/Nº 17
- [3]- Disco Corporation, "Influence of Blade Size on Processing Quality", Disco Corporation, 2007/Nº 21
- [4]- Disco Corporation, "Influence of the Bond on Processing Quality", Disco Corporation, 2007/Nº 20
- [5]- Disco Corporation, "Influence of Concentration on Processing Quality", Disco Corporation, 2007/Nº 19
- [6]- Disco Corporation, "Influence of Cutting Water in Dicing", Disco Corporation, 2009/Nº 28
- [7]- Disco Corporation, "Influence of Grit Size on Processing Quality", Disco Corporation, 2006/Nº 18
- [8]- Disco Corporation, "Backside Chipping Part 4: Processing- Related factors", Disco Corporation, 2004/Nº 8.
- [9]- Disco Corporation, "Factors Causing Surface Chipping 3", Disco Corporation, 2005/Nº 12.
- [10]- Disco Corporation, "Influence of Processing Conditions on Processing Quality 2", Disco Corporation, 2008/Nº 23.
- [11]- Fabiano Fruett and Gerard C. M. Meiger, "The Piezointeraction Effect In Silicon Integrated Circuits and Sensors", Kluwer, 2002
- [12]- Disco Corporation, "TEG Wafer Processing", Disco Corporation, 2009/ Nº 30
- [13]- Sadao Adachi, "Properties of Aluminium Gallium Arsenide", Inspeck, 1993
- [14]- H. R. Huff, U. Gösele, H. Tsuya, "Semiconductor Silicon 1998", The Electrochemical Society Inc., 1998
- [15]- Joseph R. Davis, "Tool Materials", ASM, 1995
- [16]- Enric Brillas and Carlos Alberto Matinez- Huitle, "Synthetic Diamond Films", John Wiley and Sons, 2011
- [17]- Domingos Pinto, "Método de Taguchi ,Apontamentos da formação realizada na Nanium ", 2012
- [18]- António Ramos Pires, "Inovação e Desenvolvimento de Novos Produtos", Edição Silabo, 1999

- [19]- Ranjit K. Roy, “Design of Experiments using the Taguchi Approach”, John Wiley & Sons, 2001
- [20]- Genichi Taguchi, “Introduction to Quality Engineering”, Asian Productivity Organization, 1990
- [21]- Andrew Rutherford, “Introducing ANOVA and ANCOVA: A GJM Approach”, Sage Publications, 2001

## Outras Fontes de Informação

- [22]- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Laminar\\_Flow\\_Reinraum.png](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Laminar_Flow_Reinraum.png) [consultado em 15/11/2012]
- [23]- <http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2886> [consultado em 15/11/2012]
- [24]- <http://www.top-alternative-energy-sources.com/Czochralski-process.html> [consultado em 11/11/2012]
- [25]- <http://www.theenergylibrary.com/node/11616> [consultado em 11/11/2012]
- [26]- Engenharia de processo, “eWLB presentation”, Nanium S.A., 2013
- [27] - Disco DFD6361, “Maintenance Manual (UKFWMEA816P)”, Disco Corporation, 1999
- [28]- <http://www.disco.co.jp/eg/products/description/description10.html> [consultado em 28/11/2012]
- [29]- <http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx> [consultado em 08/02/2013]
- [30]- [http://chasqueweb.ufrgs.br/~hklmach/E061/Trabalho\\_1/apresentacao\\_wafers.pdf](http://chasqueweb.ufrgs.br/~hklmach/E061/Trabalho_1/apresentacao_wafers.pdf) [consultado em 08/02/2013]
- [31]- [http://dei-s1.dei.uminho.pt/outraslic/lebiom/micro\\_1/download/cap2.pdf](http://dei-s1.dei.uminho.pt/outraslic/lebiom/micro_1/download/cap2.pdf) [consultado em 08/02/2013]
- [32]- Kurt E. Petersen, <http://inst.cs.berkeley.edu/~n245/fa01/PETERSEN.PDF> [consultado em 08/02/2013]
- [33]- <http://www.minitron.com/deutsch/mswbl4.pdf> [consultado em 14/03/2013]
- [34]- Diego Ferreira, Hugo Mesquita, Rafael Lima, [http://www.ufpa.br/getsolda/docs\\_graduacao/trab\\_niquel.pdf](http://www.ufpa.br/getsolda/docs_graduacao/trab_niquel.pdf) [consultado em 14/03/2013]
- [35]- Ana Castela, <http://ria.ua.pt/bitstream/10773/2285/1/2009000996.pdf> [consultado em 17/04/2013]
- [36]- [http://www.eps.ufsc.br/disserta96/vieira/figuras/fig4\\_6.gif](http://www.eps.ufsc.br/disserta96/vieira/figuras/fig4_6.gif) [consultado em 17/04/2013]
- [37]- Nanium S.A, “Nanium Overview—Documentação interna”, Nanium S.A., 2013

## Anexos

- **Anexo I.** ‘Papers’ da Disco Corporation
- **Anexo II.** ‘Data sheet’ das lâminas
- **Anexo III.** ‘Data sheet’ das propriedades dos materiais constituintes das lâminas e wafers
- **Anexo IV.** Formulário aplicado pelo software para o cálculo da análise de variância (ANOVA)

# ***ANEXO I***

---

'Papers' da Disco Corporation

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2004/ No. 8  
**DISCO CORPORATION**  
 PS Company  
 Engineering/SG Department, Global Marketing Group

Menu  
 Features  
 Reports

## Backside Chipping, Part 4: Processing-Related Factors

Processing conditions have a great affect on throughput and processing quality. When considering ways to reduce backside chipping, it is important to determine not only the best blade for the workpiece but also the processing conditions that best match the blade.

In this issue we will look at four processing-related factors that have an effect on backside chipping: feed speed, spindle rpm, cut depth, and coolant water flow.

(NB: In discussing the tendencies below, the workpiece and all variables besides the factor in question are assumed to be unchanging. Further, the tendencies described are not absolute: opposite phenomena may occur because of workpiece characteristics or other factors. Please consult Disco before formulating or altering any application.)

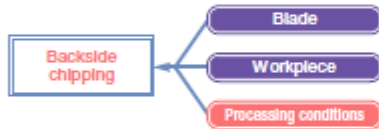


Fig. 1: Categories of backside chipping factors

### NUTSHELL

Backside chipping BETTER	Backside chipping WORSE
Feed speed SLOWER	Feed speed FASTER
Spindle rpm HIGHER	Spindle rpm LOWER
Cut DEEPER	Cut SHALLOWER
Coolant flow IDEAL	Coolant flow EXCESSIVE

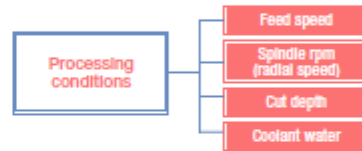
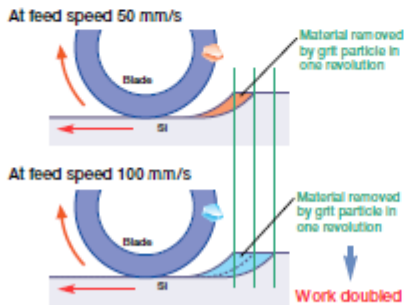


Fig. 2: Processing-related factors of backside chipping

### Factor 1: Feed speed

As feed speed increases, so does throughput, but because each grain of diamond grit is required to work harder and remove more material per revolution (Fig. 3), the stress placed on the blade is greater. At the same time, the stress placed on the workpiece is also greater, which causes backside chipping to increase.



When feed speed is increased and other processing conditions are held constant, the amount of work done by each particle of grit (processing load) increases.

Fig. 3: Feed speed and differences in processing load

On the other hand, when feed speed is extremely slow, the blade does not wear sufficiently. Grit particles that are no longer cutting well are not removed, giving rise to a situation called blade dulling (Fig. 4, Photo 1). Blade dulling is a cause not only of backside chipping but also of wavy cutting and other compromisers of process quality.

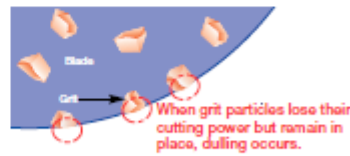


Fig. 4: Blade dulling

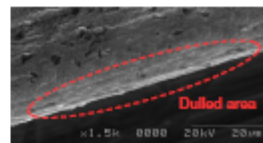
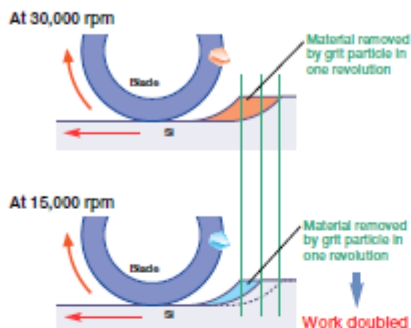


Photo 1: Dulling on blade edge

Backside Chipping, Part 4

Factor 2: Spindle rpm (radial speed)

Spindle revolutions per minute are commonly set high so as to lessen the processing load, or amount of work required of each grain per revolution (Fig 5). Higher rpm settings tend to increase blade life and lessen surface chipping.



When spindle speed is decreased and other processing conditions are held constant, the amount of work done by each particle of grit (processing load) increases.

Fig. 5: Spindle rpm and differences in processing load

On the other hand, at a high rpm setting the work done by each grit particle does indeed decrease, but the blade's self-sharpening ability is suppressed and dulling can occur. For this reason backside chipping also tends to increase. Hence, to reduce backside chipping spindle rpm should be set lower, thereby facilitating the blade's self-sharpening mechanism.

Also known as autogenous sharpening, this mechanism is fundamental to the function of diamond blades and other abrasive tools. Unlike other cutting tools, a diamond blade retains its edge simply by performing work: worn grit particles detach from the blade, making way for those beneath (Fig. 6).

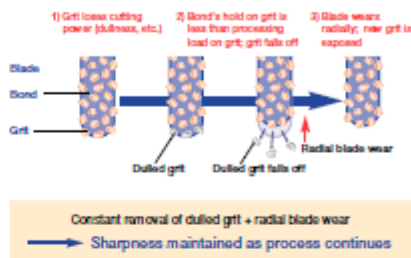


Fig. 6: Autogenous sharpening

This self-sharpening mechanism, however, can be blocked by a variety of factors, and clogging or dulling may occur, compromising both blade life and cut quality. For this reason, proper facilitation of this mechanism is of great importance.

One other reason why a high spindle rpm setting tends to encourage backside chipping is that the high radial speed may cause coolant water to act on the blade in a less effective fashion.

Factor 3: Cut depth

When cut depth into the tape is shallow, the die retain the curved shape of the blade edge (Fig. 7). At the bottom of each die a thin protrusion of the substrate remains, which can crack off during cutting, pickup, or other process stages, leaving a chipped, uneven area. Hence, insufficient cut depth tends to cause backside chipping.

Contrariwise, when cut depth is ideal the die are cut straight, and backside chipping is unlikely to arise from this factor (Fig. 8).



Factor 4: Coolant water

Coolant water cools the blade and workpiece and also serves to wash away contamination. When, however, the volume or pressure of the coolant water is too great, the die can vibrate or contact each other, causing backside chipping.

Further, die may actually be scattered by excessive coolant water and cause periodic surface chipping (see *The Cutting Edge* No. 2: "Cyclical Surface Chipping, Part 2").

In the next issue:  
Wafer breakage during grinding: causes and solutions.

Engineering R&D Department, Diamond Marketing Group  
PS Company  
DISCO CORPORATION  
www.disco.co.jp

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2005/ No. 12  
 DISCO CORPORATION  
 PS Company  
 Engineering, R&D Department, Global Marketing Group

Menu  
 Features  
 Topics

## Factors Causing Surface Chipping 3

This is the final article in a series to explain the factors which cause surface chipping. Process parameters are the focused of this article. (Fig. 1).



Fig. 1: Surface Chipping by Specific Factors

### Surface Chipping Caused by the Process Parameters

The four process parameters which cause surface chipping which are shown in Fig. 2 will be explained.

Shown below are sources of surface chipping when the same process parameters are used. The results may differ depending upon the work piece material and the surface coatings.

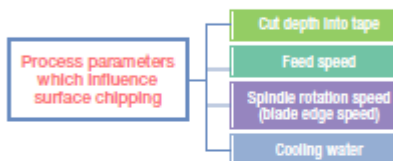


Fig. 2: Process Parameters which Influence Surface Chipping

### Factor 1: Cut depth into Tape

Fig. 3 is a graph showing the relationship between the cut depth into the tape and surface chipping (Fig. 4). This shows the deeper the tape cut depth, the greater the process load. This results in an increase in surface chipping (Fig. 5, Note 1).

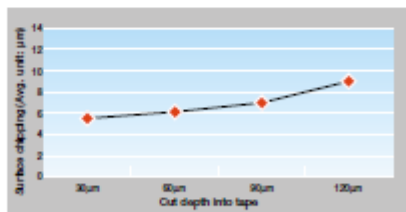


Fig. 3: Surface Chipping Vs. cut depth into tape

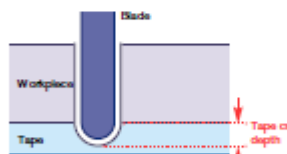


Fig. 4: Cut Depth (Conceptual Drawing)



Fig. 5: Surface Chipping According to the Difference of Tape Cut Depth

#### Processing parameters

Blade: NBC-ZH202J 27H888  
 Spindle revolutions: 40,000 rpm  
 Feed speed: 20 mm/s  
 Workpiece: ø8" Si mirror wafer with thickness of 100 µm  
 Tape thickness: 150 µm

#### Note 1:

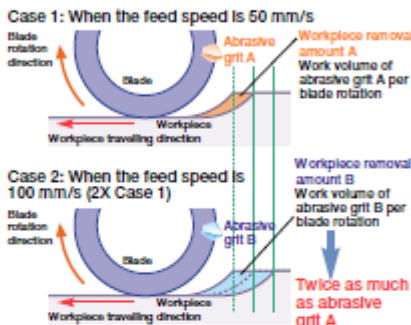
When the tape cut depth is deep the influence of the blade edge shape is reduced, reducing the backside chipping. (For influence of tape cut depth on backside chipping, refer to *The Cutting Edge* No. 8 Factors Causing Backside Chipping 4.)

**Factors Causing Surface Chipping 3**

**Factor 2: Feed speed**

Feed speed is an important parameter. It determines throughput. When the feed speed is high the volume of material removed per grit of abrasive at the processing point (workpiece removal amount) is high. The load on the blade is also high. (Fig. 6).

Because of this fact, the higher the feed speed the greater the load on the blade and the greater the impact on the work piece. Therefore the surface chipping tends to be larger (Fig. 7, Note 2).



When only the feed speed is increased and all other parameters are constant, work per abrasive grit (processing load) increases.

Fig. 6: Difference in Process Load due to a Difference in Feed Speed (Conceptual Drawing)

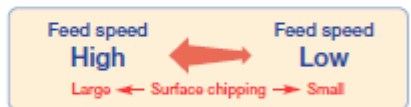


Fig. 7: Surface Chipping with relation to a Difference in Feed Speed

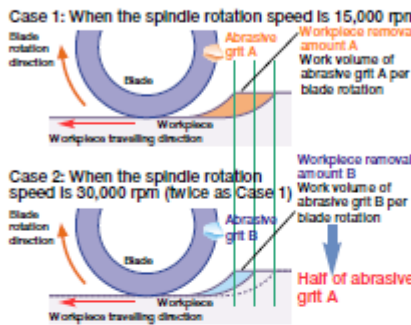
**Note 2:**

When feed speed is extremely slow, the load on the blade is extremely small. Self sharpening of the blade stops. This is a problem because glazing can occur, which increases surface chipping.

\*For the self-sharpening and the glazing of blades please refer to The Cutting Edge No. 8: Factors Causing Backside Chipping 4.

**Factor 3: Spindle rotation speed (blade edge speed)**

Increasing the spindle rotation speed reduces the work per abrasive grit (Fig. 8), which results in smaller surface chipping. This can be compared with a low rotation speed (Fig. 9, Note 3).



When only the spindle rotation speed is increased and all other parameters are hold constant, work volume per abrasive grit (processing load) is reduced.

Fig. 8: Difference in Process Load due to the Difference in Feed Speed (Conceptual Drawing)



Fig. 9: Surface Chipping with regard to a Difference in Spindle Rotation Speed

**Note 3:**

When the spindle rotation speed is extremely high, the load at the process point becomes extremely small. The self-sharpening of the blade is stopped causing glazing and an increase in surface chipping.

**Factor 4: Cooling water**

Cooling water plays a role in cooling the blade and work piece. It also aids in removing the material being cut. When the pressure and flow rate of the cooling water are set excessive high, the blade vibrates, increasing surface chipping.

If cooling water pressure and flow rate are insufficient surface chipping increases along with an increase in blade wear.

It is important to set cooling water pressure and flow rate to remove the material being cut and not increasing chipping (Fig.10).

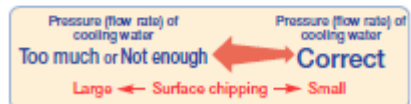


Fig. 10: Surface Chipping with regard to cooling water

**In the next issue:**

The next issue will introduce factors which cause the blade to meander or walk and ways in which to prevent this. The title will be Blade Meandering.

Engineering R&D Department, Diamond Marketing Group  
 PS Company  
 DISCO CORPORATION  
 www.disco.co.jp

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2006/ No. 17  
**DISCO CORPORATION**  
 Diamond Marketing Group  
 Sales Engineering Department FS Company

Idioma  
 Inglês  
 Português

## Blade Processing Mechanism

Several issues of The Cutting Edge will cover basic information on the mechanism of abrasive blade cutting to enable you to get the full performance of DISCO.

This issue examines the over all process of abrasive cutting. The next issue will cover what influence the blade components have on processing quality.

### 01: What is a Blade?

A blade mainly consists of abrasive grit and bond. The abrasive grit does the cutting and the bond retains the abrasive grit.

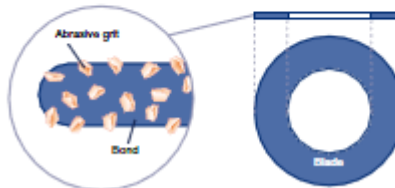


Fig. 1: Blade composition

### 02: Blade Processing Mechanism and Chip Pockets

The process of cutting and making a groove with the blade is a "grinding" process which shaves away the workpiece. This mechanism is similar to that of a saw cutting wood where the spaces between the grains of abrasive, like the teeth of the saw, play an important role.

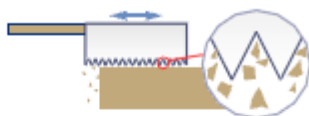


Fig. 2: Mechanism of a saw

For both the diamond blade and wood saw, the indentations shown circled in red above carry out the cutting dust. In the diamond blade this area is called a "chip pocket." This chip pocket is a very important component of the blade. If there is no chip pocket, a workpiece cannot be processed properly.



Photo 1: Chip pockets



Fig. 3: Chip pockets

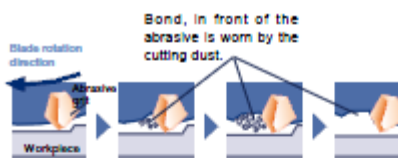


Fig. 4: Creation of a chip pocket

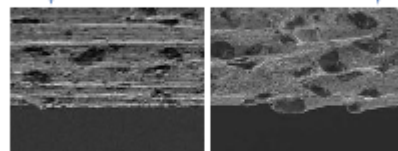


Photo 2: Before chip pocket creation  
 Photo 3: After chip pocket creation

**Function of the chip pocket:**  
 1. Effect removal of the cutting dust:  
 It collects and carries the cutting dust out of the kerf where it is discharged.  
 2. Effect of cooling:  
 It carries water to the processing point for cooling.  
 Chip pockets do not exist on a new blade but are created during dressing or precut (for details, refer to The Cutting Edge No. 10).

**Blade Processing Mechanism**

**03: Self-sharpening**

Different from most cutting tools, the abrasive diamond blade has a special characteristic called "self-sharpening". The process is a wearing of the blade as it is cutting. The wear maintains a consistent good cutting edge.

Steps 1 and 2 below show the process of self-sharpening.

1. The bond, which holds the grains of abrasive, is gradually worn by the load applied during cutting or by the cutting dust from the workpieces. (The blade is worn so that the diameter is reduced.)
2. As the bond shrinks the abrasive grit at the edge are released exposing new grains of abrasive at the edge. This is a self sharpened edge which becomes the new cutting face to process the workpiece.

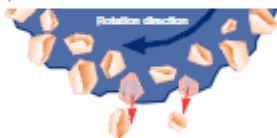


Fig. 6: Self-sharpening mechanism

The table below shows a comparison between the performance of a knife blade and an abrasive blade as they wear. The abrasive blade maintains its ability for good cut quality due to the self-sharpening effect.



Abrasive Blade	Knife
	
<b>Good cutting ability is maintained</b>	<b>Good cutting ability deteriorates</b>
Each one of the grains of abrasive is a cutting edge. The grains wear constantly while maintaining their shape.	The edge becomes rounded requiring the cutting edge to be sharpened in order to revive the good cutting ability.

Fig. 8: Wear mechanism

**04: Blade Processing Modes**

There are two processing modes for a blade depending on the material being processed.



Fig. 7: Blade processing mode

**1. Brittle mode**

This is the mode in which brittle materials (e.g., silicon and ferrite, ice) are processed. This mode creates minute cracks when the abrasive grains hit the workpiece, and is characterized by the chips created.



Fig. 9: Brittle mode

Photo 4: Processing example of brittle mode

**2. Ductile mode**

This is the mode in which ductile materials (e.g., resin and metal, ice cream) are processed. This mode shaves off material while deforming the workpiece with the abrasive. It is characterized by small projections called burring or whiskers created on the edge of the area processed.

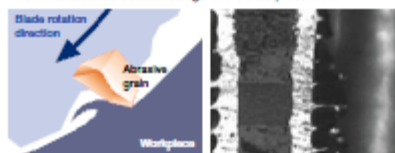


Fig. 10: Ductile mode

Photo 5: Processing example of ductile mode

**Additional remarks: When Self-sharpening is not Conducted Properly**

When the self-sharpening is not conducted properly, "loading" or "glazing" is noticed frequently. It has a negative impact on the processing results or blade life.

**Loading:**

A condition where some material being cut covers the surface of the abrasive grit and fills the chip pockets.

**Cause:**

A ductile material such as metal cutting dust (e.g., Al, Cu and Ag) or adhesive such as a tape is covers the dicing blade.

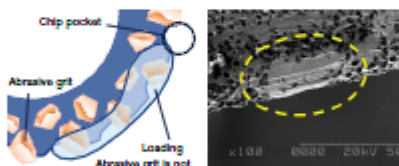


Fig. 10: Loading

Photo 6: Loading

**Glazing:**

A condition where the abrasive grit is not released by the bond or are not fractured, thereby eliminating the cutting edge.

**Cause:**

The holding ability of the bond is too high and the toughness of the abrasive grit is too high.

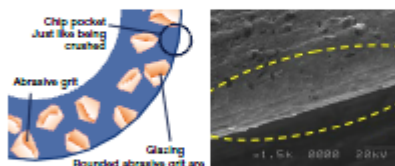


Fig. 11: Glazing

Photo 7: Glazing

 Diamond Marketing Group  
Sales Engineering Department PS Company  
DISCO CORPORATION  
www.disco.co.jp

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2006/ No. 18  
**DISCO CORPORATION**  
 Diamond Marketing Section  
 Sales Engineering Department PSI Company

kinu  
 keasuru  
 migeaku

## Influence of Grit Size on Processing Quality

We are introducing the basic blade information in several issues so that you can select a blade to achieve optimal performance. In this issue the influence of grit size on processing quality will be explained.

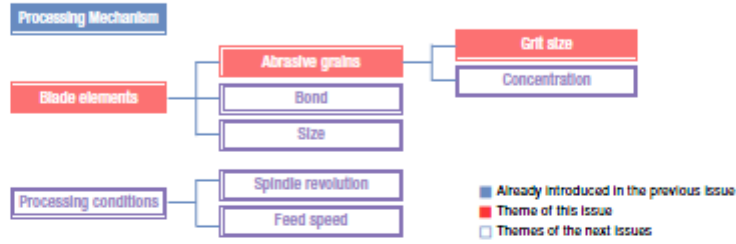


Fig. 1: Blade Basic Factors

### 01: What are abrasive grains?

The blade mainly consists of "abrasive grains" and "bond". Abrasive grains are the cutting edge which actually processes the workpieces and, therefore, have substantial impact on the processing result.

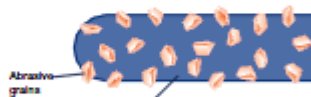


Fig. 2: Blade Configuration

There are mainly two types of abrasive grains: super abrasive grains and general abrasive grains. Diamonds are primary used for the precision cutting blades handled by DISCO.

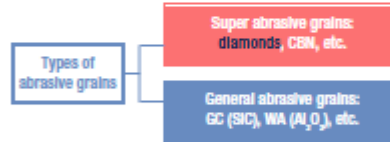


Fig. 3: Types of Abrasive Grains

### 02: What is grit size?

"Grit size" is the size of an abrasive grain. Generally, it is described with the # (mesh) symbol and a number. The larger the number, the smaller the abrasive grain.

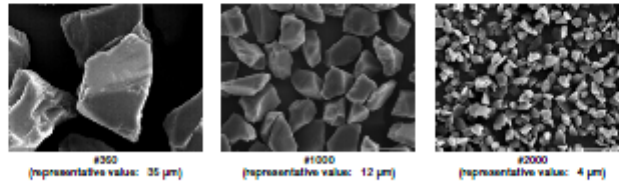


Photo 1: Size of Abrasive Grains

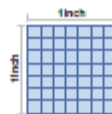


Fig. 4: Mesh

#### Supplemental remarks: What is the origin of using # (mesh)?

The classification of abrasive grains is based on whether they can pass through certain meshes (holes) or not, so "# (mesh)" is used to show their sizes. For example, "#230 / #270" means that the abrasive grains cannot pass through 270 (vertical)x 270 (horizontal) meshes in 1 square inch but can pass through 230 (vertical) x 230 (horizontal) meshes in 1 square inch. There are various procedures available for the classification (separation) of abrasive grains. As an example of classification of very fine abrasive grains, the details of "water elutriation" were explained in *The Cutting Edge* No. 1.

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2007/ No. 19  
**DISCO CORPORATION**  
 Diamond Marketing Section  
 Sales Engineering Department PS Company

kiu  
 keazuru  
 migaku

## Influence of Concentration on Processing Quality

We are introducing basic blade information in several issues so that you can pick a blade which sufficiently demonstrates its optimal performance. This time, the "influence of concentration on processing quality" will be explained.

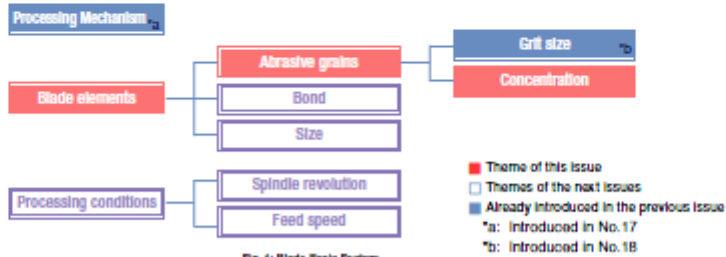


Fig. 1: Blade Basic Factors

### 01: What is concentration?

The blade mainly consists of "abrasive grains" and "bond." The unit showing the "amount of abrasive grains" contained in the blade is called "concentration." A difference of concentration greatly influences the processing results.

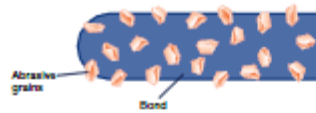


Fig. 2: Blade Configuration

**Concentration:**  
 Unit showing how much abrasive grains are contained in the blade.

### 02: Definition of concentration

A larger concentration value indicates a higher content of abrasive grains in the blade.

Concentration 100 = Abrasive grain content in the blade is 25% by volume.

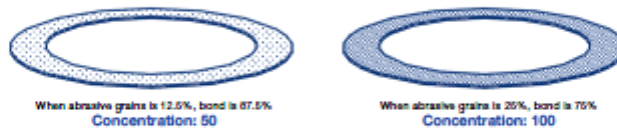


Fig. 3: Definition of Concentration

In the images below the surface condition of the blade edge with different concentrations are shown. Abrasive grains are white in these images.

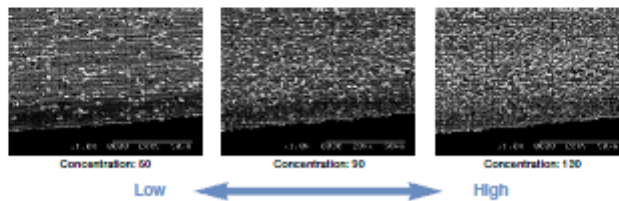


Photo 1: Different Concentrations

# THE CUTTING EDGE

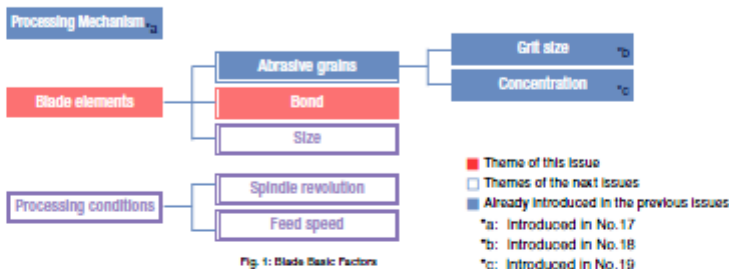
Technical Newsletter

2007/ No. 20  
**DISCO CORPORATION**  
 Diamond Marketing Section  
 Sales Engineering Department FS Company

kiu  
 keizuru  
 migaku

## Influence of the Bond on Processing Quality

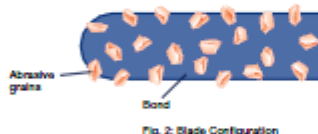
We are introducing basic blade information in several issues so that you can pick a blade which sufficiently demonstrates its optimal performance. This time, the "influence of the bond on processing quality" will be explained.



### 01: What is the Bond?

The blade mainly consists of "abrasive grains" and "bond." Bond has the role of holding the abrasive grains, which are the cutting edge for processing. A difference of bond type greatly influences the processing results.

Diamond abrasive grains are not adhered to other substances chemically. The bond just mechanically holds the abrasive grains. Therefore, the strength of the bond influences the retaining strength (retaining ability). Normally, the retaining ability of resin is the weakest, and the strength then becomes stronger in the order of vitrified bond, metal bond, and electroplated.



### 02: Types of Bond

There are mainly four types of bond: resin, metal, vitrified, and electroplated (electroformed).

Type	Material	Characteristics	Applications
Resin	Resin	Sintered type which uses thermosetting resin for the bond. It is elastic and has high grinding ability, but wears the most.	Glass, crystal, quartz, lithium tantalate, various semiconductor packages, ceramics, etc.
Metal	Metal (sintered)	Sintered type which uses metal powder for the bond. It has high ability to hold abrasive grains and wear resistance.	Electronic components, optical parts, various semiconductor packages, ceramics, single-crystal ferrite, glass, etc.
Vitrified	Vitrified	Sintered grinding wheel made from porcelain powder (hyaline). It has less elastic deformation and is suitable for processing under high load.	Dicing of hard brittle materials such as glass and crystal under high load.
Electroplated (Electroformed)	Metal (impregnated)	Mainly nickel is used. Made by electrolysis or electrodeless impregnation. Since it wears less and has strength, it is possible to make it thinned.	Silicon wafers, compound semiconductor wafers (e.g., GaAs, GaP), oxidized wafers (e.g., LiTaO <sub>3</sub> ) and chip LED boards, new ceramics, hard brittle materials, etc.

Fig. 3: Types of Bond

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2007/ No. 21  
**DISCO CORPORATION**  
 Diamond Marketing Team  
 Sales Engineering Department PS Company

kyu  
 kazuru  
 migaku

## Influence of Blade Size on Processing Quality

We are introducing basic blade information in several issues so that you can pick a blade which sufficiently demonstrates its optimal performance. This time, the "influence of blade size on processing quality" will be explained.

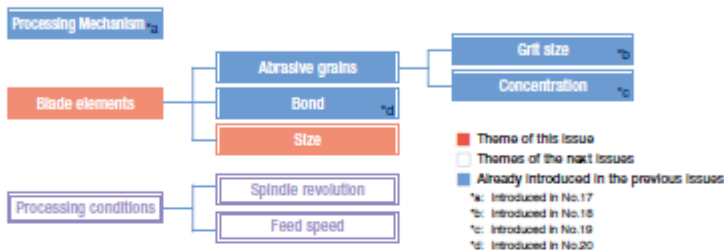


Fig. 1: Blade Basic Factors

### 01: Blade Size

Among the elements of blade size, thickness and blade exposure have a significant influence on processing quality. We will examine these two elements and explain them in more detail.

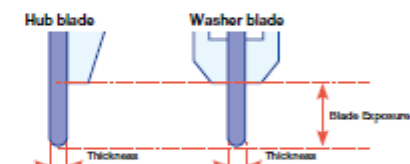


Fig. 2: Main Elements of Blade Size

### 02: Blade Thickness

Fig. 3 shows images of two blades with different thickness. Two things occur when blade thickness is increased: 1) the bottom of the blade will have a larger radius or rounded portion and 2) the load applied to the work piece during processing increases (refer to Fig. 5). These two factors tend to increase backside chipping and Fig. 4 shows that backside chipping will increase with blade thickness increases. (For more detail on backside chipping please refer to The Cutting Edge No. 5, 6, 7 and 8.)  
 Moving in the other direction, when blade thickness is decreased too much, wavy cuts may be observed or the probability of blade breakage becomes high. The reader should take note it is important to select adequate blade exposure and thickness to avoid these occurrences.

Note 1: For wavy cut, refer to The Cutting Edge No. 13.  
 Note 2: For blade breakage, refer to The Cutting Edge No. 14 and No. 15.



Fig. 3: Difference of Roundness between Thick and Thin Blades

#### 1 Backside chipping may increase with an increase in Blade Thickness

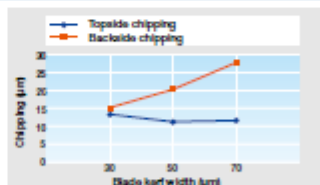


Fig. 4: Chipping Condition depending on Blade Thickness

#### 2 Processing load will also increase with and increase to Blade Thickness

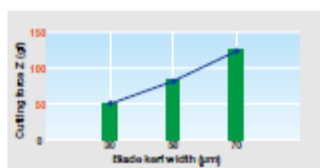


Fig. 5: Processing Load depending on Blade Thickness

Correction: The numerical value for the Y-axis in Figure 5 was wrong and has been corrected.

Influence of Blade Size on Processing Quality

03: Relationship between Blade Thickness and Exposure (Wavy Cut / Breakage)

A common trend in the industry today is to reduce street width in order to increase the number of die per wafer. To support street width reduction, a corresponding change to blade thickness may be necessary. Also, many customers will try to increase blade exposure to increase the blade life.

When blade exposure is increased too much in relation to thickness a wavy cut or blade breakage may occur due to insufficient strength of the blade. Fig. 6 graphically shows blade thickness decreasing while blade exposure increases. Below that a diagram of wavy cuts is shown as a likely result of these changes.

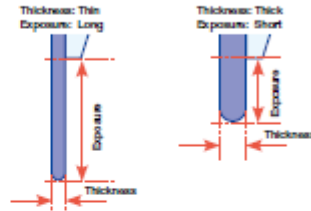


Fig. 6: Blade Images

DECREASING Blade Thickness INCREASES probability of Wavy Cut and Blade Breakage.



Fig. 8: Relationship between Blade Thickness and Wavy Cut / Breakage

INCREASING exposure INCREASES probability of Wavy Cut and Blade Breakage.



Fig. 9: Relationship between Blade Exposure and Wavy Cut / Breakage



Photo 1: Kerf of normal cut and wavy cut

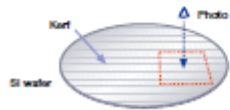


Fig. 7: Schematic view of the photographed area

Wavy Cut caused by Blade Thickness and Exposure

So far, the relationship between wavy cut / blade breakage and blade size (exposure and thickness) has been explained. Another important factor that may cause wavy cut and blade breakage is the surface speed of the blade.

Fig. 10 is a graph showing the relationship between the spindle rotation speed when the wavy cut is observed and the aspect ratio (value obtained by dividing exposure by kerf width) of the blade size. It shows that the larger the aspect ratio, the easier to cause wavy cut even when the spindle rotation speed is low

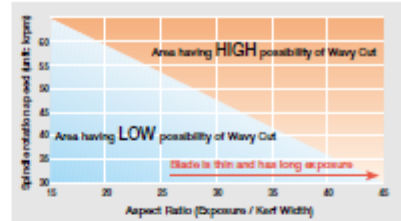


Fig. 10: Relationship between Aspect Ratio and Spindle Rotation Speed in Wavy Cut

Note 4:

Fig. 10 is one of the indicators when determining the usable rotation speed range in the relationship between the blade size and spindle rotation speed. This tendency may be changed depending on material and thickness of workpieces and blade bond type.

Reference: Rough standard of blade exposure

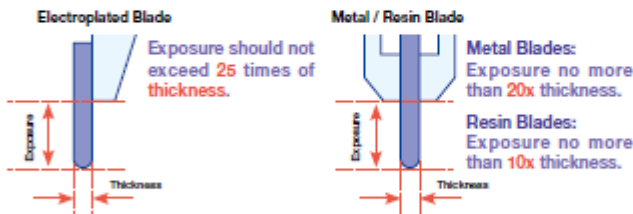


Fig. 11: Rough Standard of Blade Exposure

Note 5:  
The above numbers are rough standards. They will greatly differ depending on the blade exposure, cut depth, workpieces to be processed, and processing conditions. When the new parameters need to be determined, be sure to consult DISCO.

DISCO  
Diamond Marketing Team  
Sales Engineering Department PS Company  
DISCO CORPORATION  
www.disco.co.jp

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2008 / No. 23  
**DISCO CORPORATION**  
 Diamond Marketing Team  
 Sales Engineering Department PSI Company

kinu  
 kazuru  
 mizoku

## Influence of Processing Conditions on Processing Quality 2

It is important not only to select a blade suitable to the work piece, but also to optimize processing conditions so that you achieve peak performance in your cutting application. In previous issues we discussed basic blade information. This issue will explain the influence of feed speed on processing quality.

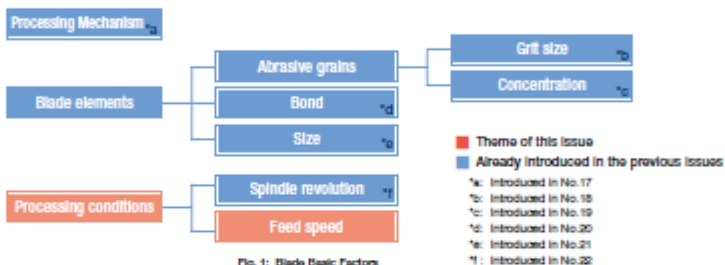


Fig. 1: Blade Basic Factors

### 01: Feed Speed

Precision cutting tools, such as dicing saw, employ a chuck table to secure the work piece. The chuck table moves the work piece, typically at feed speeds from 1 mm/sec to 300 mm/sec, underneath a cutting wheel rotating at a very high rotational speed.

Of course the faster the feed speed, the higher the throughput of the process. However, when the feed speed is increased too much, the load on the blade can negatively impact the processing quality.

Therefore, optimizing feed speed to achieve the highest process throughput while maintaining acceptable process results is very important.

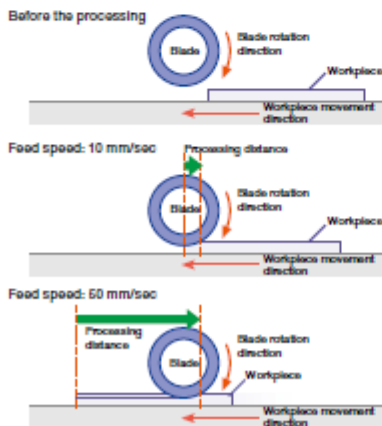


Fig. 2: Influence on Processing Quality

### 02: Influence on Processing Quality

At higher feed speeds the work load per abrasive grain (work piece cut amount) is also increased as shown in Fig. 3 below. Because of this increased processing load, the work piece experiences a greater impact that leads to an increase in work piece chipping. An increase in processing load also leads to an increase wearing of the blade.

When increasing the feed speed only the workload (processing load) per abrasive grain becomes greater.

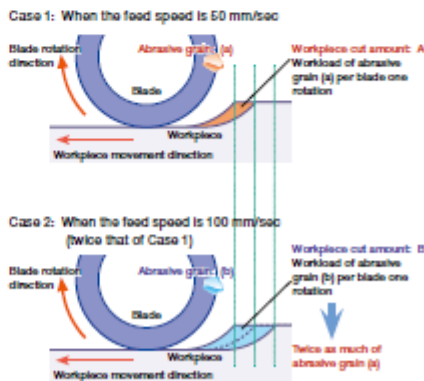


Fig. 3: Difference of Processing Load by Different Feed Speeds (Conceptual Drawings)

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2009/ No. 28  
**DISCO CORPORATION**  
 Diamond Marketing Team  
 Sales Engineering Department PS Company

idru  
 keazuru  
 mgaku

## Influence of Cutting Water in Dicing

In the dicing process, attention must be paid to the cutting water supply at the processing point in order to maximize the performance of the blade. In this issue, the influence of cutting water on the blade and processing quality will be explained using several examples.

### What is cutting water?

Cutting water is an important consideration in the field of precision processing with diamond blades. The two main purposes for using cutting water are to provide cooling at the process point and to remove cutting debris from the process point. The effect of blade cooling is explained below.

#### 01 Cooling effect

Precision cutting tools, such as a dicing saw, have a blade mounted to a spindle that rotates the blade typically from 10,000 to 60,000 revolutions per minute (RPM). Due to the friction between the blade and work piece, the processing point becomes extremely hot and requires cooling to obtain optimal results. Insufficient cooling at the process point causes deterioration of the blade's abrasive grains (diamonds)<sup>\*\*\*</sup> as well as degradation of work piece quality. Therefore, cutting water plays a vital role preventing an increase in temperature at the processing point to maintain blade performance and work piece quality.

**Note:**  
 Diamonds are used as the abrasive grains of a dicing blade. The diamonds may show deterioration of performance due to several factors, such as oxidation.

#### 02 Supply of cutting water in the dicing saw

Fig. 1 is an illustration of a typical dicing saw wheel cover showing the location of the cooling water nozzles. DISCO offers several different types of nozzle configurations to optimize cutting performance.

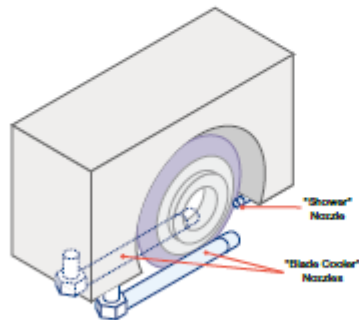


Fig. 1: Cooling Water Nozzles

### Abnormal blade wear due to insufficient cutting water

When the supply of cutting water is inadequate an increase in blade wear may be observed. In Fig. 2 the experimental conditions for comparing blade wear with proper water supply to an inadequate water supply is shown. The blade wear for each condition is shown at the right side in a graph. The experimental result shows a substantial increase in blade wear when an insufficient water supply is used.

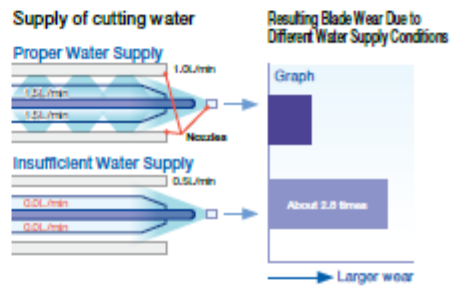


Fig. 2: Conditions caused by Different Flow Rates of Cutting Water

If a large increase in blade wear occurs a variation in cut depth within the work piece may result. Fig. 3 shows an extreme case of cut depth variation due to an unexpected increase in blade wear resulting from insufficient water supply.

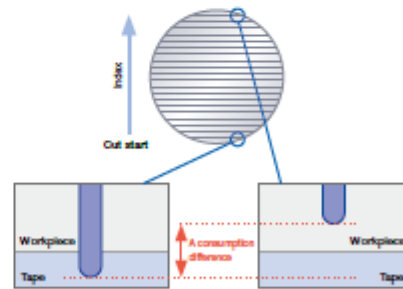
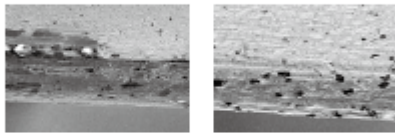


Fig. 3: Difference of Cut Depth when Supply of Cutting Water is Different

**Influence of Cutting Water In Dicing**

**Influence of insufficient cutting water on the blade or workpiece**

In the extreme case, insufficient cutting water can lead to breakage of the blade or work piece. Photo 1 shows the result of having an extremely low cutting water flow rate. In this test the work piece was burned and damaged due to excessive heat because the water flow was very low. The blade was also broken on this cut line.



When supply of cutting water is low      When supply of cutting water is adequate

Processing parameters  
 Blade: #400 metal blade  
 Workpiece: glass  
 Rotation speed: 20,000 r/min  
 Feed speed: 5 mm/sec

Photo. 1: Workpiece Processed with Extremely Low Amount of Cutting Water

A less noticeable result of insufficient water flow is damage to the dicing blade. Photo 2 shows a comparison of blade tip conditions for proper water flow rates and insufficient flow rates. The damage to the dicing blade can be clearly seen when comparing these images. This damage or "uneven wear" of the dicing blade can degrade process quality.

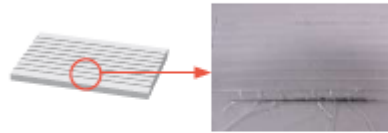
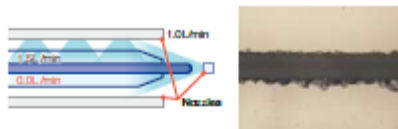


Photo. 2: Conditions of Blade Tip after Processing due to Different Supply Amount of the Cutting Water

**01 Quality degradation due to uneven supply of cutting water**

Not only is it necessary to supply cutting water in sufficient quantity but cutting water must also be delivered using a proper method. Fig. 4 shows an experiment and processing result when the supply of cutting water from one of the shower nozzles was turned off. The side of the cut with no cutting water supplied has obviously larger chipping.



Processing parameters  
 Blade: #360 resin blade  
 Workpiece: glass  
 Rotation speed: 20,000 r/min  
 Feed speed: 5 mm/sec

Fig. 4: Workpiece Upper Surface Conditions caused by Different Supply of the Cutting Water

Furthermore, when the supply of cutting water is inadequate on one side of the blade (as shown in Fig. 5) for an extended period of time, the blade may wear unevenly or bend as a result. Fig. 5 shows the resulting cut due to uneven blade wear and blade bending.



Fig. 5: Blade Conditions caused by Different Supply of the Cutting Water

**Important Point To Note**

What we explained so far is the general conditions of cutting water supply. There is a case where the flow rate of the cutting water is set as low or the nozzle shape or position is modified depending on the application. The above explanations address the general conditions of cutting water supply. Depending on the application lower flow rates or special nozzles may be used to achieve desired results. For example, in the case of very deep and narrow grooving, cutting water flow rate is adjusted as low as possible to minimize the blade run out.

 Diamond Marketing Team  
 Sales Engineering Department PS Company  
 DISCO CORPORATION  
 www.disco.co.jp

# THE CUTTING EDGE

Technical Newsletter

2009 / No. 30  
 DISCO CORPORATION  
 Diamond Marketing Group  
 Sales Engineering Division

kinu  
 kazuru  
 myaku

## TEG Wafer Processing 1/2

There are cases where TEG (test element group) may be formed on the street (area to be processed) of a silicon wafer. TEG is usually formed with viscous materials, such as metals, which may adversely impact the dicing blade and work piece. This issue and the next issue of *The Cutting Edge* cover the major influences of TEG processing and its tendencies. TEG burring is explained in this issue.



Fig. 1: Problems caused by the TEG Processing Factors

TEG is an element for evaluation to discover design and manufacturing defects on device patterns. As shown in Fig. 2, TEG is frequently arranged on the dicing line (street), so it may effect dicing quality.

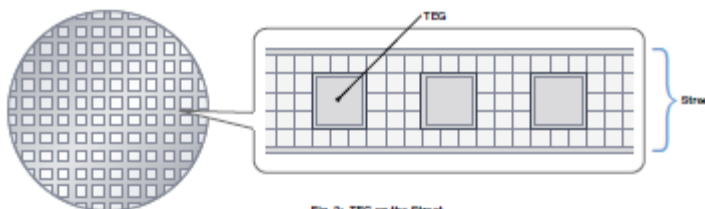


Fig. 2: TEG on the Street

### 1. TEG burring

Viscous materials, such as metals, are ductile and processing of such materials creates burring like whiskers. Such whiskers may cause problems, such as short circuits, at the time of die attachment.

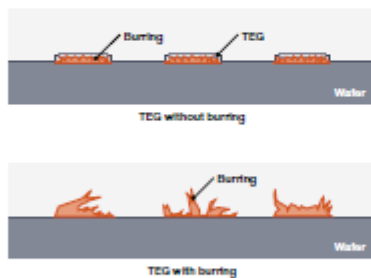


Fig. 3: Cross-sectional Images

### 2. Mechanism causing TEG burring

The ductile mode is used to process TEG since TEG is made of viscous materials, such as resins and metals. In this mode, abrasive grains scrape a workpiece while deforming it. Due to the characteristics of this process, small protrusions, such as burring called whiskers, are generated near the edge of the processed area.

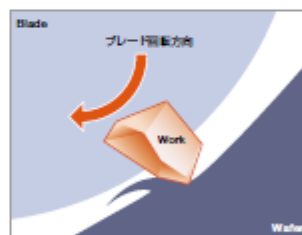


Fig. 4: Ductile Mode

### 3. Tendencies of TEG burring

#### 01 Tendency due to blade thickness

Changing the blade thickness varies the amount of TEG to be processed and changes the size of the burring. Making the blade thinner reduces the processing amount of the TEG and TEG burring tends to be smaller. On the other hand, by making the blade thicker than the TEG size, it is possible to completely eliminate TEG (see Figs. 7 and 8).

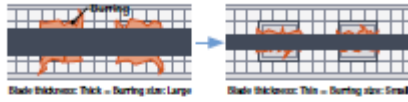


Fig. 6: Difference of Burring Size due to Different Blade Thickness



Fig. 7: Example where TEG is Removed Completely



Fig. 8: Relationship between Blade Thickness and Burring Size



Fig. 9: Relationship between Blade Thickness and TEG Condition

#### 02 Tendency due to abrasive grain size

Burring size can be reduced by making the abrasive grain smaller which reduces the processing amount per grain.

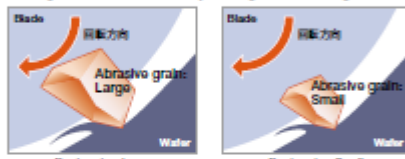


Fig. 10: Difference of Burring Size due to Different Abrasive Grain Size



Fig. 11: Relationship between Abrasive Grain Size and Burring Size

#### 03 Tendency due to spindle rotation speed

Burring amount can be reduced by increasing the spindle rotation speed which also reduces the amount processed per grain. Note: Increasing the rotation speed may cause blade loading and an inferior cutting result.

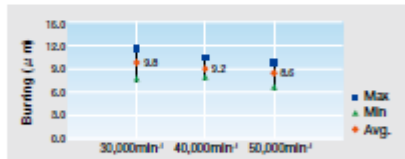


Fig. 12: Burring Size for Each Rotation Speed



Fig. 13: Relationship between Spindle Rotation Speed and Burring Size

Processing parameters  
Blade: ZH05-SD3500  
Feed speed: 50 mm/sec

#### 04 Tendency due to blade concentration

Burring size can be reduced by lowering the concentration and thereby promoting the self-sharpening of the blade which maintains its cutting ability.

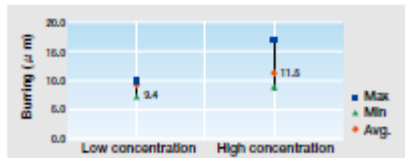


Fig. 14: Burring Size for Each Concentration



Fig. 15: Relationship between Blade Concentration and Burring Size

Processing parameters  
Blade: ZH05-SD3000  
Rotation speed: 30,000 min<sup>-1</sup>  
Feed speed: 60 mm/sec



## ***ANEXO II***

'Data sheet' das lâminas



Electroformed Bond Hub Blades

# ZH05SERIES

## Advanced Hub blade for Improved process Stability and Consistency

The high-precision grit concentration control of the ZH05 Series allows for extremely stable and consistent process results.

Newly developed grit concentration control technology has made possible five distinct levels of grit concentration. This wider range of choices offers improved balance between blade life and process quality (in particular, backside chipping).

- 5 grit concentration levels support diverse applications.
- The ZH05 Series offers shorter precut times and lower chance of blade breakage due to flying die.



### ■ Concentration range



During dicing, concentration affects both the speed of blade wear and the size of chipping. By selecting precisely a concentration\* that is appropriate to the application, both wear speed and process quality can be made more stable and consistent.

\*Concentration refers to the percentage of diamond grit in the abrasive portion of the blade. For example, a concentration level of 100 indicates 25 % diamond grit by volume.

### Applications

Silicon and compound semiconductor (GaAs, GaP, etc.).

# Electroformed Bond Hub Blades ZH05 SERIES

**Specification**

Concentration  
 50  
 70  
 90  
Bond  
 N1  
 110  
Special specification

ZH05 - SD 2000 - N1 - 110 - A\*\*\*\* DD × 60 E

Grit type	Grit size	Exposure	Kerf width <sup>(*)</sup>	Angle	Blade shape
SD	1500 #1500	A 0.38 - 0.51	A 0.015 - 0.020	θ	E
	1700 #1700	B 0.51 - 0.64	B 0.020 - 0.025		N
	1800 #1800	C 0.64 - 0.76	C 0.025 - 0.030	θ	
	2000 #2000	D 0.76 - 0.89	D 0.030 - 0.035		Special specification
	2500 #2500	E 0.89 - 1.02	E 0.035 - 0.040	θ	
	3000 #3000	F 1.02 - 1.15	F 0.040 - 0.050		Special specification
	3500 #3500	G 1.15 - 1.28	G 0.050 - 0.060	θ	
	4000 #4000	H 1.28 - 1.41	H 0.060 - 0.070		Special specification
	4500 #4500	I 1.41 - 1.54	I 0.070 - 0.080	θ	
	4800 #4800	J 1.54 - 1.67	J 0.080 - 0.090		Special specification
5000 #5000	K 1.67 - 1.80	K 0.090 - 0.100	θ		

\*1 Maximum kerf width of 0.2 mm are available.

**Experimental Data**

By increasing the concentration options for ZH05, it is possible to precisely respond to customer needs. It also has the potential to shorten the precut time.

Blade wear (µm<sup>2</sup>/1000line) and Backside chipping (µbar-3s, µm)

Backside chipping (µbar-3s, µm)

Workpiece : Si + Oxide layer ø6<sup>\*</sup>  
 Depth : 400 µm (full cut)  
 Feed speed : 60 m/s  
 Spindle revolution : 30,000 min<sup>-1</sup>

**When ordering**  
 Please contact a DISCO representative with your product needs such as type, wheel size, and quantity.  
 When you place the first order with us, please explain application information such as materials to grind, sizes, machine, type, and other specification.  
 We are ready to help you to determine which is our most appropriate product type for your application.  
 Due to improvements in our products, it is possible that product specifications may be changed without advanced notice.  
 Please confirm the product specifications with a DISCO representative.

**To use these DISCO blades and wheels (hereafter precision tooling) safely... Please read carefully and follow the instructions below to prevent any accidents or injuries.**

- USE a safety cover (nozzle case, cover), equipped as a standard accessory, to avoid injury.
- DO NOT EXCEED the specified rpm limit indicated on the precision tooling.
- FOLLOW the instruction manual of the equipment to mount the precision tooling properly.
- DO NOT DROP OR HIT the precision tooling. This may cause breakage or injury.
- Always CHECK the precision tooling for chipping or any other damage before starting to use it. DO NOT USE the tooling if there is any damage.
- READ the operation manual of the cutting/grinding equipment before use.
- DO NOT USE the precision tooling with modified or customized equipment.
- DO NOT USE precision tooling that has a different size from the one recommended for your equipment.
- DO NOT USE the precision tooling for any other purpose than grinding, cutting, or polishing.
- Always USE water or coolant to prevent precision tooling damage.

**DISCO** **DISCO CORPORATION**  
 13-11 Omori-Kita 2-chome, Ota-ku, Tokyo 143-8580 Japan  
 Global Sales Department  
 Phone: 81-3-4590-1100 Fax: 81-3-4590-1075 · www.disco.co.jp

2012.12



## ***ANEXO III***

‘Data sheet’ das propriedades dos materiais constituintes das lâminas e wafers

**Aluminum, Al**Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [Pure Element](#)

**Material Notes:** Aluminum is a silver-colored, low density (2.7 g/cc) metal that finds use in a huge variety of commercial applications. Unalloyed aluminum is ductile, exhibits moderate strength, and is very resistant to corrosion under most circumstances. Aluminum can be dramatically strengthened by the addition of appropriate alloying elements (Cu, Mg, Mn, Si, etc.) and subsequent heat/work treatments. Aluminum is commonly used in both wrought and cast forms.

The low density of aluminum results in its extensive use in the aerospace industry, and in other transportation fields. Its resistance to corrosion leads to its use in food and chemical handling (cookware, pressure vessels, etc.) and to architectural uses.

Over 1400 Aluminum alloy entries are listed in MatWeb, each with specific property data. Aluminum 1199 is the highest purity (99.99% Al min.) commercially available in structural form.

**Vendors:** [Click here](#) to view all available suppliers for this material.


Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.6989 g/cc	0.097504 lb/in <sup>3</sup>	

Chemical Properties	Metric	English	Comments
Atomic Number	13	13	
Thermal Neutron Cross Section	0.215 barns/atom	0.215 barns/atom	
X-ray Absorption Edge	7.9511 Å	7.9511 Å	K
	142.48 Å	142.48 Å	L <sub>I</sub>
	172.16 Å	172.16 Å	L <sub>II</sub>
	172.16 Å	172.16 Å	L <sub>III</sub>
Electrode Potential	-1.69 V	-1.69 V	
Electronegativity	1.61	1.61	Pauling
Ionic Radius	0.510 Å	0.510 Å	Crystal Ionic Radius for Valence +3
Electrochemical Equivalent	0.3354 g/Ah	0.3354 g/Ah	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Vickers	15	15	Annealed
Modulus of Elasticity	68.0 GPa	9860 ksi	
Poissons Ratio	0.36	0.36	calculated
Shear Modulus	25.0 GPa	3630 ksi	

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000270 ohm-cm	0.0000270 ohm-cm	
Magnetic Susceptibility	6.0e-7	6.0e-7	cg/g
Critical Magnetic Field Strength, Onset	101.9 - 107.9	101.9 - 107.9	
Critical Superconducting Temperature	1.73 - 1.77 K	1.73 - 1.77 K	

Thermal Properties	Metric	English	Comments
Heat of Fusion	386.9 J/g	166.4 BTU/lb	
Heat of Vaporization	5462 J/g	4071 BTU/lb	
CTE, linear 	24.0 µm/m-°C	13.3 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 100 °C	@Temperature 68.0 - 212 °F	
	25.5 µm/m-°C	14.2 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F	
	27.4 µm/m-°C	15.2 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 - 500 °C	@Temperature 68.0 - 932 °F	
Specific Heat Capacity	0.900 J/g-°C	0.215 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	210 W/m-K	1460 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	
Melting Point	660.37 °C	1220.7 °F	

Optical Properties	Metric	English	Comments
Emissivity (0-1)	0.050	0.050	polished 50-500°C
	0.20 - 0.30	0.20 - 0.30	strongly oxidized
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.90	0.90	tungsten light

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	100 %	100 %	

Descriptive Properties			
CAS Number		7429-90-5	

[References from MatWeb](#)

**Nickel, Ni**Categories: [Metal](#), [Nonferrous Metal](#), [Nickel Alloy](#), [Pure Element](#)

Material Notes: This entry is for pure Ni.

Nickel based alloys are the mainstay of many high performance markets in which corrosion resistance and/or heat resistance is required. Example applications include furnace components, chemical processing vessels, exchangers, and piping, high temperature aerospace components, nuclear reactors, extreme service pumps, turbines, pulp and paper production, and pollution control.

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8.88 g/cc	0.321 lb/in <sup>3</sup>	
Chemical Properties	Metric	English	Comments
Atomic Number	28	28	
Thermal Neutron Cross Section	4.8 barns/atom	4.8 barns/atom	
X-ray Absorption Edge	1.488 Å	1.488 Å	K
	12.267 Å	12.267 Å	L <sub>I</sub>
	14.135 Å	14.135 Å	L <sub>II</sub>
	14.4475 Å	14.4475 Å	L <sub>III</sub>
Electrode Potential	-0.250 V	-0.250 V	
Electronegativity	1.91	1.91	Fauling
Ionic Radius	0.690 Å	0.690 Å	Crystal Ionic Radius for Valence +2
Electrochemical Equivalent	1.0945 g/Ah	1.0945 g/Ah	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	45.0 MPa	6530 psi	Annealed
	317 MPa	46000 psi	Typical
Tensile Strength, Yield	59.0 MPa	8560 psi	Typical
Elongation at Break	30 %	30 %	Annealed
Modulus of Elasticity	207 GPa	30000 ksi	
Poissons Ratio	0.31	0.31	
Shear Modulus	76.0 GPa	11000 ksi	
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000640 ohm-cm	0.0000640 ohm-cm	
Magnetic Permeability	1240	1240	mu(max) with B=1900G
Curie Temperature	358 °C	676 °F	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Heat of Fusion	305.6 J/g	131.6 BTU/lb	
Heat of Vaporization	5062 J/g	2522 BTU/lb	
CTE, linear	13.1 µm/m-°C	7.28 µin/in-°F	
	@Temperature 20.0 °C	@Temperature 68.0 °F	
Specific Heat Capacity	0.460 J/g-°C	0.110 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	60.7 W/m-K	421 BTU-in/hr-°F	
Melting Point	1455 °C	2651 °F	
Optical Properties	Metric	English	Comments
Emissivity (0-1)	0.080	0.080	polished 200-400°C total spectrum
	0.19	0.19	unoxidized at 1000°C
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.413	0.413	300 nm spectral
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Nickel, Ni	100 %	100 %	
Descriptive Properties			
CAS Number		7440-02-0	

**References** for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [Terms of Use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.


**Silicon, Si**

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Other Engineering Material](#); [Semiconductor](#); [Pure Element](#)

Material Notes: Physical Form: Gray Crystals or Brown Amorphous Solid

Vendors: [Click here](#) to view all available suppliers for this material.

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density 	2.3016 g/cc <small>@Temperature 1027 °C</small>	0.083151 lb/in <sup>3</sup> <small>@Temperature 1881 °F</small>	
	2.3077 g/cc <small>@Temperature 927 °C</small>	0.083371 lb/in <sup>3</sup> <small>@Temperature 1524 °F</small>	
	2.3136 g/cc <small>@Temperature 827 °C</small>	0.083584 lb/in <sup>3</sup> <small>@Temperature 1134 °F</small>	
	2.3192 g/cc <small>@Temperature 727 °C</small>	0.083786 lb/in <sup>3</sup> <small>@Temperature 931 °F</small>	
	2.3269 g/cc <small>@Temperature 127 °C</small>	0.084065 lb/in <sup>3</sup> <small>@Temperature 261 °F</small>	
	2.329 g/cc <small>@Temperature 25.0 °C</small>	0.08414 lb/in <sup>3</sup> <small>@Temperature 77.0 °F</small>	
	2.533 g/cc <small>@Temperature 1412 °C</small>	0.09151 lb/in <sup>3</sup> <small>@Temperature 2574 °F</small>	Liquid (10% expansion upon freezing)
Viscosity	0.88 cP <small>@Temperature 1412 °C</small>	0.88 cP <small>@Temperature 2574 °F</small>	Liquid
a Lattice Constant	5.43072 Å	5.43072 Å	
Molecular Weight	28.086 g/mol	28.086 g/mol	
Volume Compressibility, 10 <sup>-10</sup> m <sup>3</sup> /N	0.306	0.306	
Surface Tension	736 dynes/cm <small>@Temperature 1412 °C</small>	736 dynes/cm <small>@Temperature 2574 °F</small>	Liquid
<b>Chemical Properties</b>			
Atomic Mass	28.086	28.086	
Atomic Number	14	14	
Thermal Neutron Cross Section	0.13 barns/atom	0.13 barns/atom	
X-ray Absorption Edge	6.7446 Å	6.7446 Å	K
	105.05 Å	105.05 Å	L <sub>1</sub>
	126.48 Å	126.48 Å	L <sub>2,3</sub>
	126.48 Å	126.48 Å	L <sub>2,3</sub>
Critical Pressure	537 bar	403000 torr	
Critical Density	0.1207 g/cc	0.004361 lb/in <sup>3</sup>	
Critical Molar Volume	232.6 cm <sup>3</sup> /mol	14.19 in <sup>3</sup> /mol	
Electrode Potential	-0.450 V	-0.450 V	
Electronegativity	1.9	1.9	Pauling
Ionic Radius	0.420 Å	0.420 Å	Crystal Ionic Radius for Valence +4
	0.650 Å	0.650 Å	Crystal Ionic Radius for Valence +1
	2.71 Å	2.71 Å	Crystal Ionic Radius for Valence -4
	3.84 Å	3.84 Å	Crystal Ionic Radius for Valence -1
<b>Mechanical Properties</b>			
Knoop Microhardness	11270	11270	N/mm <sup>2</sup> Microhardness
Hardness, Mohs	7.0	7.0	
Modulus of Elasticity	112.4 GPa	16300 ksi	
Compressive Strength	120 MPa	17400 psi	
Bulk Modulus	98.74 GPa	14320 ksi	
Poissons Ratio	0.28	0.28	
Shear Modulus	43.9 GPa	6370 ksi	Calculated
<b>Electrical Properties</b>			
Electrical Resistivity	0.0100 ohm-cm	0.0100 ohm-cm	
Magnetic Susceptibility	-0.00000390	-0.00000390	Atomic (cgs)
Critical Superconducting Temperature	6.70 - 7.10 K <small>@Pressure 12050 - 13000 MPa</small>	6.70 - 7.10 K <small>@Pressure 1.74e+6 - 1.89e+6 psi</small>	
Dielectric Constant	11.8	11.8	
Band Gap	1.107 eV	1.107 eV	
Electron Mobility, cm <sup>2</sup> /V-s	1900	1900	

Hole Mobility, cm <sup>2</sup> /V-s		500	500	
<b>Thermal Properties</b>				
Heat of Fusion	Metric	1800 J/g	English	774 BTU/lb
Heat of Vaporization		10614 J/g		4566.1 BTU/lb
CTE, linear		2.49 µm/m-°C		1.38 µm/in-°F
		<small>ⓈTemperature 25.0 °C</small>		<small>ⓈTemperature 77.0 °F</small>
		3.61 µm/m-°C		2.01 µm/in-°F
		<small>ⓈTemperature 227 °C</small>		<small>ⓈTemperature 441 °F</small>
		4.16 µm/m-°C		2.31 µm/in-°F
	<small>ⓈTemperature 527 °C</small>		<small>ⓈTemperature 981 °F</small>	
	4.44 µm/m-°C		2.47 µm/in-°F	
	<small>ⓈTemperature 1027 °C</small>		<small>ⓈTemperature 1881 °F</small>	
Specific Heat Capacity		0.794 J/g-°C		0.190 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature -213 °C</small>		<small>ⓈTemperature -351 °F</small>
		0.259 J/g-°C		0.0619 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature -173 °C</small>		<small>ⓈTemperature -278 °F</small>
		0.557 J/g-°C		0.133 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature -73.0 °C</small>		<small>ⓈTemperature -89.4 °F</small>
		0.713 J/g-°C		0.170 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature 27.0 °C</small>		<small>ⓈTemperature 80.6 °F</small>
		0.785 J/g-°C		0.188 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature 127 °C</small>		<small>ⓈTemperature 261 °F</small>
		0.832 J/g-°C		0.199 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature 227 °C</small>		<small>ⓈTemperature 441 °F</small>
		0.849 J/g-°C		0.203 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature 227 °C</small>		<small>ⓈTemperature 521 °F</small>
		0.866 J/g-°C		0.207 BTU/lb-°F
		<small>ⓈTemperature 427 °C</small>		<small>ⓈTemperature 801 °F</small>
		0.883 J/g-°C		0.211 BTU/lb-°F
	<small>ⓈTemperature 527 °C</small>		<small>ⓈTemperature 981 °F</small>	
	0.899 J/g-°C		0.215 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 627 °C</small>		<small>ⓈTemperature 1168 °F</small>	
	0.916 J/g-°C		0.219 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 727 °C</small>		<small>ⓈTemperature 1340 °F</small>	
	0.933 J/g-°C		0.223 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 827 °C</small>		<small>ⓈTemperature 1528 °F</small>	
	0.950 J/g-°C		0.227 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 927 °C</small>		<small>ⓈTemperature 1708 °F</small>	
	0.967 J/g-°C		0.231 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 1027 °C</small>		<small>ⓈTemperature 1881 °F</small>	
	0.983 J/g-°C		0.235 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 1127 °C</small>		<small>ⓈTemperature 2061 °F</small>	
	1.00 J/g-°C		0.239 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 1227 °C</small>		<small>ⓈTemperature 2241 °F</small>	
	1.01 J/g-°C		0.241 BTU/lb-°F	
	<small>ⓈTemperature 1412 °C</small>		<small>ⓈTemperature 2574 °F</small>	
Thermal Conductivity		124 W/m-K		861 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F
		<small>ⓈTemperature 1200 °C</small>		<small>ⓈTemperature 2180 °F</small>
		20.9 W/m-K		145 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F
		<small>ⓈTemperature 600 °C</small>		<small>ⓈTemperature 1115 °F</small>
		37.7 W/m-K		261 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F
		<small>ⓈTemperature 400 °C</small>		<small>ⓈTemperature 752 °F</small>
	52.3 W/m-K		362 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	
	<small>ⓈTemperature 400 °C</small>		<small>ⓈTemperature 752 °F</small>	
	66.94 W/m-K		463.8 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	
	<small>ⓈTemperature 1412 °C</small>		<small>ⓈTemperature 2574 °F</small>	
	79.5 W/m-K		551 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	
	<small>ⓈTemperature 200 °C</small>		<small>ⓈTemperature 392 °F</small>	
	105 W/m-K		725 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	
	<small>ⓈTemperature 100 °C</small>		<small>ⓈTemperature 212 °F</small>	
Melting Point		1412 °C		2574 °F
Boiling Point		3265 °C		5909 °F
Heat of Formation		0.000 kJ/mol		0.000 kJ/mol
		450 kJ/mol		450 kJ/mol
Debye Temperature		372 °C		702 °F
<b>Optical Properties</b>				
Refractive Index	Metric	3.49	English	3.49
Reflection Coefficient, Visible (D-1)		0.30 - 0.70		0.30 - 0.70
				varies irregularly with wavelength.
<b>Component Elements Properties</b>				
	Metric		English	

MatWeb, Your Source for Materials Information - WWW.MATWEB.COM /

Page 2 / 3

Silicon, Si		100 %	100 %	
<b>Descriptive Properties</b>				
CAS Number				7440-21-3
Crystal Structure			Cubic	Diamond Structure - Space Group Fd3m
Solubility		Insoluble in H <sub>2</sub> O and Acid. Soluble in Alkaline		

References for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [Terms of Use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

**Diamond, Synthetic**Categories: [Carbon](#); [Diamond](#)

Key Words: Diamonds, Carbon, C

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	3.20 - 3.52 g/cc	0.116 - 0.127 lb/in <sup>3</sup>	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Knoop Microhardness	54 - 84	54 - 84	in GPa
Vickers Microhardness	88 - 108	88 - 108	GPa; Type 1b
	95 - 131	95 - 131	
	108 - 145	108 - 145	GPa; Type 11a
Modulus of Elasticity	800 - 925 GPa	116000 - 134000 ksi	
Compressive Strength	4500 - 5800 MPa	653000 - 841000 psi	
Poissons Ratio	0.20	0.20	
Fracture Toughness	6.00 - 10.7 MPa-m <sup>1/2</sup>	5.46 - 9.74 ksi-in <sup>1/2</sup>	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Thermal Conductivity	2000 W/m-K	13900 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -F	
Descriptive Properties			
Color		Clear	Impurities (i.e. Nitrogen) and irradiation can change color to yellow, green, blue, pink, or brown.
Crystal Structure		Cubic	Diamond - Space Group Fd3m

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [Terms of Use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

### Overview of materials for Phenolic, Novolac, Heat Resistant Grade, Filled

Categories: [Polymer](#); [Thermoset](#); [Phenolic](#); [Phenolic, Novolac, Heat Resistant Grade, Filled](#)

**Material Notes:** This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Phenolic, Novolac, Heat Resistant Grade, Filled". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

**Vendors:** Sumitomo Bakelite and its subsidiaries Durez Corporation and VyncoIt produce this and a wide range of phenolic resins, DAP, silicone, and epoxy molding compounds. Visit [www.sumitomobakelite.com](http://www.sumitomobakelite.com) for more information.

[Click here](#) to view all available suppliers for this material.

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.47 - 1.61 g/cc	0.0531 - 0.0582 lb/in <sup>3</sup>	Average value: 1.52 g/cc Grade Count:12
Apparent Bulk Density	0.600 - 0.740 g/cc	0.0217 - 0.0267 lb/in <sup>3</sup>	Average value: 0.670 g/cc Grade Count:12
Water Absorption	0.200 - 0.300 %	0.200 - 0.300 %	Average value: 0.240 % Grade Count:12
Linear Mold Shrinkage	0.00330 - 0.0120 cm/cm	0.00330 - 0.0120 in/in	Average value: 0.00687 cm/cm Grade Count:12

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell E	79.0 - 87.0	79.0 - 87.0	Average value: 82.0 Grade Count:4
Tensile Strength, Ultimate	41.0 - 60.5 MPa	5950 - 8770 psi	Average value: 50.5 MPa Grade Count:12
Elongation at Break	0.740 - 0.860 %	0.740 - 0.860 %	Average value: 0.813 % Grade Count:4
Modulus of Elasticity	8.80 - 13.1 GPa	1280 - 1900 ksi	Average value: 10.3 GPa Grade Count:6
Flexural Yield Strength	69.0 - 89.8 MPa	10000 - 13000 psi	Average value: 78.9 MPa Grade Count:12
Flexural Modulus	8.16 - 10.4 GPa	1180 - 1510 ksi	Average value: 9.12 GPa Grade Count:10
Compressive Yield Strength	145 - 221 MPa	21000 - 32100 psi	Average value: 195 MPa Grade Count:12
Izod Impact, Notched	0.160 - 0.190 J/cm	0.300 - 0.356 ft-lb/in	Average value: 0.171 J/cm Grade Count:12
Charpy Impact, Notched	0.170 - 0.210 J/cm <sup>2</sup>	0.809 - 0.999 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 0.188 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:4

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1.35e+11 - 2.68e+12 ohm-cm	1.35e+11 - 2.68e+12 ohm-cm	Average value: 9.78e+11 ohm-cm Grade Count:12
Dielectric Constant	4.80 - 14.0	4.80 - 14.0	Average value: 6.62 Grade Count:12
Dielectric Strength	7.40 - 16.7 kV/mm	188 - 424 kV/in	Average value: 12.6 kV/mm Grade Count:12
Dissipation Factor	0.0370 - 0.170	0.0370 - 0.170	Average value: 0.0726 Grade Count:12
Arc Resistance	150 - 180 sec	150 - 180 sec	Average value: 165 sec Grade Count:6
Comparative Tracking Index	175 - 230 V	175 - 230 V	Average value: 193 V Grade Count:12

Thermal Properties	Metric	English	Comments
Maximum Service Temperature, Air	150 - 205 °C	302 - 401 °F	Average value: 185 °C Grade Count:6
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	166 - 204 °C	331 - 399 °F	Average value: 180 °C Grade Count:12
UL RTI, Electrical	150 °C	302 °F	Average value: 150 °C Grade Count:6
UL RTI, Mechanical with Impact	150 °C	302 °F	Average value: 150 °C Grade Count:6
UL RTI, Mechanical without Impact	150 °C	302 °F	Average value: 150 °C Grade Count:6
Flammability, UL94	V-1 - 5VA	V-1 - 5VA	Grade Count:12

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [Terms of Use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this dataset as they were originally entered into MatWeb.



## ***ANEXO IV***

Formulário aplicado pelo software para o cálculo da análise de variância (ANOVA)

## Knowledge improvement Analysis of Variance (ANOVA)



Source	SS	v(df)	V	F	S'	$\rho(\text{rho})$
A	$SS_A = \frac{(A_1 - A_2)^2}{N}$	kA-1	$SS_A/vA$	$V_A/V_e$	$SS_A - V_e$	$S_A' / SS_T$
B	$SS_B = \frac{(B_1 - B_2)^2}{N}$	kB-1	$SS_B/vB$	$V_B/V_e$	$SS_B - V_e$	$S_B' / SS_T$
AxB	$SS_{AxB} = \frac{(A \times B_1 - A \times B_2)^2}{N}$	$vA \times vB$	$SS_{AxB}/vAxB$	$V_{AxB}/V_e$	$SS_{AxB} - V_e$	$S_{AxB}' / SS_T$
e	$SS_e = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_i - \bar{A}_j)^2$	$vT - vA - vB - vAxB$	$SS_e/v_e$		$SS_e - V_e$	$S_e' / SS_T$
<b>Total</b>		<b>N</b>				

$\bar{A}_i$  – Sum of observation under  $A_i$  level  
 $\bar{A}_i$  – Avg of obser under  $A_i$  level  $A_i/n_{A_i}$   
 $T$  – Sum of all observations  
 $\bar{T}$  – Average of all observations  $T/N$

$n_{A_i}$  – Number of observ under  $A_i$  level  
 $SS$  – factor variance (sum of squares)  
 $v$  – Degrees of freedom (df)  
 $V$  – Variance

$kA$  – Nr of levels for factor A  
 $N$  – Nr of total observations  
 $F$  – Factor variance error  
 $S'$  – Factor pure variation  
 $\rho(\text{rho})$  – Factor contribution ratio (%)