

Universidade do Minho

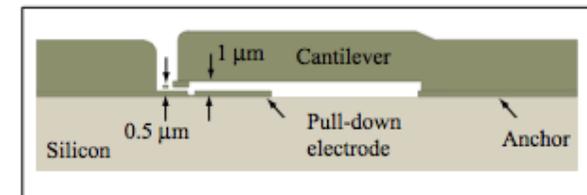
1

# Capítulo 1 - Processos de Microfabricação

## INTRODUÇÃO ÀS MICROTECNOLOGIAS NO SILÍCIO

UNIVERSIDADE DO MINHO  
Departamento de Física

Mestrado em Biofísica e Bionanossistemas  
Física Aplicada em Biodispositivos Baseados em MEMS



**MEMS**

**Joaquim Carneiro**



# SUMÁRIO

2

- Física dos semicondutores
- O silício como material utilizado na indústria dos semicondutores
- Micromaquinagem no silício
  - Técnicas de deposição de filmes finos
  - Fotolitografia
  - Corrosão (micromaquinagem)
  - Aplicação da **Microscopia de Força Atómica (AFM)** no estudo dos processos de adsorção de moléculas biológicas

# Física dos semicondutores

3

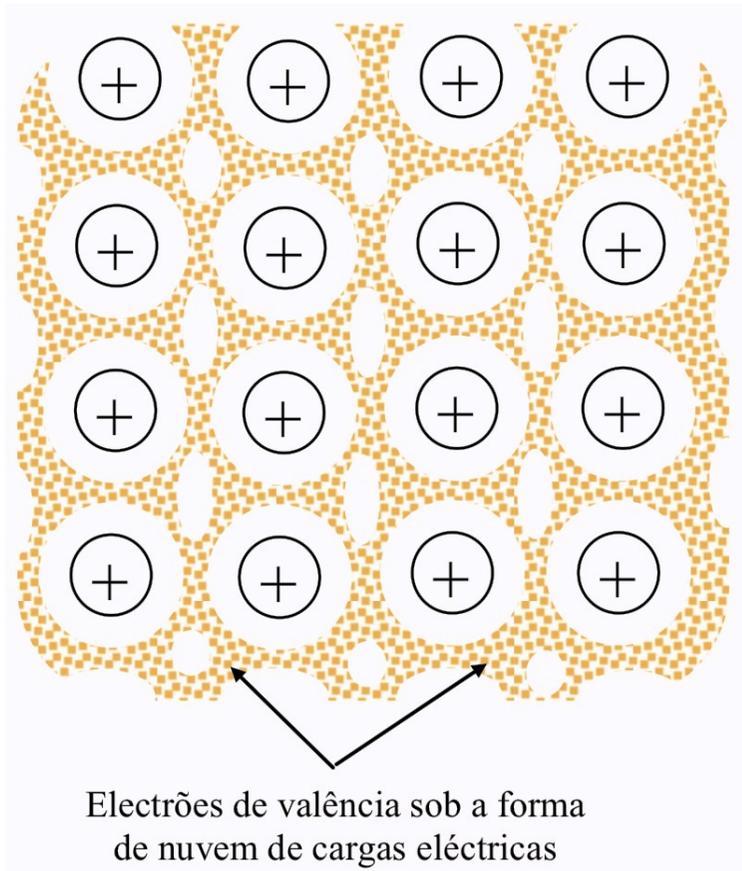
## □ Teoria das bandas de energia

> Nos sólidos metálicos, os átomos encontram-se arrançados numa estrutura cristalina e estão ligados entre si pelos electrões de valência, na designada ligação metálica. Nos metais sólidos, as ligações metálicas permitem o movimento livre dos electrões de valência, já que eles são partilhados por muitos átomos, na medida em que não estão ligados a um átomo específico.

Os electrões de valência podem ser imaginados como formando uma nuvem de carga eléctrica conforme a figura seguinte.

# Física dos semicondutores

4

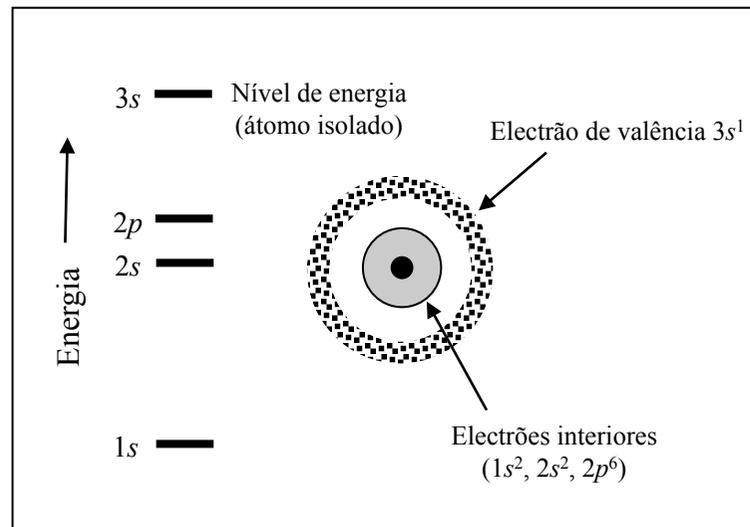


- Arranjo esquemático dos átomos num plano de um metal monovalente, como por exemplo o sódio.

# Física dos semicondutores

5

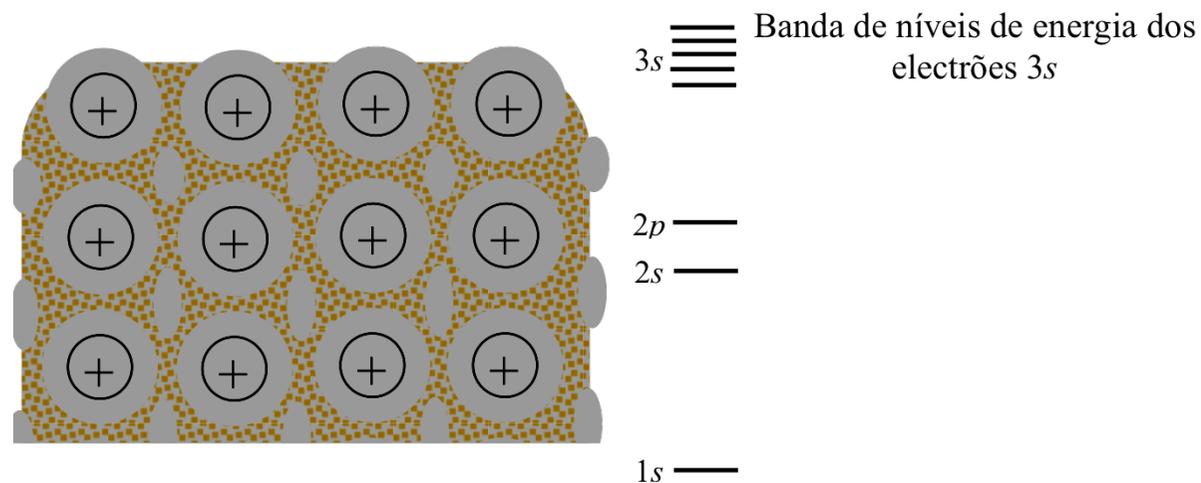
> Nos átomos isolados de um metal sólido, os electrões estão ligados aos núcleos e só podem ocupar níveis de energia **bem definidos** designadamente, os correspondentes às orbitais  $1s$ ,  $2s$ ,  $2p$ , ...preenchidas de acordo com o principio de exclusão de Pauli, isto é, dois por cada nível. Por exemplo, os 11 electrões do átomo neutro de sódio distribuem-se colocando 2 no nível  $1s$ , dois no nível  $2s$ , seis no nível  $2p$  e um no nível  $3s$ , conforme indicado na figura.



# Física dos semicondutores

6

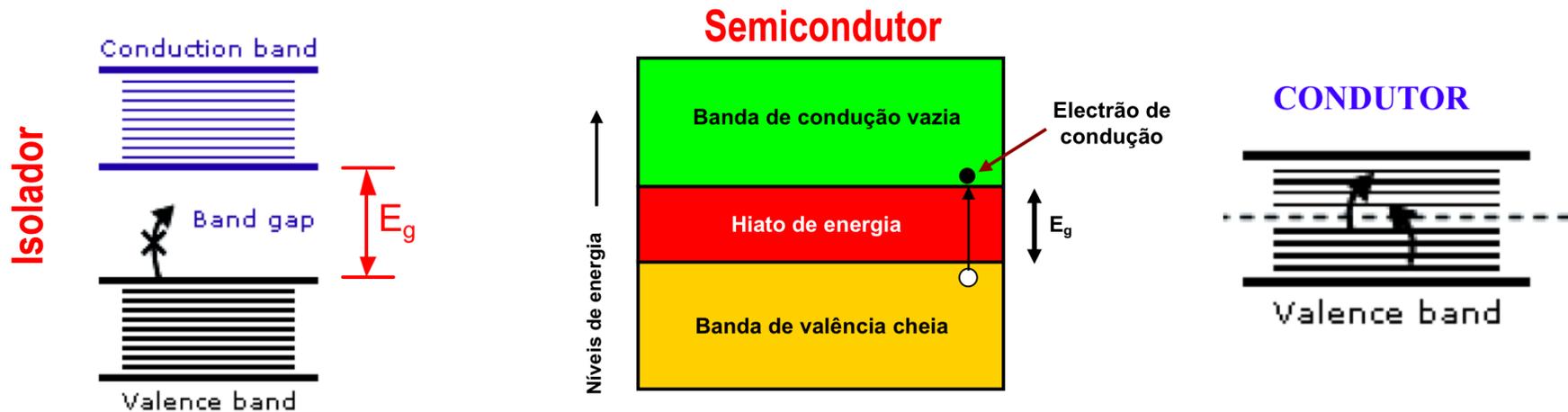
> Os electrões nos níveis mais baixos estão fortemente ligados e constituem os electrões interiores do átomo de sódio. O electrão  $3s^1$  pode participar na ligação com outros átomos e designa-se por **electrão de valência**. Numa amostra sólida de sódio, os átomos estão muito próximos e por isso, tocam-se uns nos outros. Assim, os electrões de valência encontram-se deslocalizados e interactuam.



# Física dos semicondutores

7

> Os materiais em termos de condução da corrente eléctrica, podem ser caracterizados como isolantes, semicondutores, condutores e supercondutores. Conforme ilustrado na figura, um material possui duas bandas de energia: a banda de **valência** e a de **condução**. Existe uma energia associada a cada uma destas duas bandas, designadamente a energia  $E_v$  e  $E_c$  para as bandas de valência e de condução, respectivamente.



# Física dos semicondutores

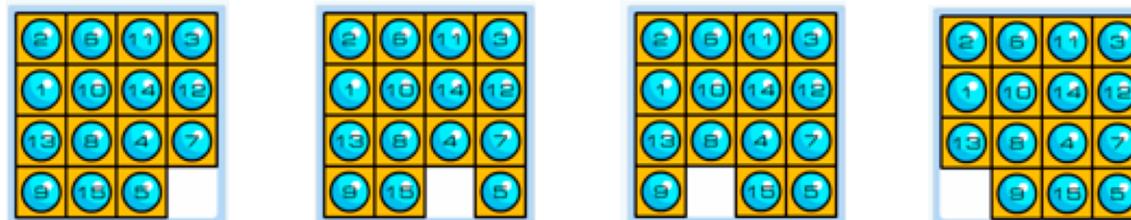
8

> No caso dos materiais **condutores**, não existe uma separação clara entre as bandas de valência e de condução. De facto, estas interceptam-se entre si, explicando desta forma a abundancia de electrões livres ou que facilmente se tornam livres. Nos **isoladores**, os electrões estão fortemente ligados aos átomos em cuja ligação iónica ou covalente intervêm, e não são “**livres**” para que possam conduzir electricidade, a menos que se lhes forneça uma grande quantidade de energia. Assim, o modelo de bandas dos isoladores compreende uma banda de valência inferior totalmente preenchida e uma banda de condução superior vazia. Estas bandas estão separadas por um hiato de energia (**Band Gap**) relativamente grande,  $E_g$ .

# Física dos semicondutores - Semicondutores

9

> Num semicondutor (elementos do grupo IV, como o **silício**), a diferença máxima de 3,3 eV entre as bandas de condução e de valência é suficientemente pequena para que, por acção do aumento da temperatura (**excitação térmica**), os electrões da banda de valência adquiram energia que lhes permitam abandoná-la e desta forma tornarem-se livres. Gera-se assim um **par electrão – lacuna**, formado por um electrão livre na banda de condução e por uma lacuna (ausência de um electrão num átomo) na banda de valência.



Representação esquemática da analogia referente ao movimento de “**lacunas**” (vazios) e “electrões” (**peça de um puzzle**) no silício puro.

# Física dos semicondutores - Semicondutores

10

> Num semicondutor, o fornecimento de energia em quantidade suficiente permite que alguns electrões abandonem a banda de valência e passem para a banda de condução. O movimento de electrões entre átomos sucessivos dá origem a um movimento aparente de lacunas em sentido contrário. O movimento de electrões num sentido e de lacunas em sentido contrário chama-se **corrente intrínseca**. Esta corrente que ocorre espontaneamente devido ao aumento da temperatura não tem qualquer interesse prático. A um semicondutor não dopado (sem adição de impurezas) dá-se o nome de **semicondutor intrínseco**.

# Física dos semicondutores - Semicondutores

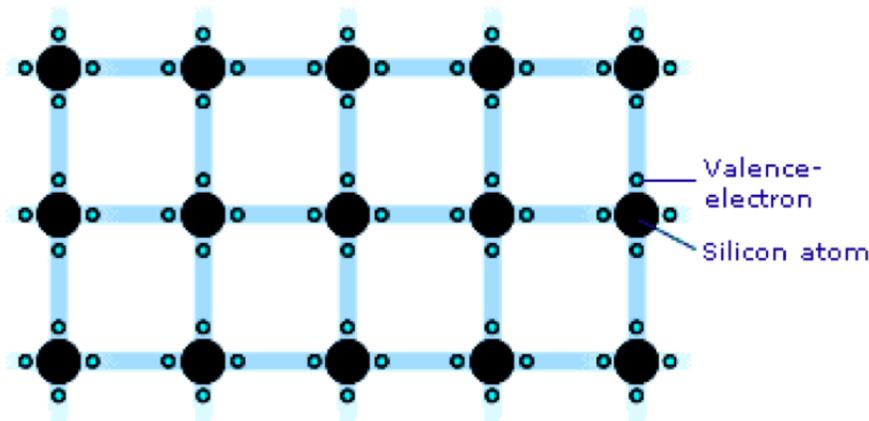
11

- Uma vez que a corrente intrínseca gerada é devida à agitação térmica, os electrões libertados possuem baixa energia, comparativamente com a dos electrões livres num condutor. Esta condição contribui para que o electrão livre se recombine com uma lacuna num outro átomo. Num semiconductor intrínseco, o número de electrões livres,  $n$ , é igual ao número de lacunas,  $p$ .
- Entende-se por **dopagem**, a adição de impurezas no seio de um semiconductor. As impurezas podem ser elementos do grupo V (ou pentavalentes) e elementos do grupo III (trivalentes). **Semicondutores extrínsecos** são materiais semicondutores nos quais os átomos de impurezas dissolvidos têm características de valência diferentes das dos átomos da rede cristalina original.

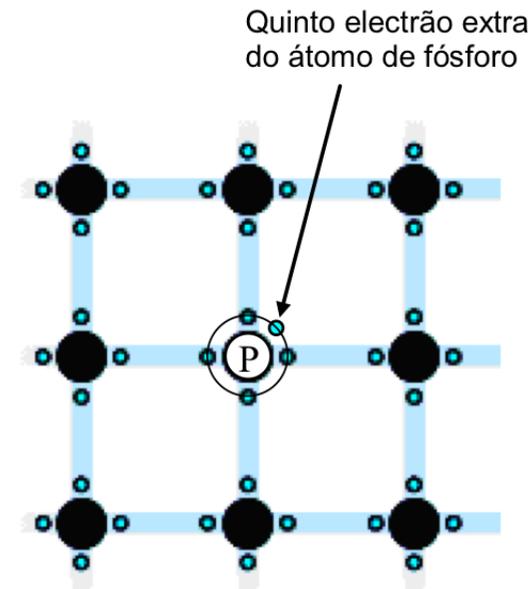
# Física dos semicondutores - Semicondutores

12

- Os elementos do grupo V designam-se por **impurezas dadoras**. Os mais utilizados na indústria dos semicondutores são o **fósforo** (P) e o antimónio (Sb). São apenas necessários quatro electrões para formar uma ligação semelhante à que ocorre no silício.



Rede cristalina do Si

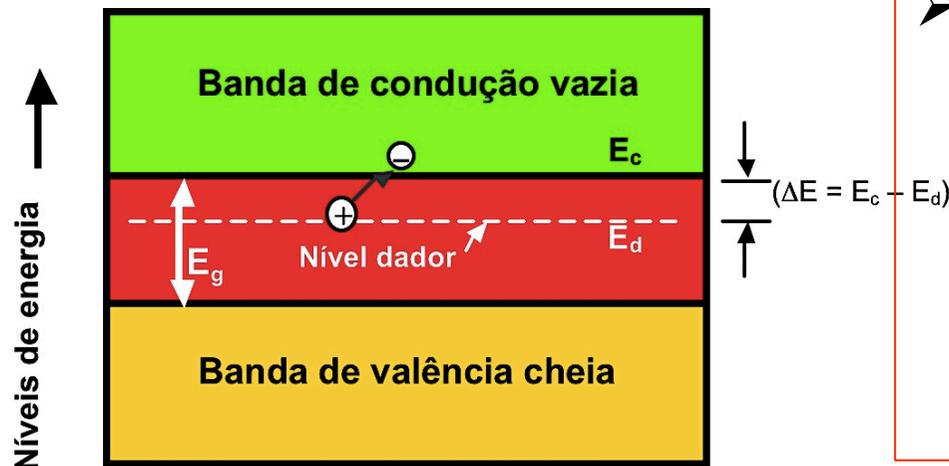


Rede cristalina do Si dopada com **fósforo**

# Física dos semicondutores - Semicondutores

13

- Atendendo à figura da pág. anterior, verifica-se que no local da rede cristalina onde existe a **impureza dadora**, a banda de valência fica completamente preenchida e com um electrão a mais que, não sendo completamente livre, também não pertence a essa banda.



- A dopagem do Si com P faz com que existam zonas dispersas pelo cristal, cujos  $e^-$  ocupam bandas de energia  $E_d$  muito próximas da banda de condução.

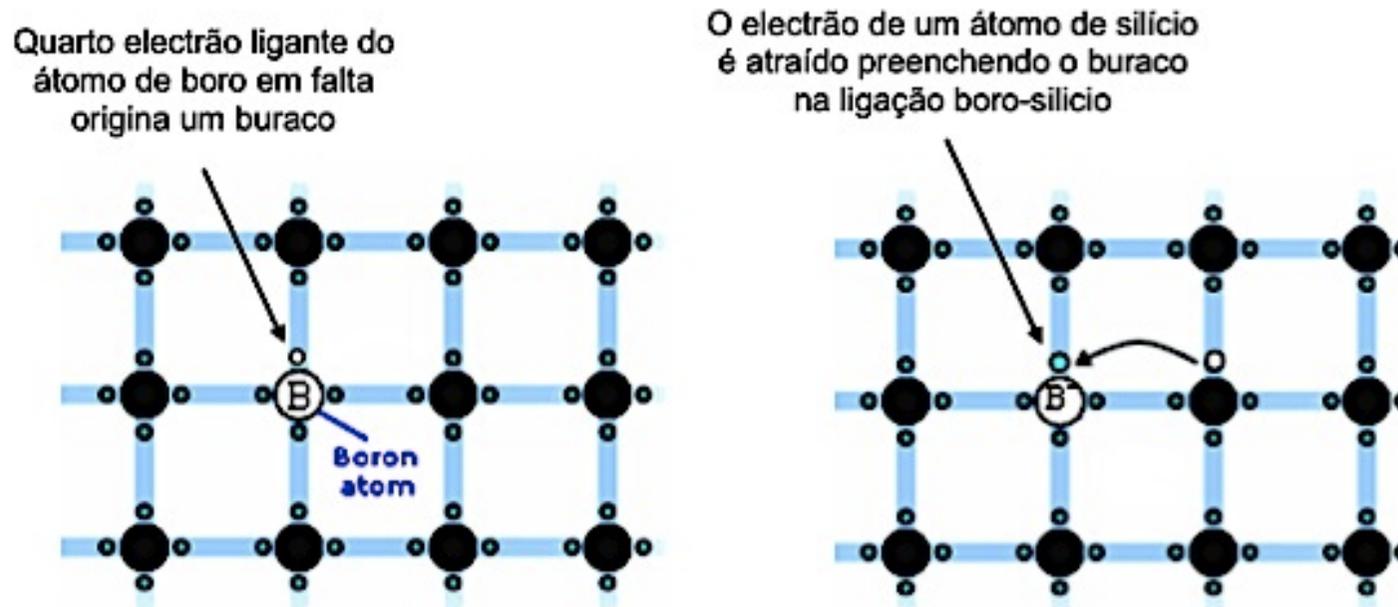
# Física dos semicondutores - Semicondutores

14

- Contrariamente ao que acontece nos semicondutores intrínsecos, energias superiores a ( $\Delta E = E_c - E_d$ ) são suficientes para “transportar” esses electrões para a banda de condução. O resultado da dopagem com impurezas dadoras são **semicondutores do tipo *n***, ou seja, semicondutores carregados negativamente.
- Os elementos do grupo III designam-se por **impurezas aceitadoras**. Os mais utilizados na indústria dos semicondutores são o **boro** (B), o gálio (Ga) e o **índio** (In). Nos locais do cristal de Si onde existe uma impureza deste tipo (um átomo de B) falta um  $e^-$  (*existe uma lacuna*) para completar a banda de valência.

# Física dos semicondutores - Semicondutores

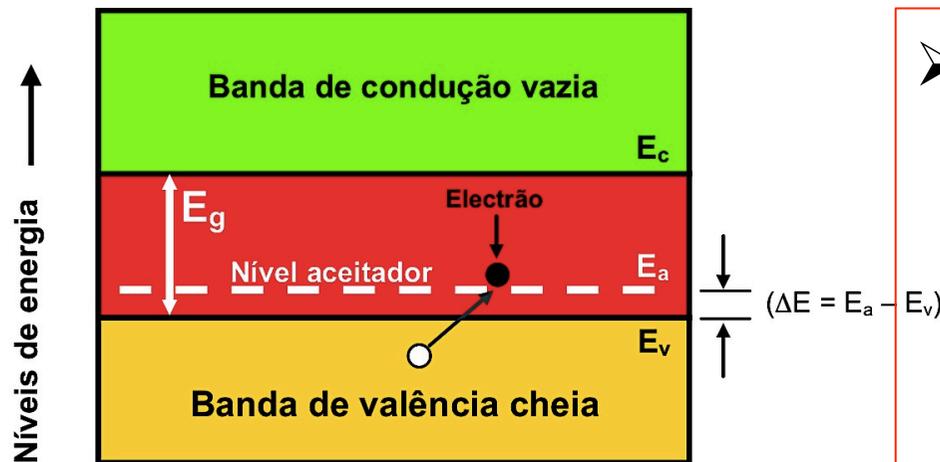
15



- À semelhança daquilo que acontece com os semicondutores dopados com P, também nos semicondutores dopados com B são necessárias muito menores energias para que haja transporte de  $e^-$  entre bandas de valência localizadas em diferentes posições do cristal dopado.

# Física dos semicondutores - Semicondutores

16



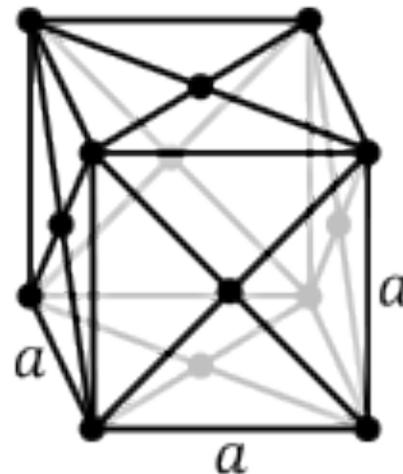
➤ A dopagem do Si com B faz com que existam zonas dispersas pelo cristal, cujos  $e^-$  ocupam bandas de energia  $E_a$  muito próximas da banda de valência.

- Durante o processo de aceitação de  $e^-$  as impurezas ionizam-se e adquirem carga negativa. Dado que elementos do grupo III aceitam electrões, eles são designados por **impurezas aceitadoras**. Neste caso, está-se perante uma condução de lacunas e o resultado é um semiconductor do tipo  $p$ .

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

## ➤ Estrutura Cristalina do Silício

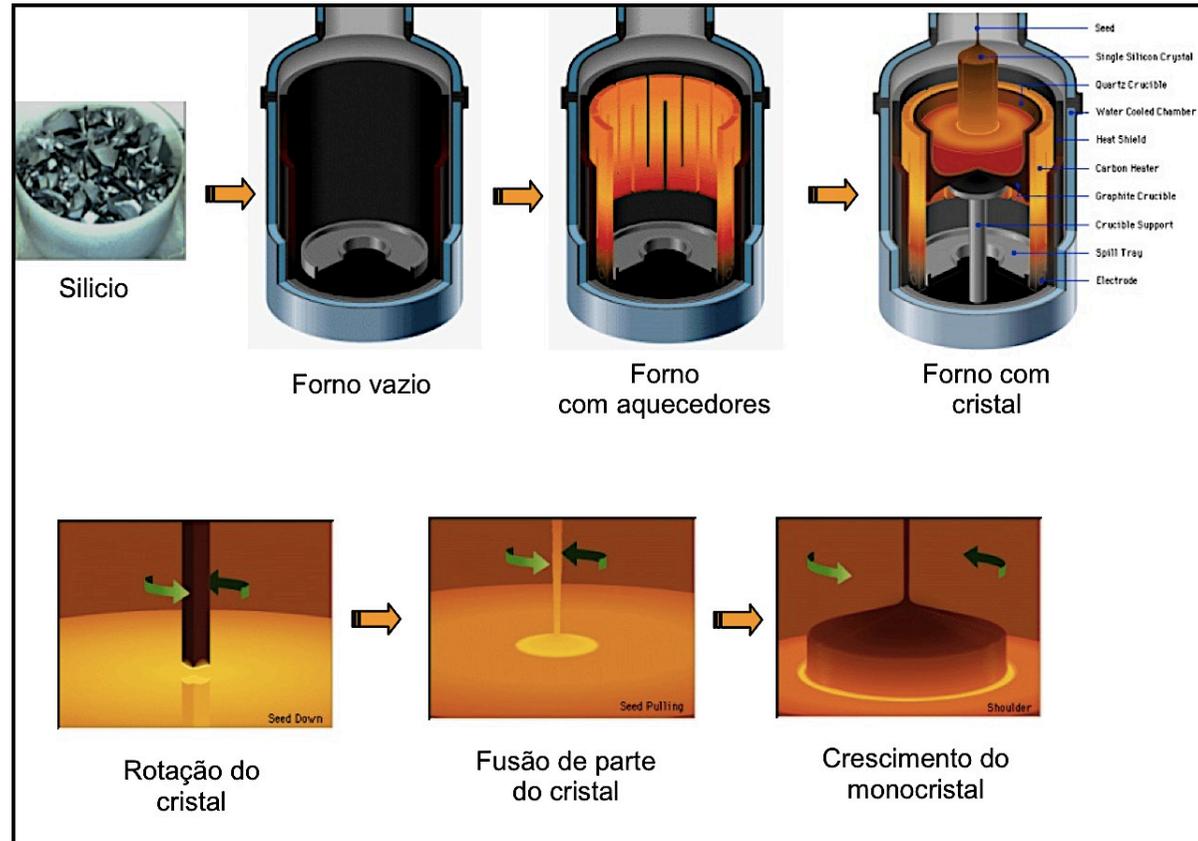
- O Si é um elemento do grupo IV que tem 4 electrões na última camada. O arranjo da rede cristalina do Si é uma rede cúbica de faces centradas com ligações covalentes (partilha de 2  $e^-$  por cada átomo).



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- O Si é obtido a partir da sílica existente na areia (por exemplo nas praias, e existente em grande quantidade na Terra) através de um processo industrial (o designado processo de *Czochralski*).
- Neste processo, começa-se por fazer fundir, num cadinho não reactivo, silício policristalino de elevada pureza, que é mantido a uma temperatura imediatamente abaixo do seu ponto de fusão. Em seguida, mergulha-se no líquido, um cristal – semente de silício de alta qualidade (puro), que é simultaneamente colocado a girar.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores



Etapas do crescimento de um monocrystal de silício pelo processo de Czochralski

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- O cristal – semente continua a rodar e é retirado lentamente do líquido. À medida que é retirado do líquido, o silício líquido que se encontra no cadinho adere e cresce sobre o cristal – semente, originando um monocristal de silício (**tarugo**) de muito maior diâmetro .

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- A importância do Si na indústria dos semicondutores é inquestionável.
- A existência de grandes quantidades de Si na crosta terrestre não foi a razão principal que conduziu à sua utilização como material semicondutor de base na indústria de semicondutores. Na verdade, após os anos quarenta, experimentou-se utilizar uma câmara de vácuo para promover o crescimento de uma camada de  $\text{SiO}_2$  em substratos (*wafers*) de Si utilizando apenas um processo de **oxidação térmica** (aumento da temperatura entre 700-1200 °C) e a introdução de  $\text{O}_2$ . O processo é muito simples e pode-se controlar a espessura do filme de  $\text{SiO}_2$  com o tempo.

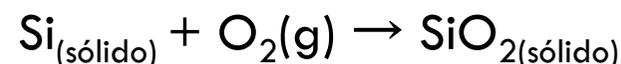
# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

## ➤ Oxidação térmica do dióxido de silício

- Referiu-se que o Si é um elemento do grupo IV que tem 4 electrões na última camada. O arranjo da rede cristalina do Si é uma rede cúbica de faces centradas com ligações covalentes (partilha de 2  $e^-$  por cada átomo). O **dióxido de silício** ( $\text{SiO}_2$ ), comumente conhecido apenas por o óxido de silício, é um material muito importante em microelectrónica e em **MEMS** por ser um **bom isolante elétrico**. É importante na tecnologia MEMS pois resiste melhor aos reagentes que corroem o silício podendo ser utilizado como máscara no processo de micromaquinagem (corrosão). Nesse caso, o  $\text{SiO}_2$  tem estrutura amorfa.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- Existem vários métodos para obtenção de  $\text{SiO}_2$ , sendo os principais a **oxidação térmica** e a deposição por CVD. Neste curso será tratado apenas o método de oxidação térmica, o qual pode produzir  $\text{SiO}_2$  com as melhores qualidades possíveis (baixa quantidade de defeitos quando comparado com outros métodos de deposição). Entretanto, trata-se de um processo relativamente lento, e, na prática, só é adequado para a obtenção de camadas com uma espessura máxima de até de  $2\mu\text{m}$ .
- Há dois métodos principais de oxidação térmica: a **oxidação a seco**, utiliza  $\text{O}_2$  gasoso, e a **oxidação húmida** que utiliza vapor de  $\text{H}_2\text{O}$ .



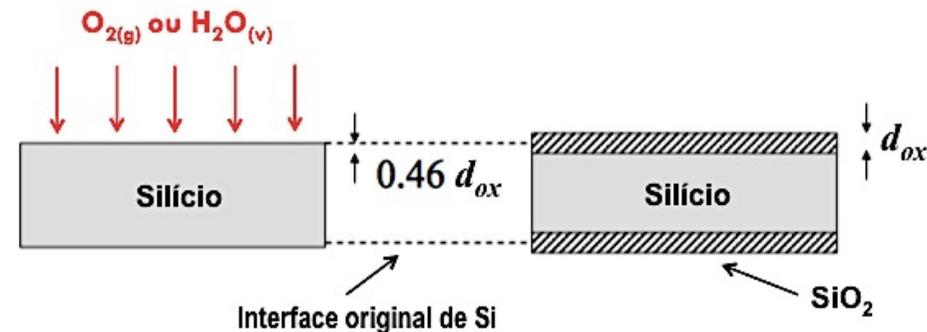
# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

24

> A reacção de oxidação térmica ocorre com o consumo das camadas superficiais de átomos de Si do substrato. A reacção inicia-se na superfície do substrato e vai progredindo com a difusão de moléculas de oxigénio (ou de H<sub>2</sub>O) para as camadas mais internas. Devido às diferenças de densidade e de arranjo molecular, para que ocorra o crescimento de SiO<sub>2</sub> com espessura  $d_{ox}$ , deve ser consumida uma espessura de  $d_{Si} = 0,46 d_{ox}$  de silício a partir do substrato.

$$m_{Si} = m_{ox} \Leftrightarrow \rho_{Si} V_{Si} = \rho_{ox} V_{ox}$$

$$\frac{V_{Si}}{V_{ox}} = \frac{\rho_{ox}}{\rho_{Si}} \rightarrow \frac{d_{Si}}{d_{ox}} = \frac{\rho_{ox}}{\rho_{Si}} = 0,46$$



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

> A velocidade de crescimento da camada de óxido é obtida através do modelo de *Deal e Grove* e aplica-se a temperaturas que variam entre os 700 e 1300°C.

$$d_{ox} = \frac{A}{2} \sqrt{1 + \frac{4B(t+\tau)}{A^2}} - \frac{A}{2} \Leftrightarrow d_{ox}^2 + Ad_{ox} = B(t+\tau)$$

- Onde  $B$  é a designada constante de velocidade parabólica (expressa em  $\mu m^2/h$ ), e  $B/A$  é a designada constante de velocidade linear (expressa em  $\mu m/h$ ). Estas constantes são obtidas para:

> Elevados tempos de oxidação (**óxidos espessos**  $\rightarrow t \gg \tau$  e  $t \gg A^2/4B$ , onde o processo é limitado por *difusão*).  $d_{ox}^2 \approx B(t+\tau)$

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

> Tempos de oxidação reduzidos (**óxidos finos**  $\rightarrow (t + \tau) \ll A^2/4B$  , onde o processo é limitado pela **velocidade da reacção**.

$$d_{ox} \approx \frac{B}{A}(t + \tau)$$

> Para temperaturas de **1000°C** os valores típicos destas constantes são:

|                            | <b>A (<math>\mu m</math>)</b> | <b>B (<math>\mu m^2/h</math>)</b> | <b><math>\tau</math> (h)</b> |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Oxigénio O <sub>2(g)</sub> | 0,165                         | 0,0117                            | 0,37                         |
| Vapor (H <sub>2</sub> O)   | 0,226                         | 0,287                             | 0                            |

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

## ➤ Exercício Proposto

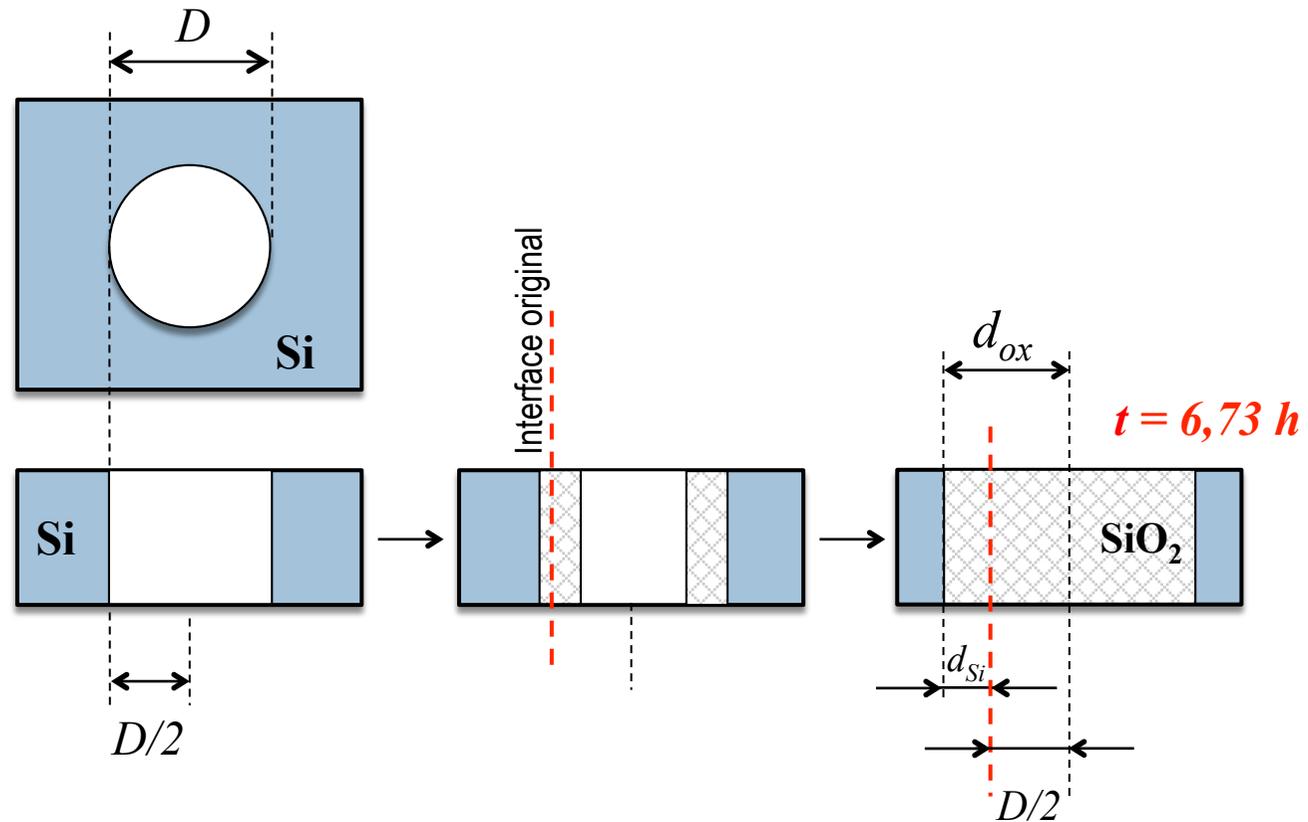
- Pretende-se utilizar o processo de oxidação térmica para fechar (colmatar) um furo de geometria circular que existe num substrato de silício. O furo tem um diâmetro  $D = 2 \mu m$ . Admitindo que o processo de oxidação é efectuado a uma temperatura de **1100°C** na presença de vapor de água (**oxidação húmida**), determine o tempo que é necessário decorrer até que o furo fique completamente fechado.  
**Dados:**  $B = 0,51 \mu m^2/h$  e  $\tau = 0$ .

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

28

## ➤ RESOLUÇÃO:

- Como se trata de um filme espesso, o processo é limitado por *difusão*.



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- Deste modo pode-se escrever:

$$d_{ox}^2 = B(t + \tau) \rightarrow d_{ox}^2 = Bt \quad (\text{porque } \tau = 0)$$

- > Afim de se fechar o furo terá que se verificar a condição geométrica:

$$d_{ox} = d_{Si} + D/2 \rightarrow d_{ox} = (0,46d_{ox}) + D/2$$

- > Ou seja:

$$d_{ox}(1 - 0,46) = D/2 \rightarrow d_{ox} = \frac{D/2}{(1 - 0,46)} = 1,852 \mu m$$

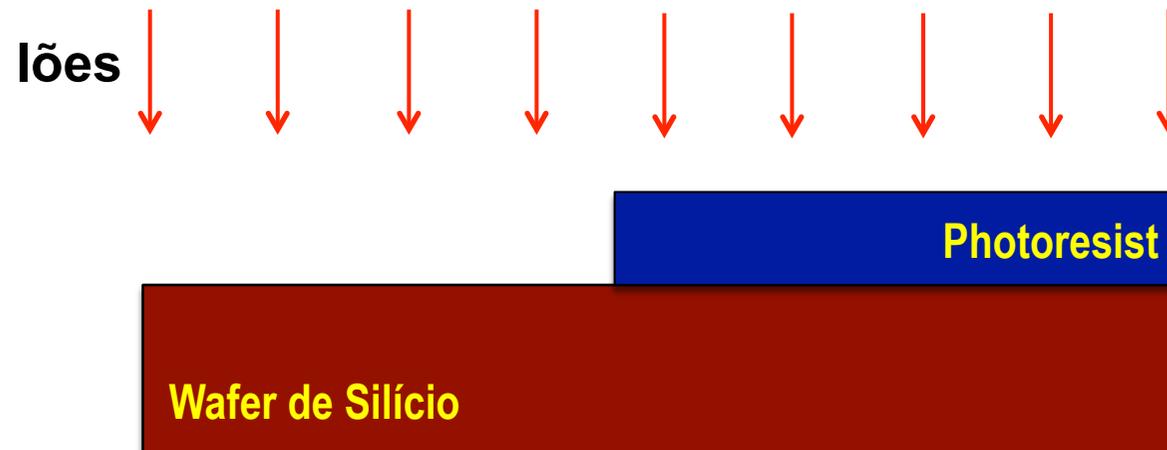
- > Então:  $t = \frac{d_{ox}^2}{B} = \frac{1,852^2}{0,51} = 6,73 h$

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- Dopagem do Si para obtenção de regiões do tipo  $p$  e tipo  $n$
- A dopagem consiste na adição de impurezas ao substrato de Si afim de lhe modificar o “tipo” de condutividade eléctrica. O primeiro passo consiste em criar regiões no (wafer de Si ) com impurezas através de um processo de implantação iónica (dopagem superficial – tecnologia CMOS). Para tal, os iões são acelerados (através de uma elevada diferença de potencial) até à superfície do wafer, que está protegida (máscara) nas regiões onde não se quer dopar.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

> Processo de implantação iónica: **Dopagem superficial**



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

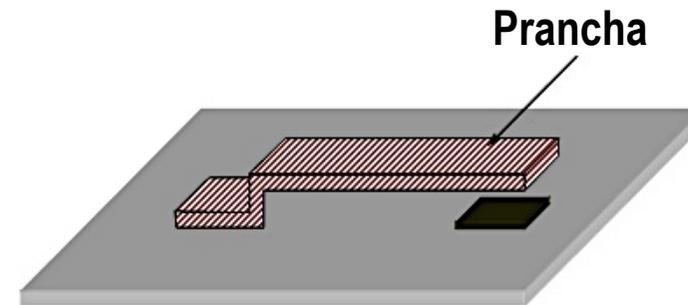
- > Após a implantação iónica, dependendo da intensidade da dopagem, os iões podem ser conduzidos para zonas mais profundas do substrato (**dopagem profunda**) através de processos de difusão que são governados pelas leis de Fick.
- **Propriedades Mecânicas do Silício**
- O Si é um material que apresenta baixa densidade ( $2330 \text{ kg/m}^3$ ) e tem excelentes propriedades mecânicas: Elevado módulo de elasticidade ( $E = 164 \text{ GPa}$ ); elevada dureza ( $H = 11 \text{ GPa}$ ), boa resistência à fractura ( $\approx 0,5 \text{ GPa}$ ) e ausência de tensões residuais.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

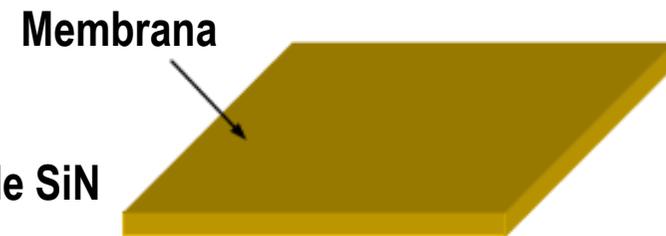
33

➤ O Si é um material base da micro/nanomaquinagem já que permite que se construam diversas estruturas 3D em Si como por exemplo:

- **Pontes**
- **Pranchas**
- **Massas sólidas**
- **Membranas flexíveis**
- **Partes móveis**
- **Engrenagens, rodas dentadas.**



Prancha de polissilício em substrato de Si



Membrana simples de SiN

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

## ➤ Propriedades Térmicas do Silício

- O silício apresenta uma condutividade térmica de  $147 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$  e um coeficiente de expansão térmica  $\alpha = 2,33 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Algumas das aplicações referem-se a sensores de temperatura, dispositivos termoeléctricos baseados em efeito de Seebeck e efeito Peltier.

## ➤ Wafers de Si e orientação cristalina

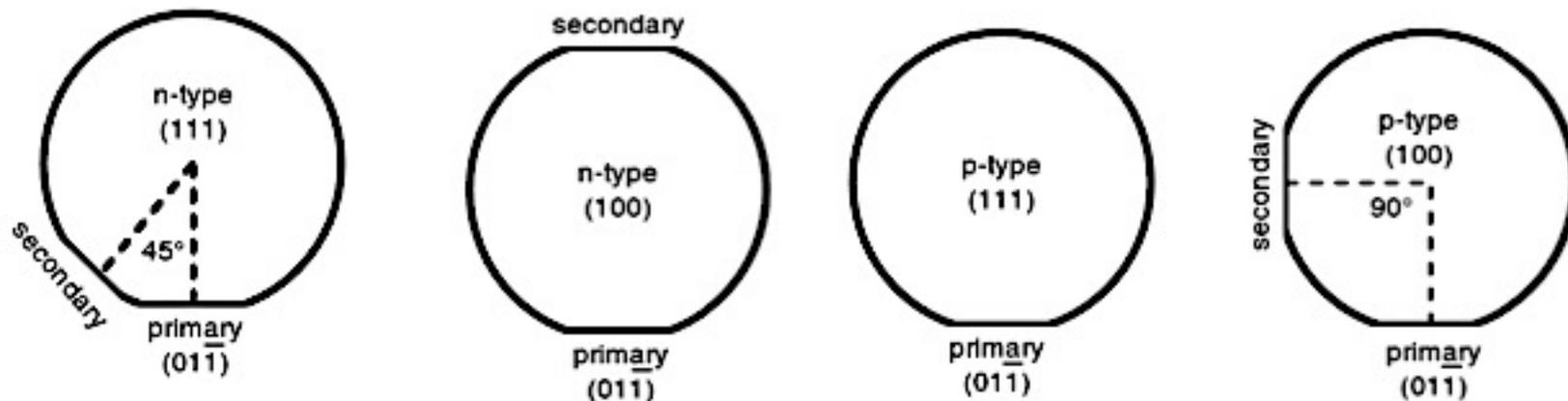
- Os átomos de silício num wafer (bolacha) podem estar orientados em várias direcções. Ao **silício sem orientação cristalina** dá-se o nome de **polissilício** que é um condutor eléctrico mas apresenta resistividade superior a metais como por exemplo o Al.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- Foi referido que é possível obterem-se tarugos de Si a partir de um processo industrial (o designado processo de *Czochralski*).
- O tarugo é cortado de forma a aproveitar apenas as regiões de qualidade adequada, sendo o restante reciclado. Em seguida, as direcções cristalográficas do tarugo são verificadas através de um difractómetro de raios-X de forma a orientar as operações seguintes. Posteriormente é realizado um desbaste de forma a se obter o diâmetro desejado. O tarugo é cortado usando uma serra fina diamantada e com controle de direcção cristalográfica.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

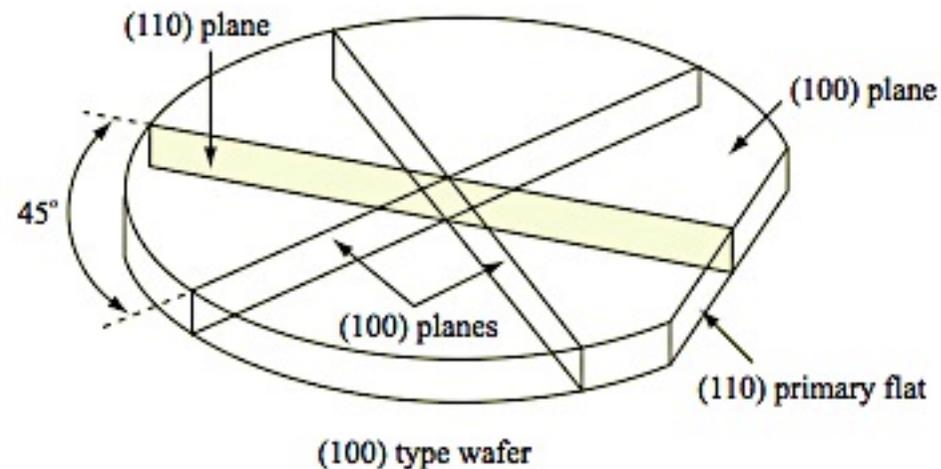
- Finalmente, as lâminas (wafers) são polidas de modo a que pelo menos uma das faces apresente acabamento óptico. Em seguida, é feito um corte na direcção  $[110]$  para indicar a orientação cristalográfica conforme a convenção mostrada na figura. Esses cortes são úteis para o posicionamento dos wafers em equipamentos de processos de microfabricação.



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

37

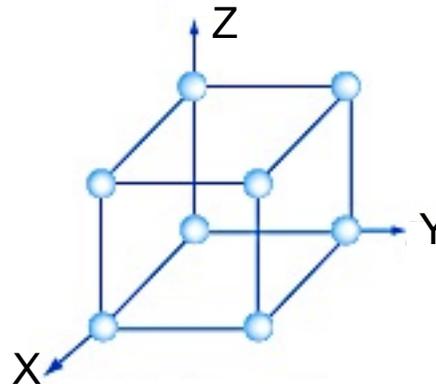
- Na verdade, é possível fabricarem-se um grande número de estruturas 3D, mas todas elas dependem do tipo de produto químico (*veremos adiante*) usado no processo de corrosão química e da orientação cristalográfica do wafer de silício. O **índices de Miller** permitem a compreensão do processo da corrosão química direcionada através do Si. Estes índices são usados em cristalografia para descrever o conjunto de planos existentes num cristal.



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

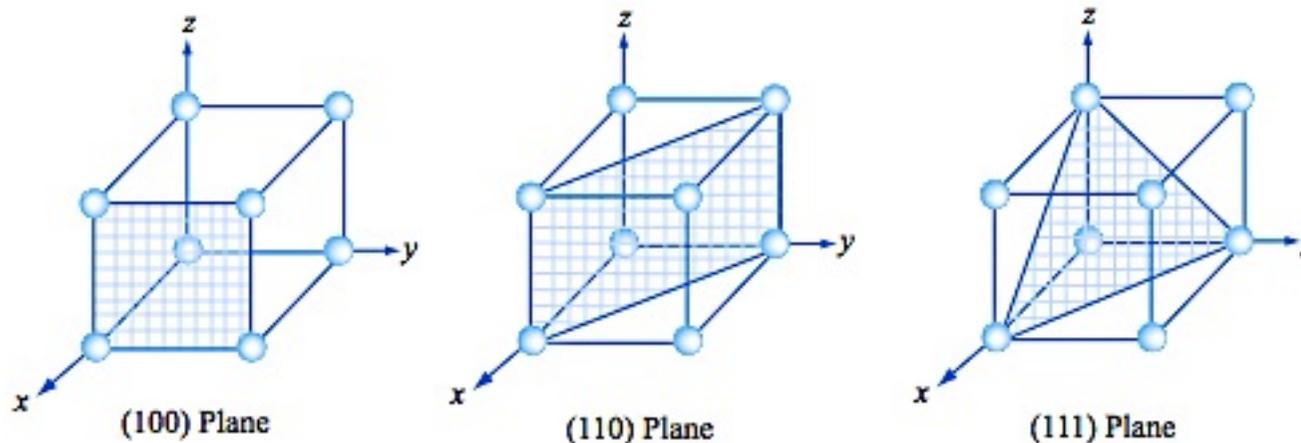
## Índices de Miller

- Os elementos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  da figura (correspondentes a  $[100]$ ,  $[010]$  e a  $[001]$ , respectivamente) são **vetores** e representam direcções específicas num wafer. Quer isto dizer que qualquer elemento escrito por parêntesis rectos,  $[h, k, l]$ , assinala a orientação (vector) dos cristais num wafer de Si. As letras  $h, k, l$  representam os índices de Miller.



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

> Um **plano cristalográfico** com uma orientação  $(h, k, l)$  é descrito por parêntesis curvos e define um plano de corrosão no Si. Note-se que a direcção  $[h, k, l]$  que define a orientação dum cristal é **um vector perpendicular** ao plano cristalográfico,  $(h, k, l)$ . Os wafers de silício mais utilizados são os de tipo  $[1, 0, 0]$  e  $[1, 1, 0]$ . Contudo, existe disponível um outro tipo de wafer: o wafer do tipo  $[1, 1, 1]$  que é muito menos utilizado do que os dois anteriores.



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

## > Exemplos

### PLANOS DE MILLER

a) *Dado um plano de Miller que tenha as intersecções geométricas  $(x, y, z)$  pretende-se determinar os correspondentes índices de Miller  $(h, k, l)$*

1°. Realizam-se os inversos das intersecções:  $\left(\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}\right)$

2°. Obtém-se o denominador comum e retêm-se apenas os numeradores:

$$\left(\underbrace{\frac{1}{x}}_{yz}, \underbrace{\frac{1}{y}}_{xz}, \underbrace{\frac{1}{z}}_{xy}\right) \rightarrow \left(\frac{yz}{xyz}, \frac{xz}{yxz}, \frac{xy}{zxy}\right) \rightarrow (yz, xz, xy)$$

**Nota:** a 2ª operação só se realiza desde que após a 1ª operação se obtenham números fraccionários. Se obtivermos números inteiros então só se realiza o 1º processo.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

*b) Dado um plano de Miller que tenha os índices de Miller (h, k, l) pretende-se determinar as correspondentes intersecções (x, y, z) com os eixos cartesianos.*

1°. Realizam-se os inversos dos índices de Miller:  $\left(\frac{1}{h}, \frac{1}{k}, \frac{1}{l}\right)$

2°. Obtém-se as coordenadas de intersecção dividindo-se todos os índices (da operação anterior) pelo maior deles. Supondo que o maior deles era 1/k:

$$\left(\frac{1/h}{1/k}, \frac{1/k}{1/k}, \frac{1/l}{1/k}\right) \rightarrow \left(\frac{k}{h}, 1, \frac{k}{l}\right)$$

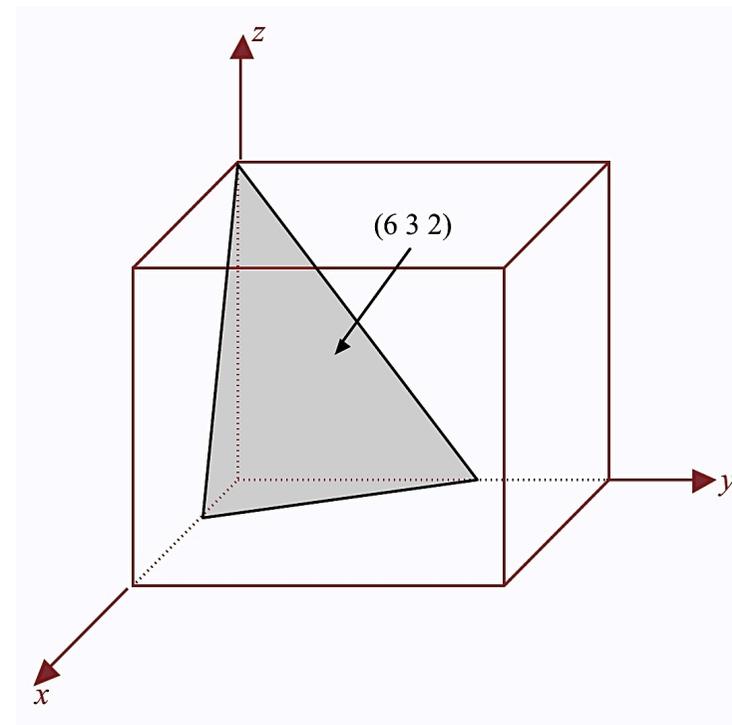
**Nota:** a 2ª operação só se realiza desde que após a 1ª operação se obtenham números fraccionários. Se obtivermos números inteiros então só se realiza o 1º processo.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

**EXEMPLO 1:** Considere-se num cristal cúbico plano representado na figura com os seguintes índices de Miller (6 3 2). Pretende-se calcular as coordenadas  $x$ ,  $y$ , e  $z$  onde o plano cristalográfico intersecta os eixos cartesianos.

1°. Realizam-se os inversos dos índices de Miller:

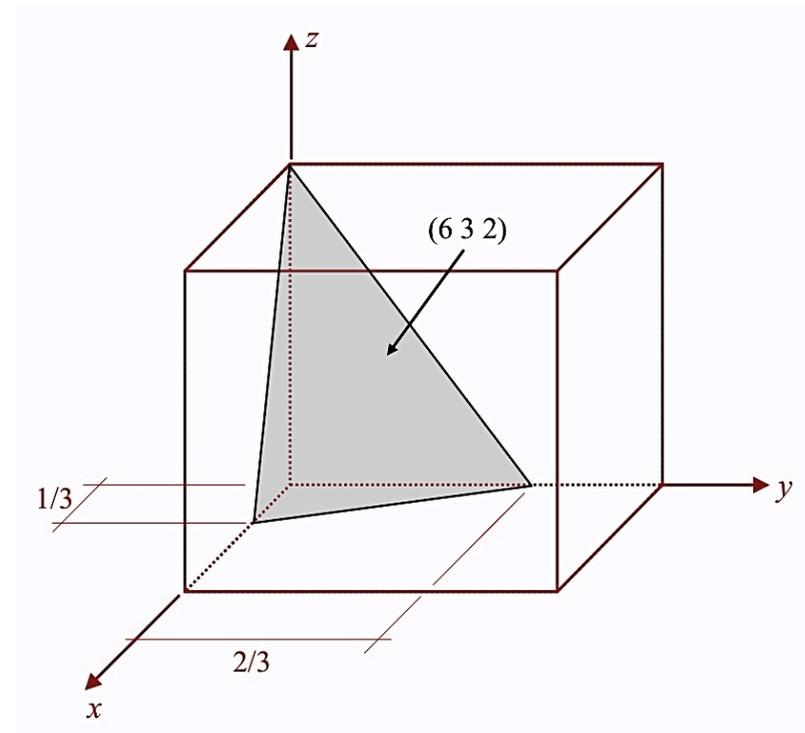
$$\left( \frac{1}{6}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \right)$$



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

2°. Obtém-se as coordenadas de intersecção dividindo-se todos os índices pelo maior deles (neste caso é  $1/2$ ).

$$\left( \frac{1/6}{1/2}, \frac{1/3}{1/2}, \frac{1/2}{1/2} \right) \rightarrow \left( \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1 \right)$$



# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

**EXEMPLO 2:** Se um plano cristalográfico intersecta os eixos cartesianos nos pontos de coordenadas  $(1/3, 2/3, 1)$ , pretende-se determinar os correspondentes índices de Miller  $(h, k, l)$ .

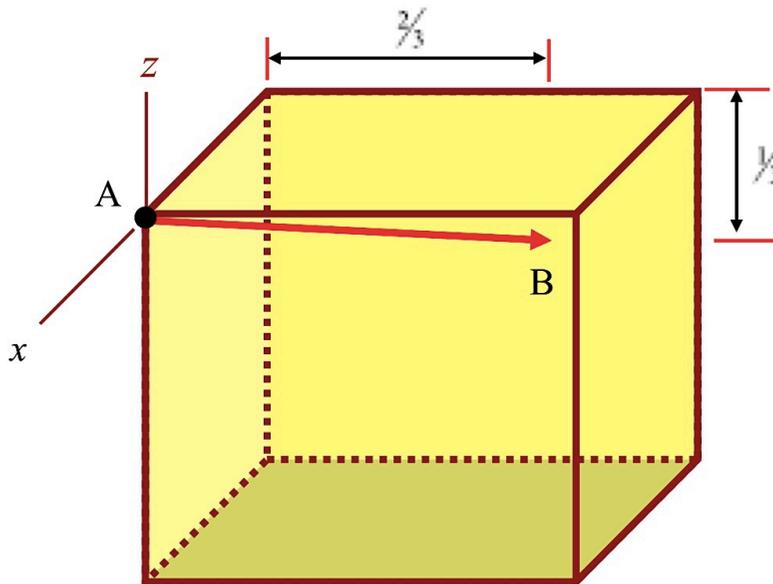
1°. Realizam-se os inversos das intersecções:  $\left(\frac{1}{1/3}, \frac{1}{2/3}, \frac{1}{1}\right) \rightarrow (3, 3/2, 1)$

2°. Obtém-se o denominador comum e retém-se apenas os numeradores:

$$\left(\frac{3}{2 \times 1}, \frac{3}{1 \times 1}, \frac{1}{1 \times 2}\right) \rightarrow \left(\frac{3 \times 2 \times 1}{1 \times 2 \times 1}, \frac{3 \times 1 \times 1}{2 \times 1 \times 1}, \frac{1 \times 1 \times 2}{1 \times 1 \times 2}\right) \rightarrow \left(\frac{6}{2}, \frac{3}{2}, \frac{2}{2}\right) \rightarrow (6 \ 3 \ 2)$$

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

**EXEMPLO 3:** O vector  $\overrightarrow{AB}$  representa a *orientação* de um determinado plano cristalográfico. Pretende-se representar o plano cristalográfico através do cálculo das suas coordenadas de intersecção com os eixos cartesianos.



## ÍNDICES DAS DIRECCÕES CRISTALOGRAFICAS

- Para cristais cúbicos, os índices das direcções cristalográficas são as componentes do vector – direcção segundo cada um dos eixos cristalográficos., após a redução aos menores inteiros.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- a) *Dados os índices da direcção de um vector direcção  $[u, v, w]$  pretende-se determinar as correspondentes coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$  desse vector:*
- Obtém-se as coordenadas de intersecção dividindo-se todos os índices pelo maior deles. Suponha-se que o maior deles é o  $w$ :

$$[u, v, w] \rightarrow \left( \frac{u}{w}, \frac{v}{w}, \frac{w}{w} \right) \rightarrow \left( \frac{u}{w}, \frac{v}{w}, 1 \right)$$

b) *Dadas as coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$  de um vector direcção, pretende-se determinar os correspondentes índices  $[u, v, w]$  desse vector direcção:*

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- Neste caso, obtém-se o denominador comum e retém-se apenas os numeradores:
- No exemplo que está a ser estudado, as coordenadas cartesianas do vector  $\overrightarrow{AB}$  são  $x = -1$ ,  $y = 2/3$  e  $z = -1/3$ .

> Os índices  $[u, v, w]$  do vector  $\overrightarrow{AB}$  obtêm-se efetuando o denominador comum entre as suas coordenadas cartesianas e retendo-se apenas os numeradores.

$$(-1, 2/3, -1/3) \rightarrow (-3/3, 2/3, -1/3) \rightarrow [\bar{3}, 2, \bar{1}]$$

> **NOTA:** Uma relação importante no sistema cúbico, indica que os índices de Miller de uma direcção ortogonal a um determinado plano cristalográfico são iguais aos índices de Miller desse plano.

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

- O plano cristalográfico que tem como vector ortogonal o vector  $AB$  é descrito pelos seguintes índices de Miller:  $(\bar{3}, 2, \bar{1})$

> Afim de calcular as coordenadas de intersecção  $x$ ,  $y$  e  $z$  desse plano com os eixos cartesianos, realiza-se:

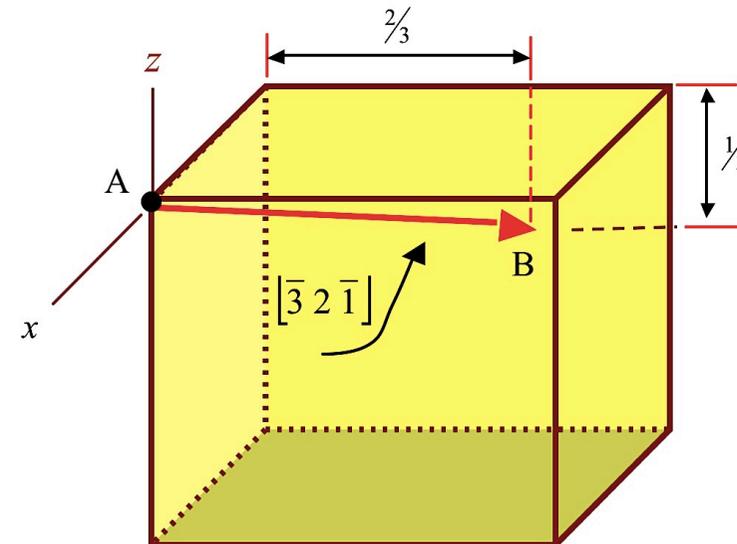
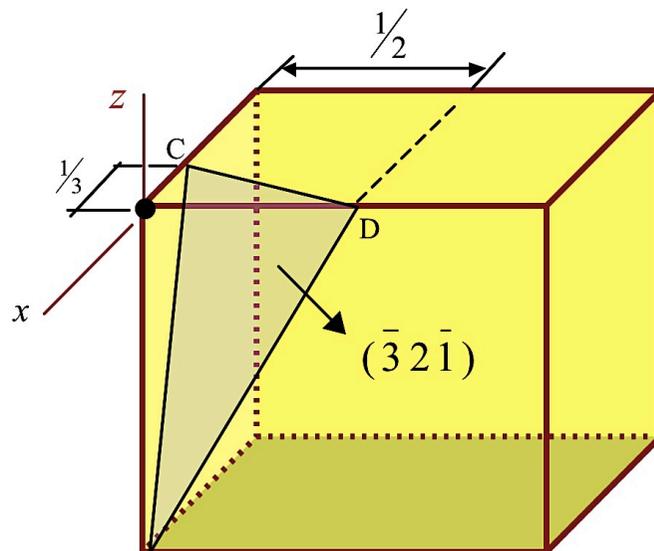
1°. Os inversos dos índices de Miller:  $\left(-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, -1\right)$

2°. **Coordenadas de intersecção:** dividem-se todos os índices pelo maior deles (**neste caso é 1**) obtém-se:

$$(x, y, z) = \left(-\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, -1\right)$$

# Silício: Material utilizado na indústria dos Semicondutores

49



- Por exemplo, o vector  $CD$  (vector do plano cristalográfico) é ortogonal ao vector  $AB$ .
- **Sugestão:** prove que é verdade !

# Micromaquinagem no Silício

50

> A micromaquinagem (MM) no Si consiste em utilizar técnicas para moldar e/ou **criar (adicionar)** padrões no wafer de Si ou nos filmes finos que são depositados sobre um wafer de Si, de modo a mudar a forma do wafer e criar estruturas 3D. A MM usa técnicas de litografia e de deposição de filmes finos (ex. Evaporação térmica, *Sputtering*, CVD, etc.). Outra técnica imprescindível na MM consiste na **remoção** de materiais e filmes finos recorrendo-se à corrosão química por solução aquosa e a seco (corrosão por plasma). Estas técnicas permitem o fabrico de estruturas com dimensões na ordem dos **micrómetros (ou nanómetros)**, designadamente, pontes, pranchas, membranas flexíveis, massas sólidas, partes móveis com engrenagens e rodas dentadas (aplicações ópticas).

# Micromaquinagem no Silício

51

> Na microfabricação de MEMS existem basicamente três processos fundamentais a considerar:

- **Deposição** - **adição de material**
- **Fotolitografia** – **modificação de características**
- **Corrosão (micromaquinagem)** – **Remoção de material**

> **DEPOSIÇÃO**: Normalmente, o objectivo de se depositar uma fina camada (filme fino) de um material sobre o substrato é obter alguma propriedade funcional que não é encontrada se apenas for usado o substrato. O processo de deposição envolve a adição de uma nova camada de material sobre uma ou várias das superfícies do substrato.

# Micromaquinagem no Silício:

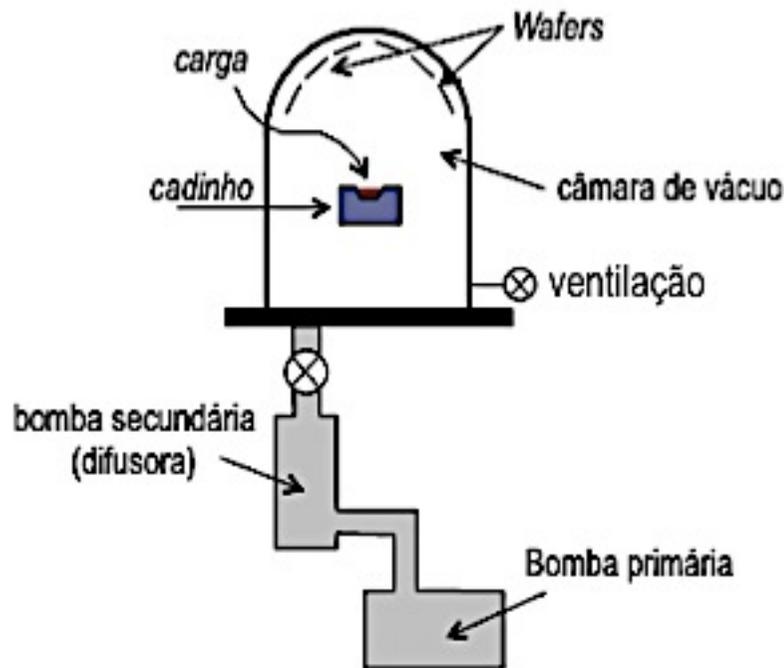
## Deposição de filmes finos

> A deposição pode ocorrer por métodos físicos, como por exemplo a evaporação térmica ou *sputtering* (normalmente para depositar metais), *spin-coating*, ou por métodos químicos como o CVD (*chemical vapour deposition*) que requer a existência de reacções químicas (normalmente para depositar camadas em materiais semicondutores ou isolantes).

> **Evaporação térmica:** Na evaporação, um material (a carga) é aquecido até atingir elevadas temperaturas, resultando no aparecimento de vapores que após condensação num substrato forma um filme fino do material evaporado. Com esta técnica é possível efectuar-se a evaporação directa e a deposição de filmes finos de praticamente qualquer elemento metálico.

# Micromaquinagem no Silício: Deposição de filmes finos

## EVAPORAÇÃO



> A pressão no interior da câmara deve ser muito baixa para evitar a contaminação do filme depositado. Para que haja vácuo na câmara, os gases e as impurezas no seu interior devem ser bombeados para fora. Inicialmente utiliza-se a bomba primária (mecânica) que desce a pressão no interior da câmara até tipicamente 100 Pa. Em seguida, entra em funcionamento a bomba secundária, baixando bastante mais a pressão.

# Micromaquinagem no Silício:

## Deposição de filmes finos

### > Pulverização catódica (*sputtering*)

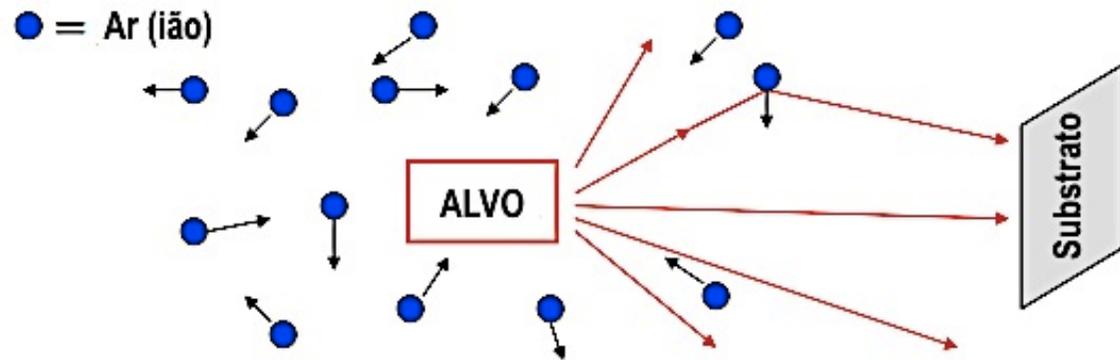
> Em regra, o *sputtering* permite a deposição de materiais sem alteração significativa da composição inicial do material a ser depositado (alvo). Através do bombardeamento do alvo com um feixe de iões (árgon), os átomos do alvo são extraídos da sua superfície e depositados no substrato. Contrariamente à evaporação, o *sputtering* apresenta melhor conformidade principalmente em regiões constituídas por degraus e sulcos. A técnica de *sputtering* permite ainda efectuar a deposição de filmes finos com melhores características em termos de composição e uniformidade.

# Micromaquinagem no Silício: Deposição de filmes finos

55



**Departamento de Física**  
**Laboratório de filmes finos**



**Thin film deposition systems: Magnetron Sputtering – DC and pulsed DC mode**

Joaquim Carneiro

**MEMS**

# Micromaquinagem no Silício:

## Deposição de filmes finos

### > CVD (*Chemical Vapor Deposition*)

- A técnica CVD envolve a reacção térmica de compostos gasosos formados pela mistura de reagentes com gases inertes afim de se formarem filmes finos na superfície de um substrato. O material que compõe o filme fino deposita-se directamente da fase gasosa (mistura de gases no interior de um reactor) sobre a superfície dos substrato. Actualmente, a indústria da microelectrónica utiliza a técnica de CVD para depositar **polissilício** (obtido a partir da decomposição do silano:  $\text{SiH}_4$  a  $620^\circ\text{C}$ ), **nitreto de silício** (obtido a partir de uma mistura de di-clorosilano/ $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  e amoníaco/ $\text{NH}_3$  a  $800^\circ\text{C}$ ) e **dióxido de silício** usando silano e  $\text{O}_2$  a  $450^\circ\text{C}$ .

# Micromaquinagem no Silício:

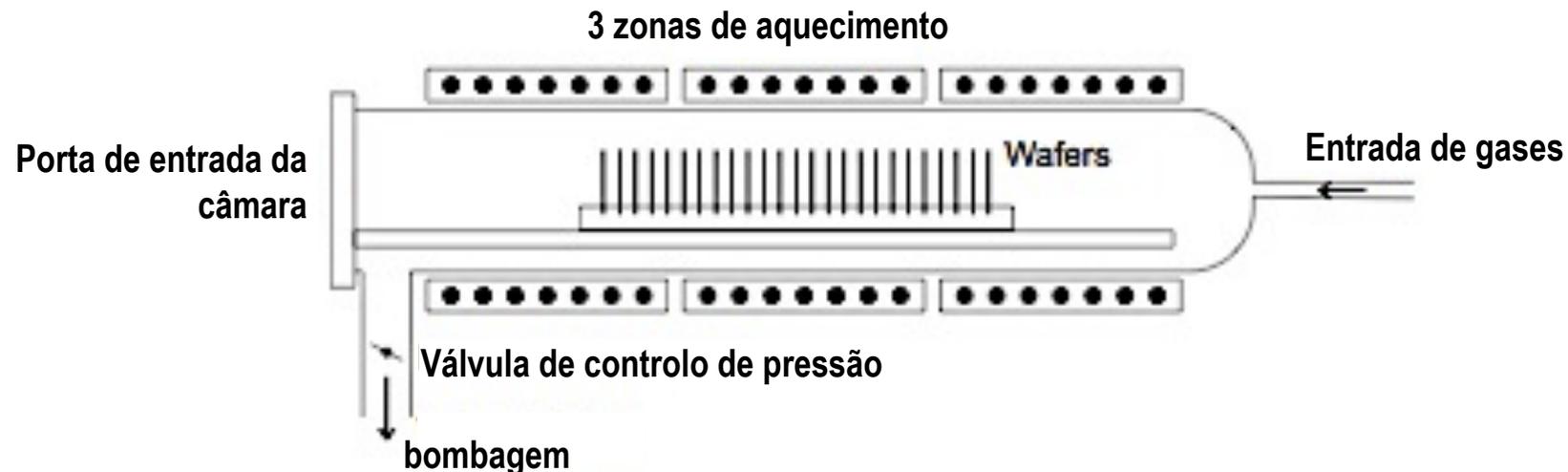
## Deposição de filmes finos

> Basicamente, a deposição de filmes finos pela técnica de CVD é realizada da seguinte maneira: os reagentes e os gases inertes são injectados no interior da câmara de reacção; no interior do reactor, os gases deslocam-se por difusão até à superfície do substrato, à qual aderem e onde reagem formando o filme; os subprodutos da reacção que abandonam o substrato são removidos para fora do reactor por acção de uma bomba de extracção de gases. Para que ocorra reacção é necessário que haja fornecimento de energia na forma de calor tipicamente usando temperaturas entre os 450 a 800°C.

# Micromaquinagem no Silício:

## Deposição de filmes finos

> A figura ajuda a compreender o princípio de funcionamento do reactor de baixa pressão com aquecimento interno da câmara de reacção (*hot-wall/low-pressure reactor*). O termo mais usado para designar este reactor é: CVD de baixa pressão (*low pressure CVD*) ou **LPCVD**.



# Micromaquinagem no Silício:

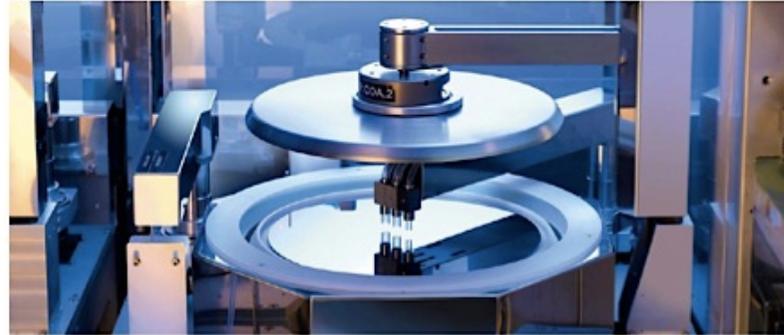
## Deposição de filmes finos

### > Spin-Coating

- A técnica de deposição por *spin-coating* consiste na aplicação de um material na forma líquida (normalmente uma solução que contém um **polímero sensível à radiação UV**, que funciona como fotoresiste no processo de litografia) sobre a superfície do substrato (wafer). Em seguida, o wafer é colocado a girar com uma velocidade de rotação relativamente elevada de forma a espalhar o material uniformemente por toda a sua superfície. Por fim, o wafer coberto com o material, é colocado numa placa aquecida durante alguns minutos para promover a evaporação do solvente, restando então um filme endurecido. O material inicial do filme deve ser dissolvido num solvente apropriado. A concentração da solução altera a viscosidade - quanto mais diluído, menor a viscosidade.

# Micromaquinagem no Silício: Deposição de filmes finos

## Spin-Coating



> A espessura final do filme depositado depende de diversos parâmetros, entre eles: a viscosidade da solução, a velocidade e tempo de rotação do spinner.

# Micromaquinagem no Silício:

## Fotolitografia

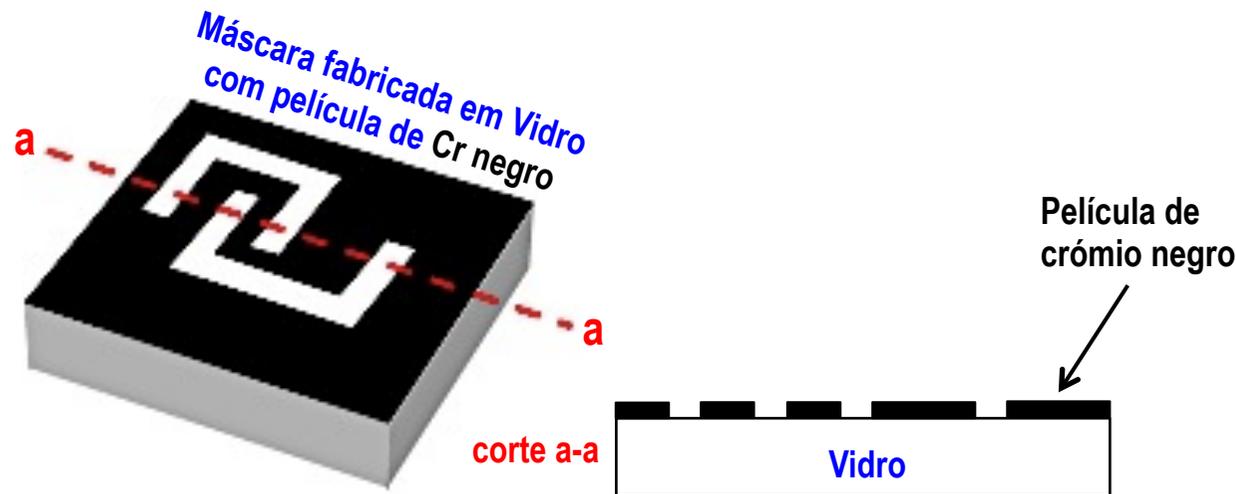
> **FOTOLITOGRAFIA:** Independentemente do tipo de micromaquinagem, esta não seria possível de realizar, sem a utilização da fotolitografia (FL). De um modo geral, a fotolitografia é o processo usado para transferir um modelo (padrão) desenhado (ex. Auto-Cad) numa máscara para o dispositivo a ser fabricado; ou seja, a FL permite definir a forma das estruturas a micromaquinar. A transferência do padrão dá-se, basicamente, pela incidência de radiação UV sobre uma **máscara** e correspondente projecção num filme fotossensível (fotoresiste) depositado previamente sobre o substrato. As máscaras são normalmente fabricadas em vidro (elevada transparência óptica) e contêm “desenhos” (ex. realizados através da utilização do Auto-Cad) materializados por **zonas escuras**, que impedem a passagem da radiação UV .

# Micromaquinagem no Silício:

## Fotolitografia

62

- Exemplo de uma máscara (fabricada em vidro com película de Cr negro) utilizada para transferir um padrão (desenho) para a superfície de um substrato.

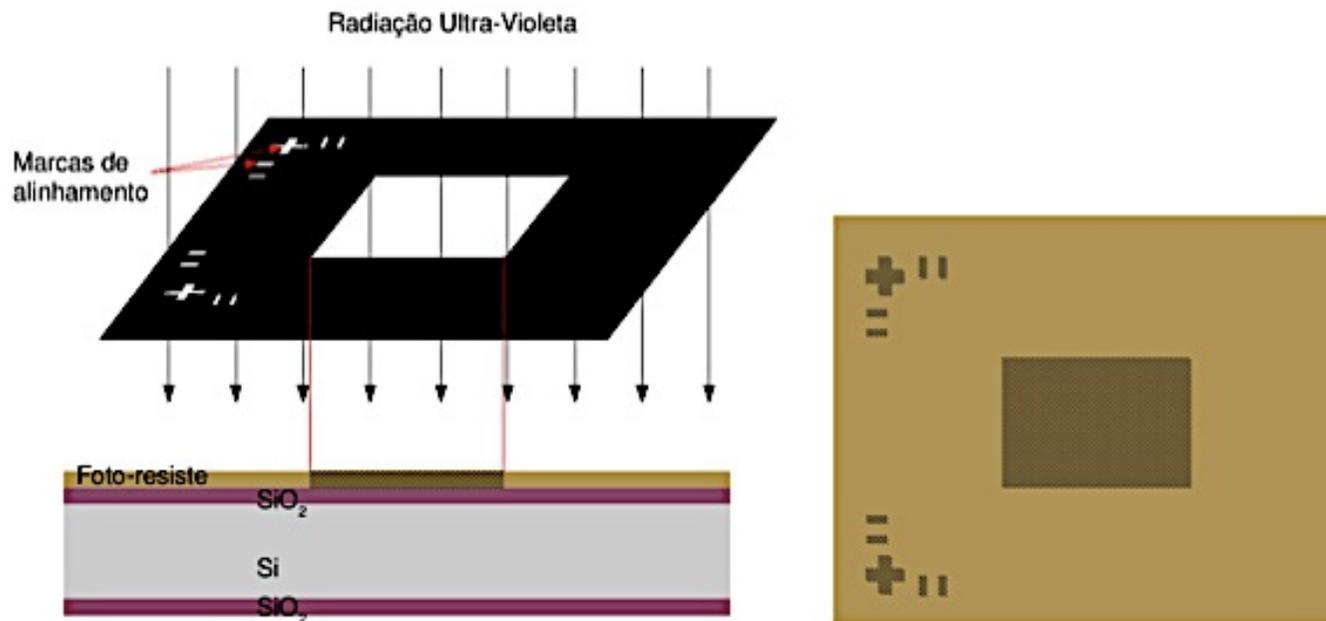


- Nota:** O termo máscara também é utilizado para referir um material que consiga desempenhar a função de “barreira” ou protecção a outro material (de natureza diferente) quando sujeito à acção de agentes corrosivos.

# Micromaquinagem no Silício: Fotolitografia

63

- A figura mostra um exemplo simples, em que um substrato de silício com as duas faces oxidadas está coberto com fotoresiste (FR) previamente depositado por spin-coating. Neste caso, o objectivo é transferir uma forma retangular para a camada de FR.



# Micromaquinagem no Silício:

## Fotolitografia

- Tanto o substrato (coberto por  $\text{SiO}_2$  e FR) bem como a máscara devem ser convenientemente dispostos num equipamento para exposição à radiação UV, que é capaz de sensibilizar o FR. *Após a exposição, ocorre uma modificação nas ligações químicas na região do FR que recebeu incidência de luz.*
- **Fotoresiste**
- O FR é um material orgânico polimérico composto por uma resina e um aditivo fotossensível. Geralmente, é usado diluído num solvente, sendo depositado no substrato através do processo de spin-coating. Após a deposição, o substrato deve ser aquecido para evaporação do solvente, resultando numa camada de filme sólido, adequado para o processo de exposição (litografia).

# Micromaquinagem no Silício:

## Fotolitografia

- Quando o FR é sujeito à acção da luz UV, esta tem a capacidade de o modificar localmente devido à ocorrência de uma reacção fotoquímica. Deste modo, a exposição à radiação UV conduz à formação de uma “imagem” da máscara sobre superfície do FR. O processo é finalizado através da revelação da imagem, utilizando uma solução química específica (*revelador*). *Na verdade, a exposição da superfície do FR à radiação UV, provoca a uma alteração da sua solubilidade na solução reveladora. A natureza da alteração depende do tipo de FR que é utilizado:*
  - **Fotoresiste positivo:** as regiões expostas tornam-se **mais solúveis**;
  - **Fotoresiste negativo:** as regiões expostas tornam-se **menos solúveis**.
- Após o processo de exposição, o FR deve ser processado de modo a se removerem as regiões mais solúveis.

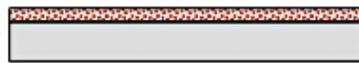
# Micromaquinagem no Silício: Fotolitografia

66

- Para cada fotoresiste existe uma **solução reveladora** própria que **remove** as regiões solubilizadas. Portanto, FR deve ser adquirido conjuntamente com a sua solução reveladora.

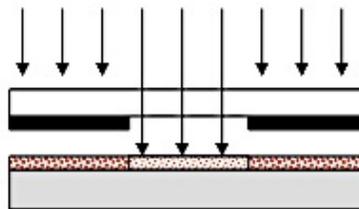
Deposição por spin-coating do FR; aquecer para evaporar o solvente.

*Spin-coating*



Exposição à luz UV através da máscara; o FR torna-se solúvel.

*Luz UV*



Revelação por dissolução do FR exposto/não-exposto (positivo/negativo).



# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

- A técnica de micromaquinagem mais simples de implementar é a denominada **corrosão química por solução aquosa (CQSA)**. Trata-se de um processo que consiste na remoção de material sólido através da sua diluição num reagente líquido (**corrosão húmida** ou *wet etching*), ou num reagente gasoso ou em plasma (**corrosão seca** ou *dry etching*). O material sólido a ser removido neste processo pode ser tanto o substrato como qualquer outra camada que possa ter sido depositada.
- Em relação à **direcção**, há dois tipos fundamentais de corrosão:
  - > **Isotrópica**: *quando a corrosão ocorre com a mesma velocidade em todas as direcções. Materiais amorfos ou materiais policristalinos (polissilício) sem orientação preferencial sofrem apenas corrosão isotrópica.*

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

- **Anisotrópica**: quando a corrosão ocorre com diferentes velocidades que dependem das diferentes direcções cristalográficas. Esta situação ocorre apenas em **materiais monocristalinos** (silício).
- Independentemente do tipo de solução química escolhida, podem obter-se estruturas através de dois processos de micromaquinagem em solução aquosa:
  - **Micromaquinagem volúmica** (*bulk micromachining*): é utilizada nas situações em que se deseja esculpir estruturas em profundidade, utilizando **toda a espessura do substrato**. A maioria dos MEMS com geometria mais simples são fabricados industrialmente através da utilização desta técnica.

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

- A **micromaquinagem volúmica** envolve a remoção de material do próprio wafer de silício e pode ser realizada com reagentes para corrosão isotrópica ou com reagentes para corrosão anisotrópica. Em ambos os casos, deve ser usada uma máscara de  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{SiN}$  para protecção de regiões em que a corrosão não é desejada. *Note-se que os fotoresistes atuais **não podem ser usados** como máscara pois **não resistem** aos reagentes que são utilizados na corrosão do silício.*

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

### > Soluções aquosas para corrosão química

### Corrosão Isotrópica

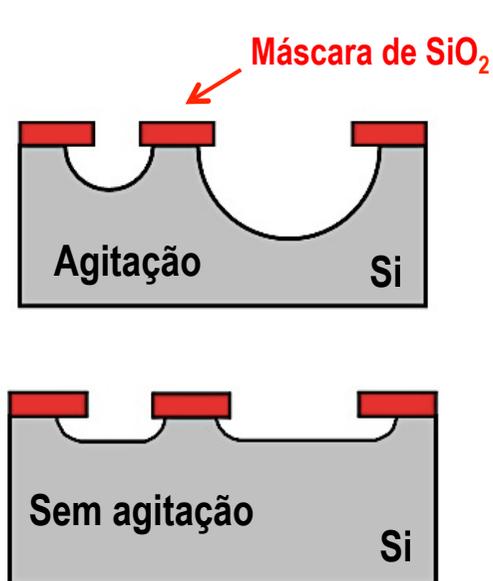
| Material       | Reagentes   |
|----------------|---|
| Si             | HNA (mistura de $\text{HNO}_3$ + $\text{HF}$ + $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) |
| $\text{SiO}_2$ | $\text{HF}$ (diluído)   |
| SiN            | $\text{H}_3\text{PO}_4$ (a quente e diluído)                              |
| PolySi         | KOH   |

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

71

> Na *corrosão isotrópica*, os produtos corrosivos atacam os materiais à mesma velocidade em todas as direcções e corroem as regiões debaixo da máscara ao longo do material. Este tipo de corrosão produz formas esféricas se o processo for efectuado com agitação apropriada.



➤ A agitação provoca uma maior movimentação das moléculas, promove a troca de moléculas consumidas por moléculas ainda não usadas. Caso não ocorra agitação suficiente, a superfície de fundo obtém uma forma plana. Note-se, também, que por ser isotrópica a corrosão avança um pouco por debaixo da máscara.

➤ **Aplicações:** *microcanais de fluxo para microfluídica; remoção de camadas de sacrifício em micromaquinagem de superfície.*

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

> A **corrosão anisotrópica**, representa o método mais comum e de custo económico mais baixo para realizar a micromaquinagem volúmica. Este tipo de corrosão, apresenta velocidades de corrosão dependentes das direcções do cristal de silício. *Tipicamente, as velocidades de corrosão são mais baixas ao longo das direcções perpendiculares ao plano cristalino mais denso.* A escolha do reagente (decapante) depende da orientação cristalográfica da face principal do wafer. Para o caso mais comum de um wafer com orientação  $[100]$ , a **escolha recai** sobre algum reagente com **elevada velocidade** de corrosão na direcção cristalográfica  $[100]$  (ou  $[110]$ ) e **baixa velocidade** de corrosão na direcção  $[111]$ . O reagente mais utilizado para o efeito é o **hidróxido de potássio**.

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

### > Soluções aquosas para corrosão química

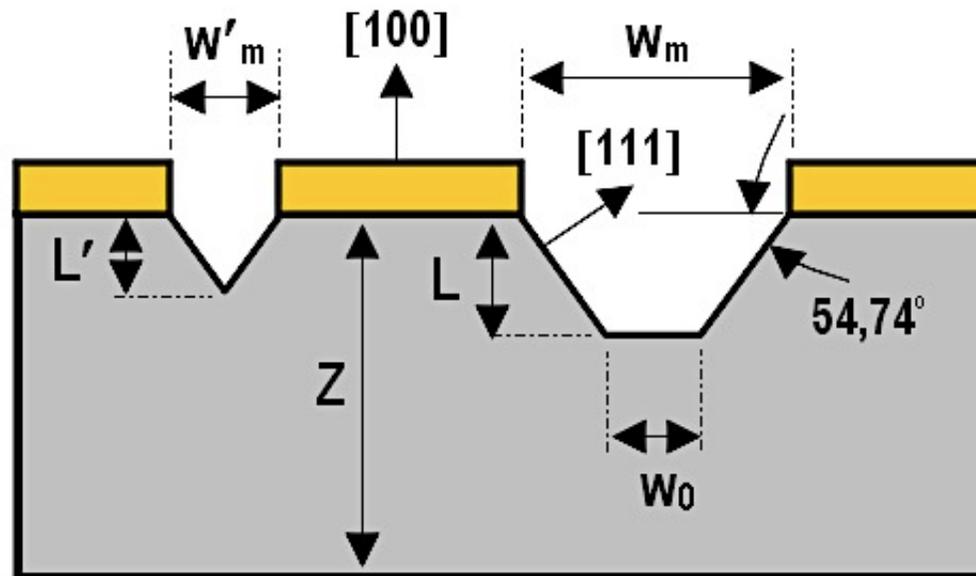
- **Corrosão Anisotrópica:** Só existe em materiais cristalinos.
- O efeito depende das diferentes velocidades de corrosão que variam de acordo com as diferentes direcções do cristal de Si.

| Material | Reagentes   |
|----------|---|
| Si       | Bases fortes (KOH + NaOH)   |
|          | <b>TMAH:</b> hidróxido de tetrametilamónia- $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$   |
|          | <b>EDP:</b> mistura de etilenodiamina $(\text{C}_2\text{H}_4(\text{NH}_2)_2)$ com pirocatecol $(\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2)$ |
|          | LiOH  |

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

> A razão entre a taxa de corrosão mais rápida e a mais lenta pode chegar a valores de 400 para 1 (400 : 1). A corrosão anisotrópica efectuada em wafers de **Si** origina formas piramidais (ou seja em **V**) onde os planos (111) formam um ângulo de  $54,74^\circ$  com os planos (100).

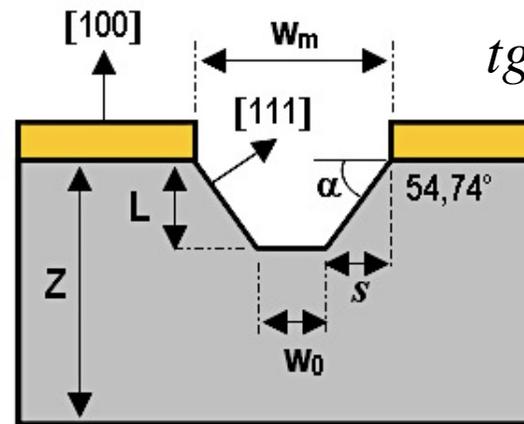
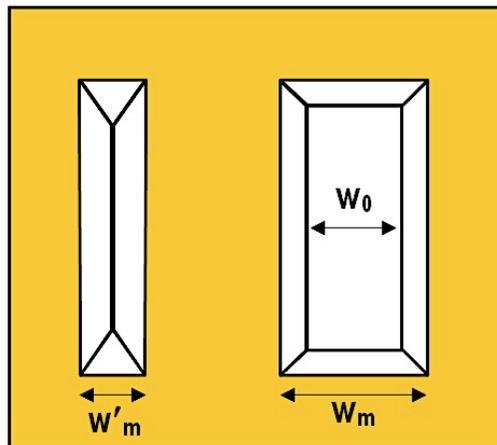


# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

75

> De acordo com a figura anterior, a largura do fundo da cavidade  $W_0$ , é completamente definida pela profundidade de corrosão, pela abertura superior na máscara  $W_m$ , e pelo declive das paredes laterais do plano (111) (ou seja  $54,74^\circ$ ).



$$\operatorname{tg}\alpha = L / s \rightarrow s = L / \operatorname{tg}\alpha$$

> Então:

$$W_m = W_0 + 2s \Leftrightarrow$$

$$W_0 = W_m - 2L / \operatorname{tg}(54,74^\circ)$$

$$\text{como } \operatorname{tg}(54,74^\circ) \approx 2 / \sqrt{2} \rightarrow W_0 = W_m - \sqrt{2} L$$

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão



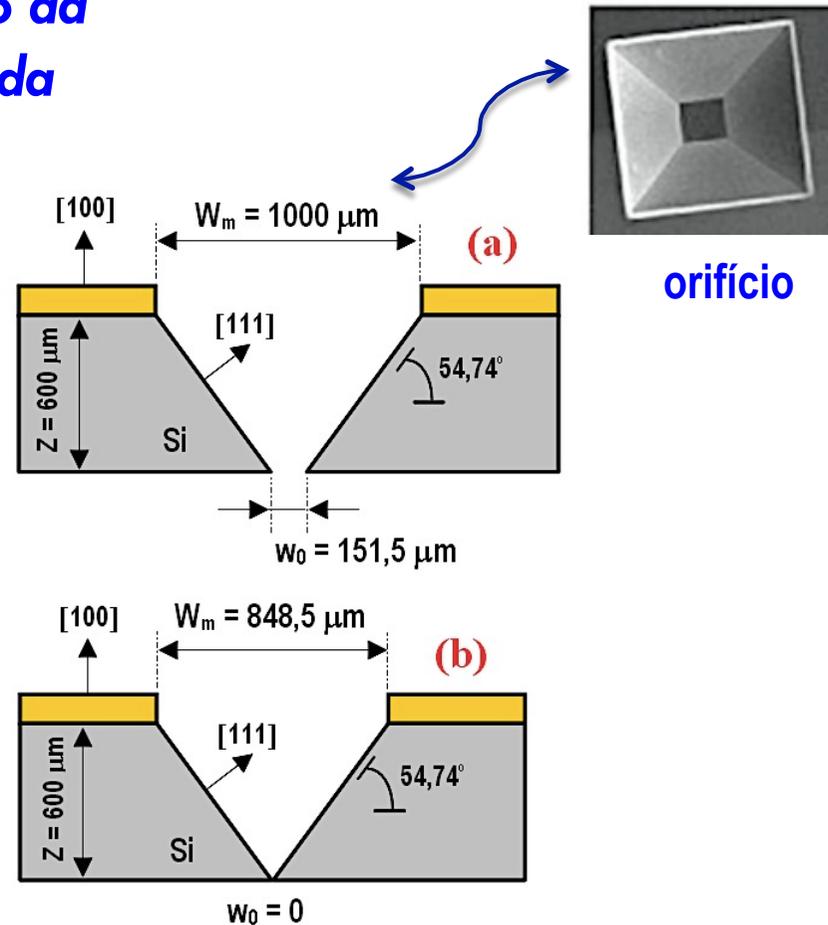
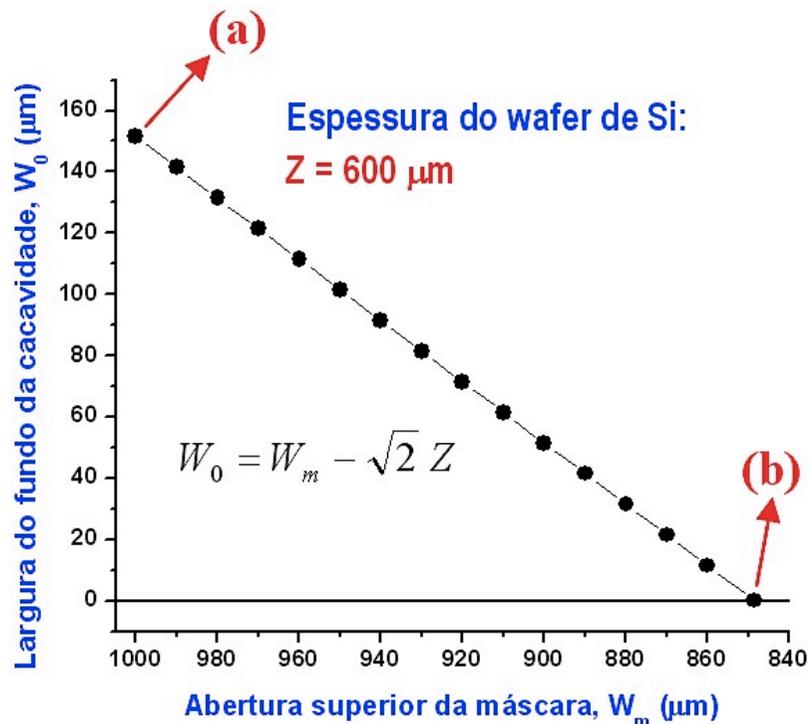
Universidade do Minho

76

- > Verifica-se que para se corroer toda a profundidade de um wafer com espessura  $Z$ , a largura do fundo da cavidade  $W_0$  deve corresponder a  $W_0 = W_m - \sqrt{2} Z$ .
- > Deste modo, verifica-se que quanto maior for abertura superior na máscara  $W_m$ , maior será a profundidade do ponto relativamente ao qual as paredes laterais dos planos (111) se intersectam. Por outro lado, também se verifica que para se corroer toda a profundidade de um wafer com espessura  $Z$ , a abertura superior na máscara  $W_m$  deve ser no **mínimo** ( $W_0 = 0$ ) de  $W_m = \sqrt{2} Z$ .
- > **Exemplo:** Para um wafer típico de silício com espessura  $t_{Si} = Z = 600 \mu\text{m}$  e com  $W_m > 849 \mu\text{m}$  os planos (111) não se intersectam dentro do wafer.

# Micromaquinagem no Silício: Corrosão

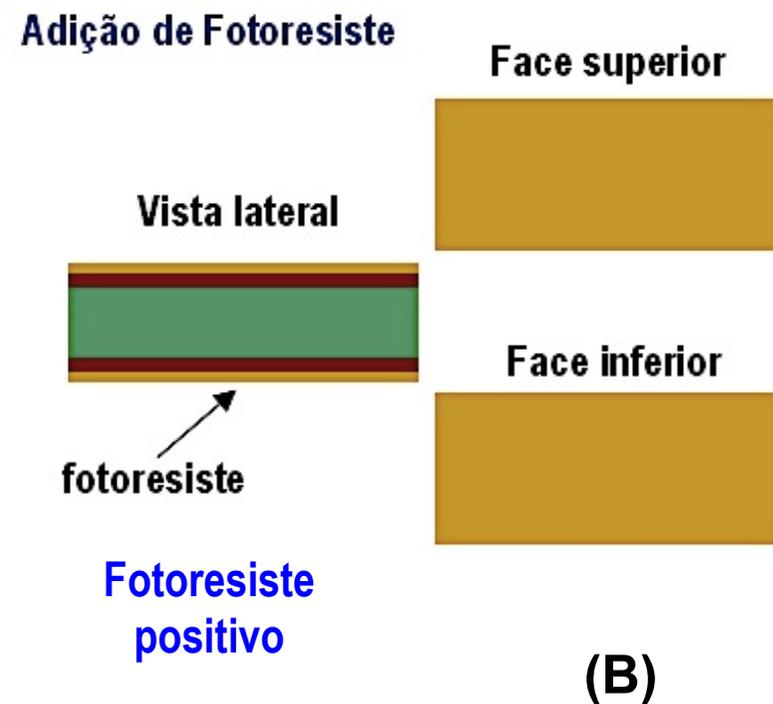
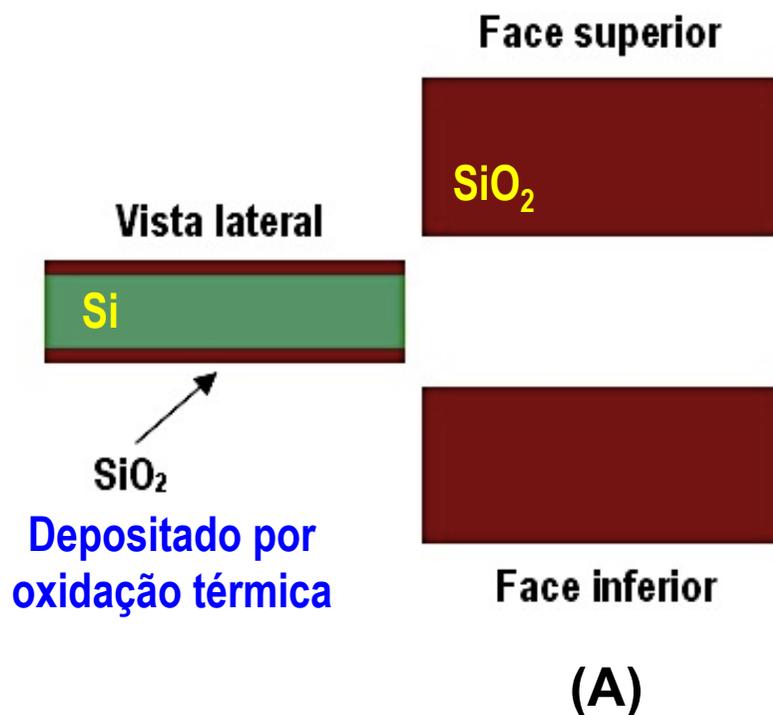
> Relação entre a largura de fundo da cavidade com a abertura superior da máscara



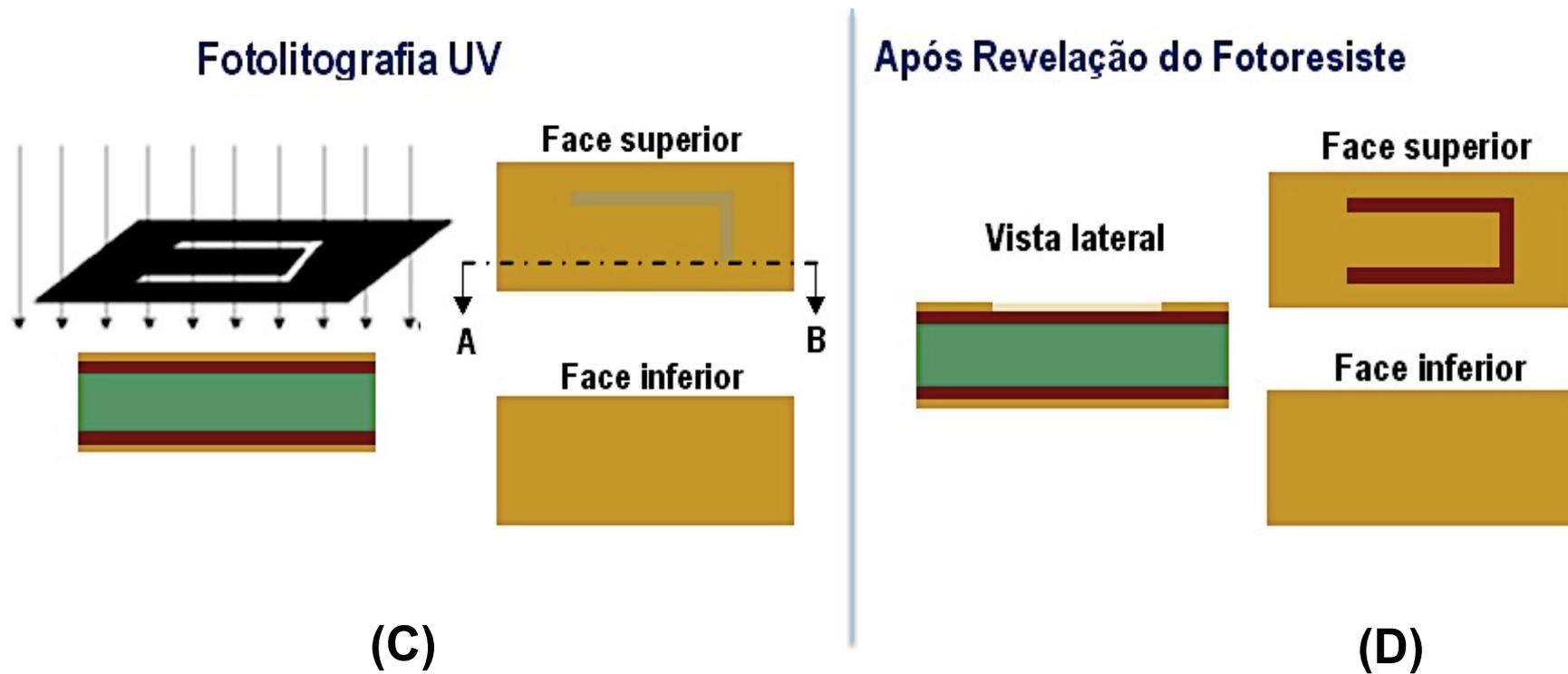
# Micromaquinagem no Silício: Corrosão

78

> Exemplo das etapas de **Micromaquinagem Volúmica por Solução Aquosa** para Microfabricação de uma Prancha (Cantilever) de  $\text{SiO}_2$

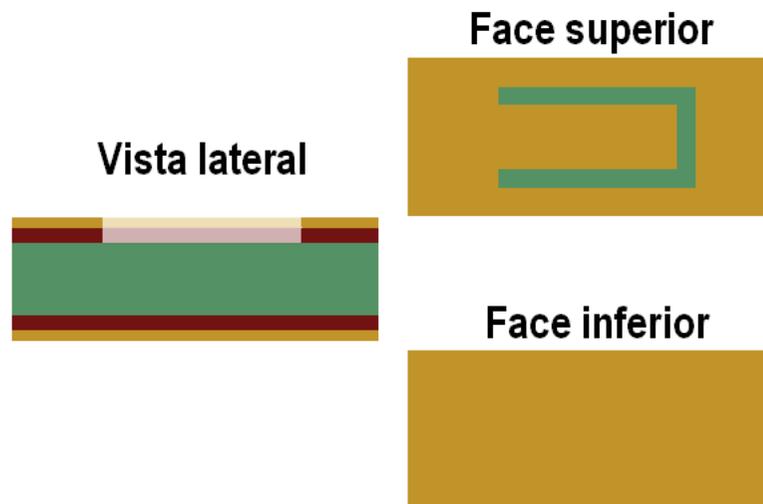


# Micromaquinagem no Silício: Corrosão



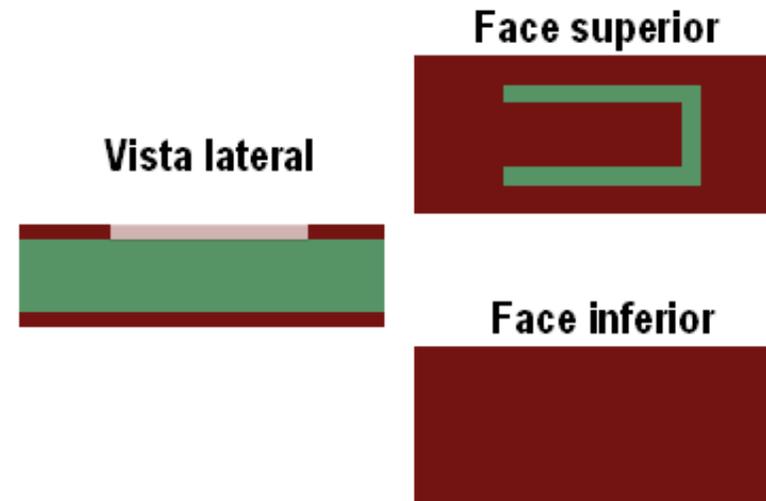
# Micromaquinagem no Silício: Corrosão

Corrosão isotrópica do  $\text{SiO}_2$  com HF



(E)

Remoção do Fotoresiste em Acetona



(F)

# Micromaquinagem no Silício: Corrosão

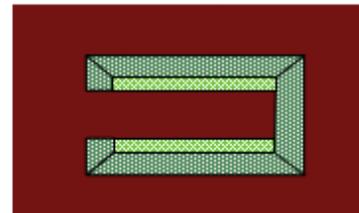
Corrosão  
anisotrópica do Si

Vista lateral



Corrosão do Si  
realizada (com KOH)

Face superior



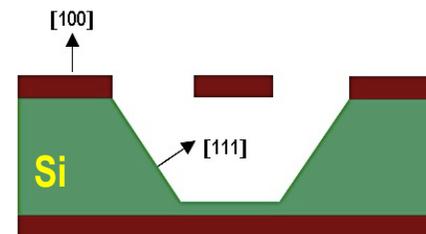
Face inferior



(G)

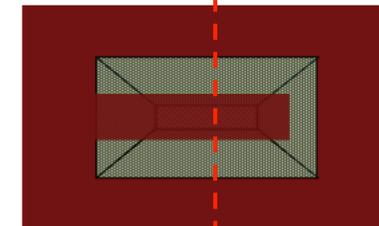
Configuração Final

Vista lateral



----- Secção Transversal

Face superior



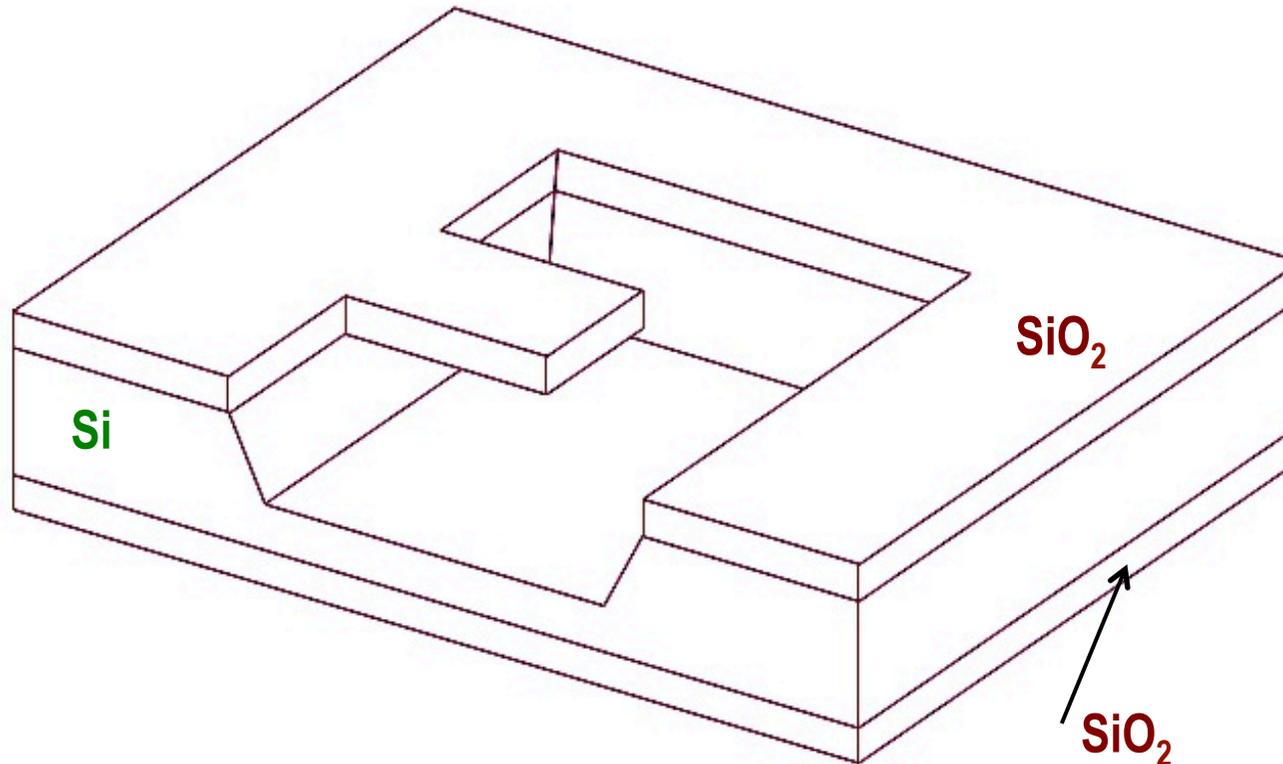
Face inferior



(H)

# Micromaquinagem no Silício: Corrosão

## Configuração final da Prancha



# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

- **Micromaquinagem superficial** (*surface micromachining*): neste caso, são previamente formadas estruturas sobre o substrato através da deposição de várias camadas de materiais (usando as diferentes técnicas já estudadas de deposição de filmes finos), com formas controladas através do processo de fotolitografia. Uma das camadas deve ser de um **material sacrificial**, o qual pode ser corroído sem afetar os outros materiais. Dessa forma, a corrosão do material sacrificial liberta espaço para permitir a exposição de algumas estruturas. O polissilício é muito utilizado para a camada de estrutura (depositado por CVD), enquanto que para a camada de sacrifício, a escolha recai no  $\text{SiO}_2$  (depositado por CVD ou por oxidação térmica).

# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

- Com esta técnica consegue-se obter estruturas 3D mais pequenas e complexas do que com a micromaquinagem volúmica, uma vez que é possível realizar várias deposições das camadas de polissilício muito finas. Um exemplo da aplicação da micromaquinagem superficial consiste na fabricação de MEMS com estruturas complexas, tal como a estrutura **Comb-Drive** ou **pranchas** simples (vigas) para a fabricação de **pontas de AFM**.
- A figura seguinte ilustra um exemplo da **micromaquinagem superficial**, nomeadamente a construção de uma prancha simples.

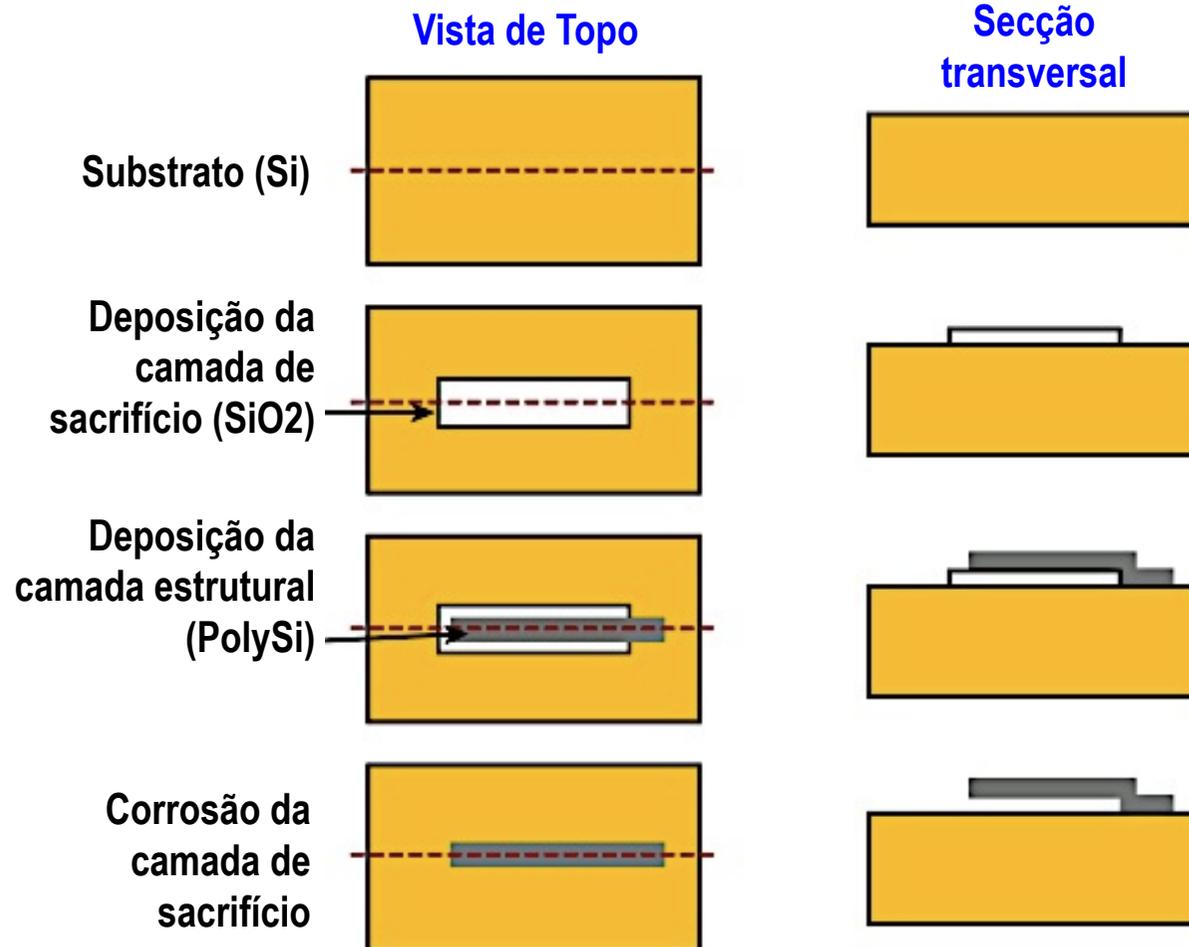
# Micromaquinagem no Silício:

## Corrosão

- Para a *construção da prancha (cantilever)* começa-se por depositar uma camada de  $\text{SiO}_2$  (ex. por oxidação térmica ou por CVD) na superfície do wafer. Em seguida, uma camada de polissilício é então depositada e padronizada. Finalmente, o wafer é então atacado com ácido fluorídrico (HF), que por corrosão isotópica corrói a camada de  $\text{SiO}_2$  por debaixo do polissilício, destacando-o. A figura da pág. seguinte apresenta a sequência muito simplificada deste processo executado por micromaquinagem superficial.

# Micromaquinagem no Silício: Corrosão

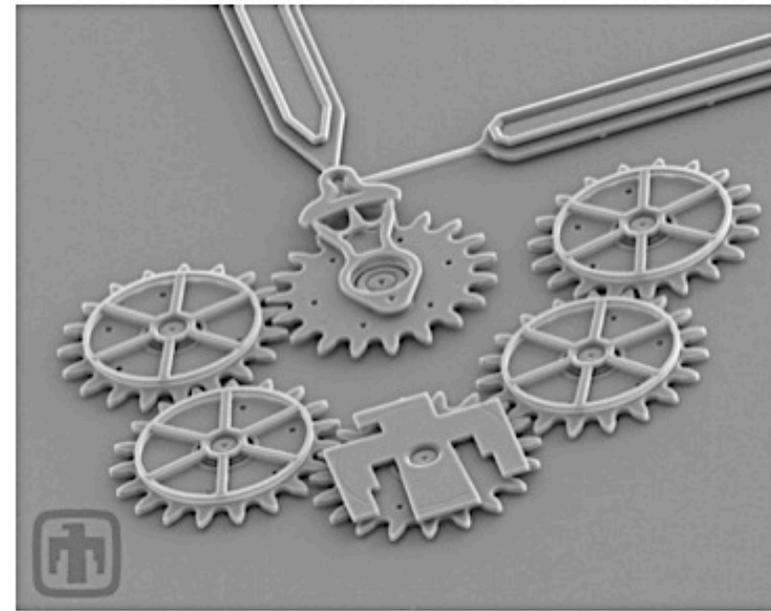
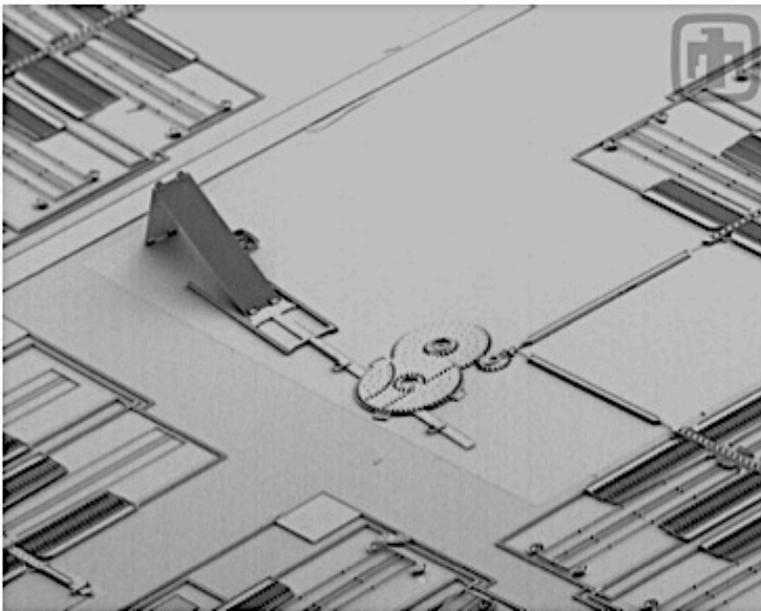
Micromaquinagem Superficial



Seqüência muito simplificada

# Micromaquinagem no Silício: Corrosão

- Exemplos de estruturas complexas fabricadas por *micromaquinagem superficial*



## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atómica (AFM) para inspecção topográfica de superfícies



88

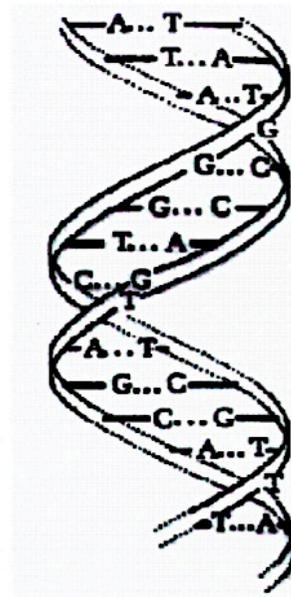
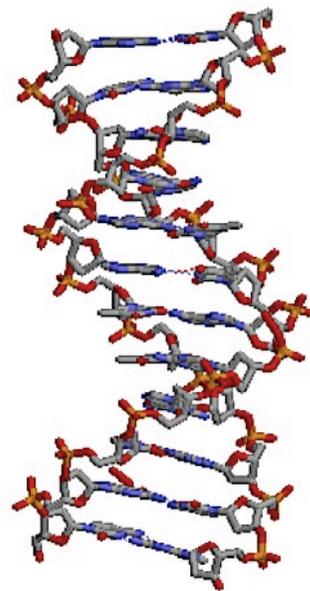
> A **Microscopia de Força Atómica (AFM)** pode ser aplicada ao estudo dos processos de adsorção de **diferentes tipos de moléculas** na superfície de sensores electroquímicos (eléctrodos de carbono) sendo também muito utilizada em tecnologia de **biossensores** e outras aplicações da **medicina**. Os biossensores são dispositivos que incluem um receptor e um sensor. Os biossensores com DNA utilizam os ácidos nucleicos como agente biológico de reconhecimento, para detectar compostos químicos, normalmente por intermédio de um sensor eléctrico, térmico ou químico.

## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atómica (AFM) para inspecção topográfica de superfícies

> Os **biossensores electroquímicos** com DNA despoletaram uma atenção especial, dada a sua aplicação na detecção de danos no DNA em diagnósticos clínicos, no controlo de qualidade dos alimentos, na detecção dos agentes poluentes no meio ambiente, na investigação da interacção dos fármacos com o DNA e na monitorização directa dos processos de hibridização. A imobilização e estabilização das moléculas de ácidos nucleicos na superfície do sensor electroquímico (o eléctrodo) tem grande importância na construção de um biossensor electroquímico com DNA.

## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atómica (AFM) para inspecção topográfica de superfícies

> O fenómeno de adsorção de DNA na superfície de eléctrodos sólidos permite a modificação das propriedades químicas e estruturais do sensor e apresenta importância fundamental na compreensão de muitos processos fisiológicos.



- Modelo tridimensional do DNA proposto em 1953, por James Watson e Francis Crick, descrevendo a estrutura da forma B do DNA.

## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atómica (AFM) para inspecção topográfica de superfícies



91

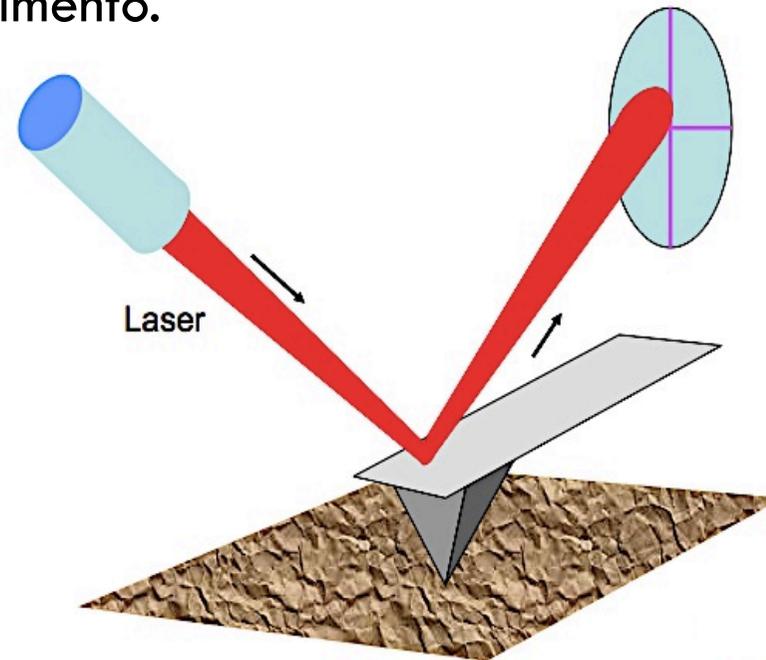
> O AFM constitui uma técnica que foi desenvolvida por Binnig, Quate e Gerber em 1986, e surgiu como o resultado de uma colaboração entre a IBM e a Universidade de Stanford. Trata-se de uma técnica que permite obter **imagens reais, em 3D, da topografia das superfícies**, com uma resolução espacial que se aproxima das dimensões atómicas. Por exemplo, o microscópio de força atómica permite efectuar a caracterização das propriedades interfaciais de um sensor electroquímico (eléctrodo), possibilitando a observação directa da arquitectura da superfície. Por consequência, a técnica de AFM pode fornecer informações muito importantes sobre a morfologia da superfície de **eléctrodos modificados com moléculas biológicas**.

## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atómica (AFM) para inspecção topográfica de superfícies

92

- Em AFM é efectuado o varrimento da superfície da amostra utilizando uma sonda sensível à força (sensor de força), que consiste numa ponta de dimensões atómicas que é integrada num braço (**prancha ou ponteira**) em movimento.

> A ponteira é deflectida devido às interacções da ponta com os átomos da superfície.

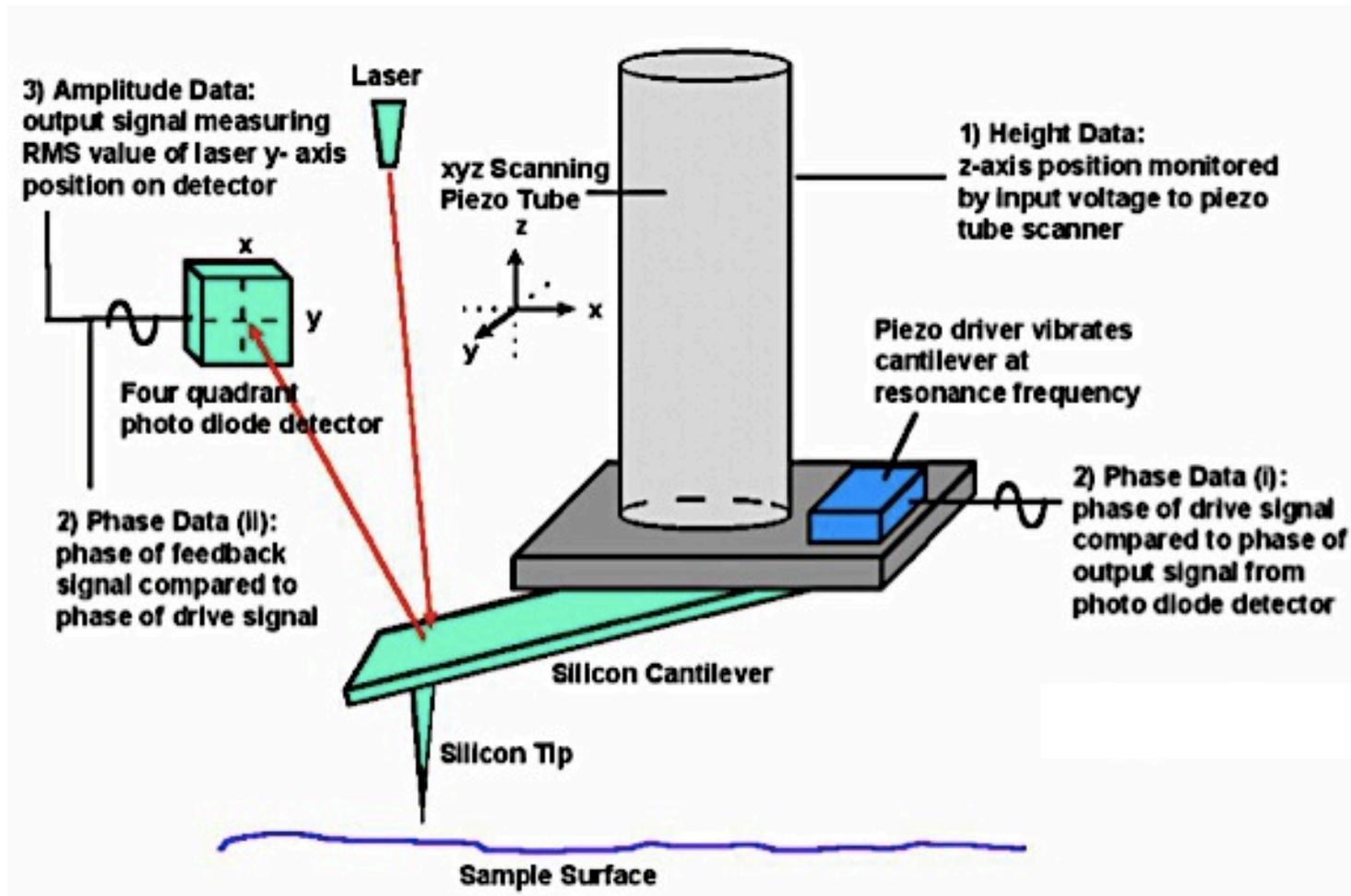


> Princípio de funcionamento do AFM

## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atómica (AFM) para inspecção topográfica de superfícies

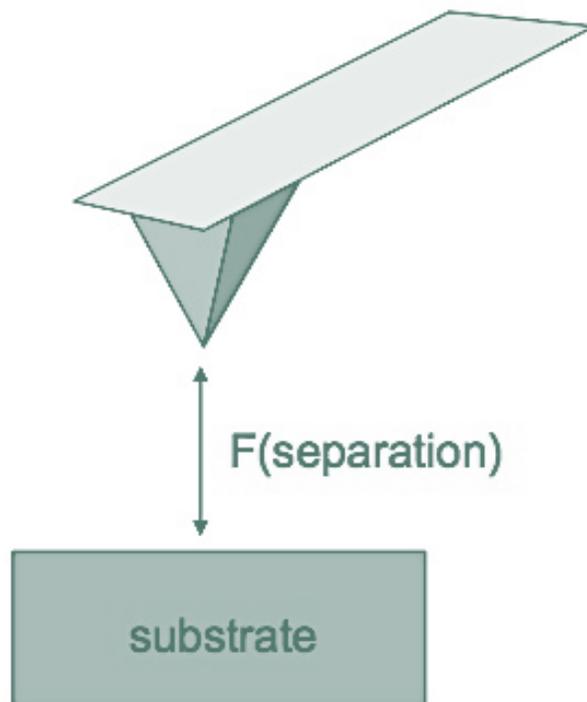
- À medida que a ponta se aproxima da superfície, os átomos da ponta interagem com os átomos e as moléculas da superfície do material, causando a deflexão do braço de AFM. A deflexão do braço de AFM é medida através da mudança de direcção (angular) de um feixe laser emitido por um díodo de estado sólido, refletido pelo braço de AFM, e posteriormente captado por um fotodetector. A sonda de AFM segue os contornos da superfície. Durante o movimento da ponta pela superfície, um computador analisa em cada posição na superfície, a força de interacção entre a ponta de AFM e a amostra e traça um diagrama de cotas, construindo assim topografia da superfície da amostra.

# Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atômica (AFM) para inspeção topográfica de superfícies



# Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atômica (AFM) para inspeção topográfica de superfícies

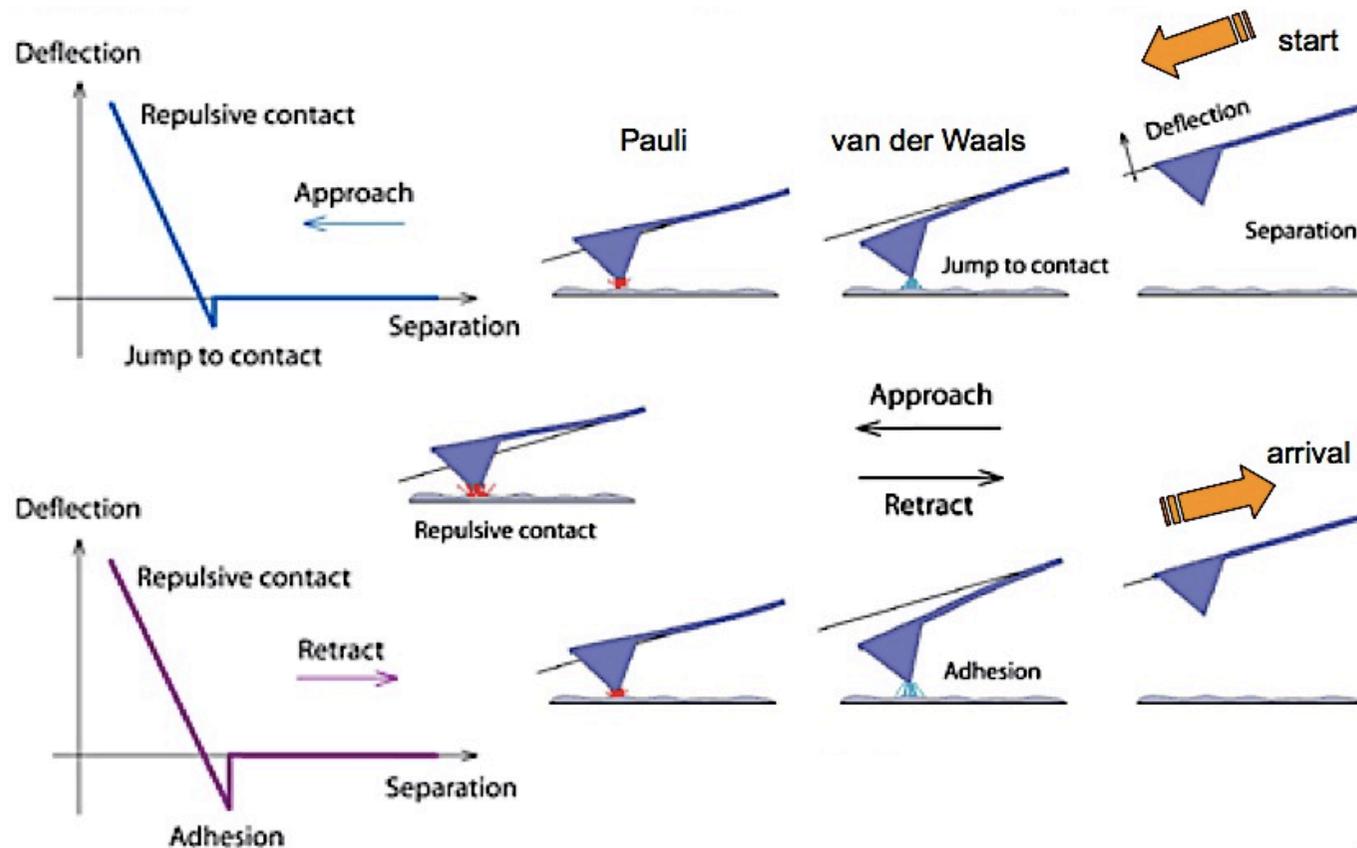
## Natureza das Forças Envolvidas



- > **Forças Electrostáticas**, centenas de nanómetros
- > **Forças de Van der Waals** (sempre atractivas), dezenas de nanómetros
- > **Forças Químicas** (ligação química), alguns angstroms
- > **Forças repulsivas de Pauli** (impenetrabilidade de dois corpos)

# Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atômica (AFM) para inspeção topográfica de superfícies

## Natureza das Forças Envolvidas



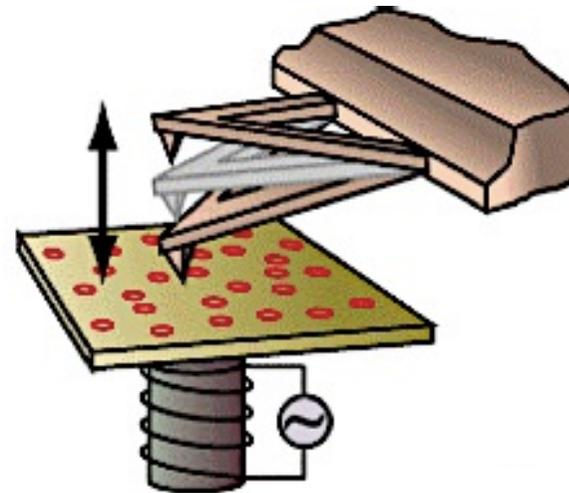
## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atômica (AFM) para inspeção topográfica de superfícies

- O **modo magnético** de corrente alterna de AFM (modo MAC de AFM – Magnetic AC Mode AFM) é uma nova técnica de AFM desenvolvida para a investigação de *moléculas biológicas frágeis*. Em modo MAC de AFM é induzida uma oscilação no braço AFM, com uma frequência próxima da sua frequência de ressonância, por intermédio de um campo magnético controlado por uma bobine colocado por debaixo do suporte da amostra.

## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atômica (AFM) para inspeção topográfica de superfícies

> Durante o varrimento da amostra, o braço de AFM mantém o movimento oscilatório, **tocando a amostra apenas uma vez em cada ciclo de oscilação**, diminuindo a interação com a superfície e minimizando os danos provocados nas **amostras biológicas**.

Modo magnético de corrente alternada do AFM (MAC)

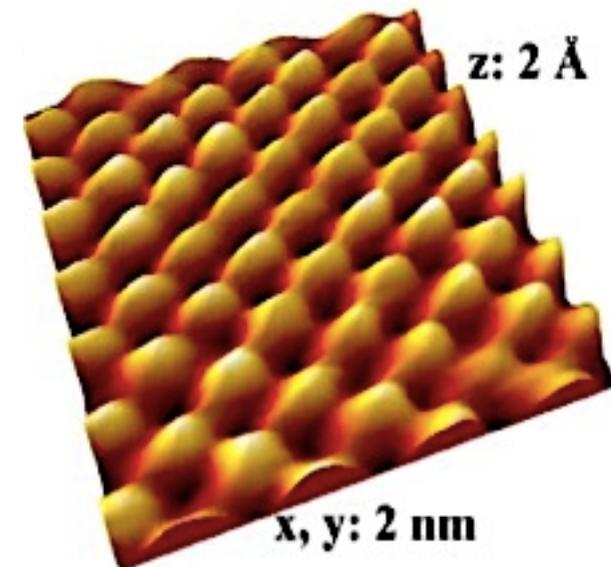


## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atómica (AFM) para inspecção topográfica de superfícies

- Para ser possível efectuar a investigação por técnicas de microscopia, as ***moléculas biológicas*** devem ser immobilizadas na superfície de um substrato sólido muito plano, com resolução atómica. Por exemplo, um substrato de grafite pirolítica altamente orientada (**HOPG**) apresenta uma estrutura atómicamente plana, inerte em ar, fácil de limpar, com uma morfologia homogénea e ordenada à escala atómica com um arranjo regular e periódico dos átomos.

Joaquim Carneiro

> Imagem topográfica (AFM) do eléctrodo de HOPG mostrando arranjo hexagonal dos átomos de carbono.

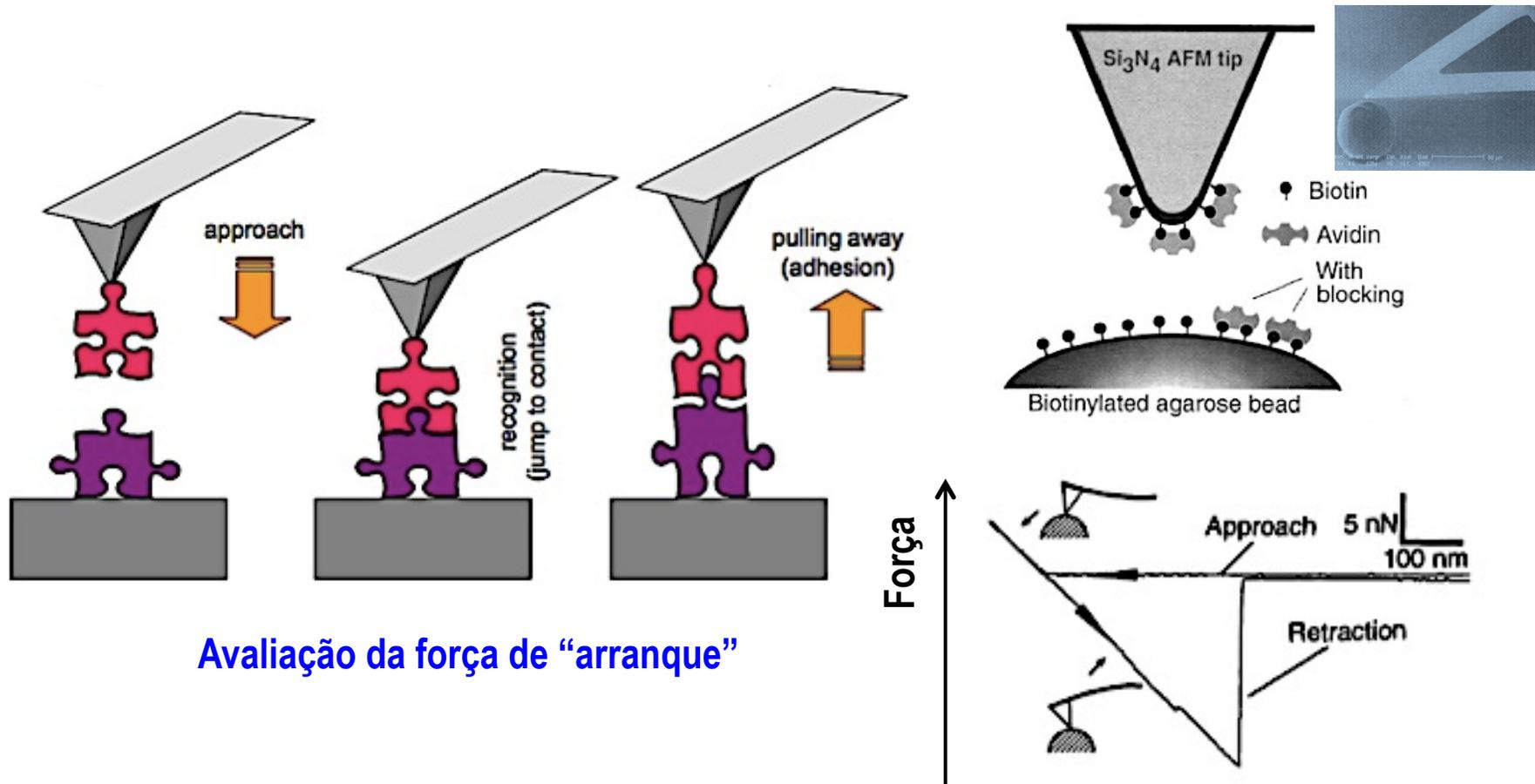


> O HOPG representa uma óptima escolha para a investigação do processo de adsorção do DNA.

MEMS

# Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atômica (AFM) para inspeção topográfica de superfícies

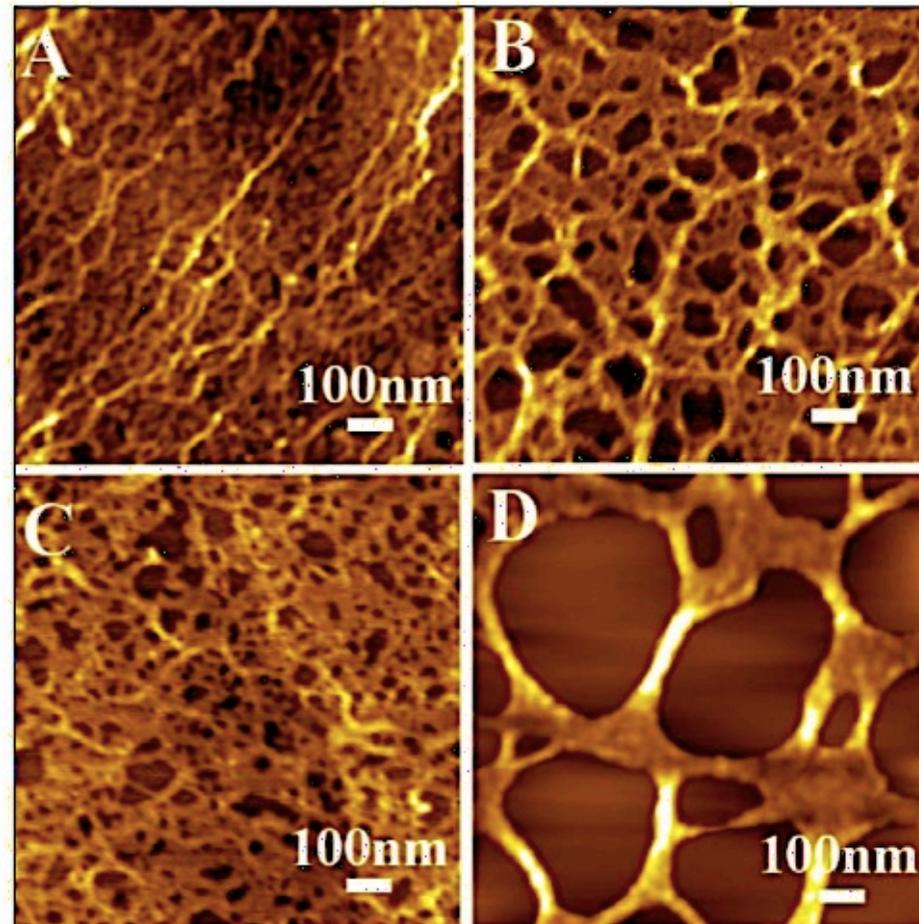
## Reconhecimento Molecular



Avaliação da força de “arranque”

## Aplicação: Utilização de pranchas (ponteiras) em microscopia de força atômica (AFM) para inspeção topográfica de superfícies

> Imagens topográficas de DNA, obtidas em ar, com o modo MAC de AFM. O DNA foi imobilizado na superfície de HOPG, por adsorção durante 3 min, a partir duma solução de 60 mg/mL DNA em electrólito suporte de 0,1 M: (1) adsorção espontânea: (A) tampão acetato pH 5.3 e (B) tampão fosfato pH 7,0; (2) adsorção com potencial de +300 mV (C) tampão acetato pH 5.3 e (D) tampão fosfato pH 7,0.

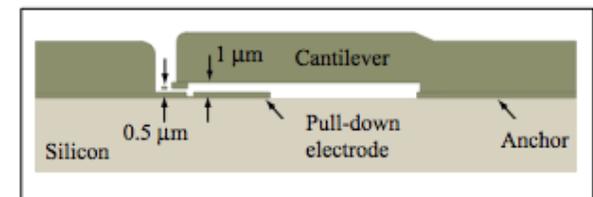




## Capítulo 2: ESTRUTURAS MECÂNICAS: APLICAÇÃO A MEMS

**UNIVERSIDADE DO MINHO**  
**Departamento de Física**

**Física Aplicada em Biodispositivos Baseados em MEMS**





# SUMÁRIO

2

- Flexão de vigas
  - Cargas e apoios
  - Momentos flectores e forças de corte
  - Curvatura e equação fundamental
  - Exemplos: Vigas e vigas biencastradas

# Elasticidade – Materiais isotrópicos

3

- Para o caso geral de carga, as relações constitutivas entre as tensões e as deformações são as seguintes:
- 6 equações, uma para cada tensão e de corte

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx}$$

Módulo de corte

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

# Campo de estudo

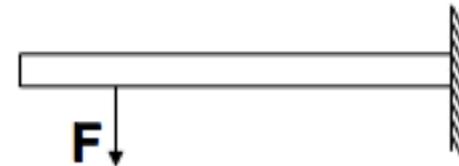
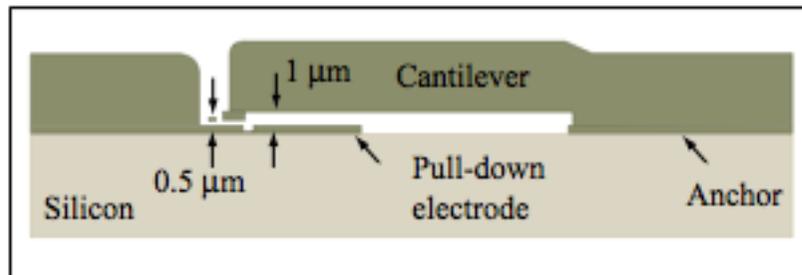
4

- > Flexão no limite de pequenas deformações
- > Para carga axial, as deflexões são pequenas até que:
  - Ocorra não - linearidade, deformação plástica, ruptura, encurvadura
  - As deformações são tipicamente da ordem de 0,1% a 1%
- > Para a flexão, as pequenas deflexões são normalmente menores do que a espessura da estrutura considerada (i.e. viga, placa)

# A nossa trajectória

5

- O que são cargas e apoios ?



> O que é um momento flector no ponto X ao longo da Viga ?

> Que tipo de curvatura é gerada no ponto X da estrutura em estudo pelo momento flector (equação da viga) ?



# SUMÁRIO

6

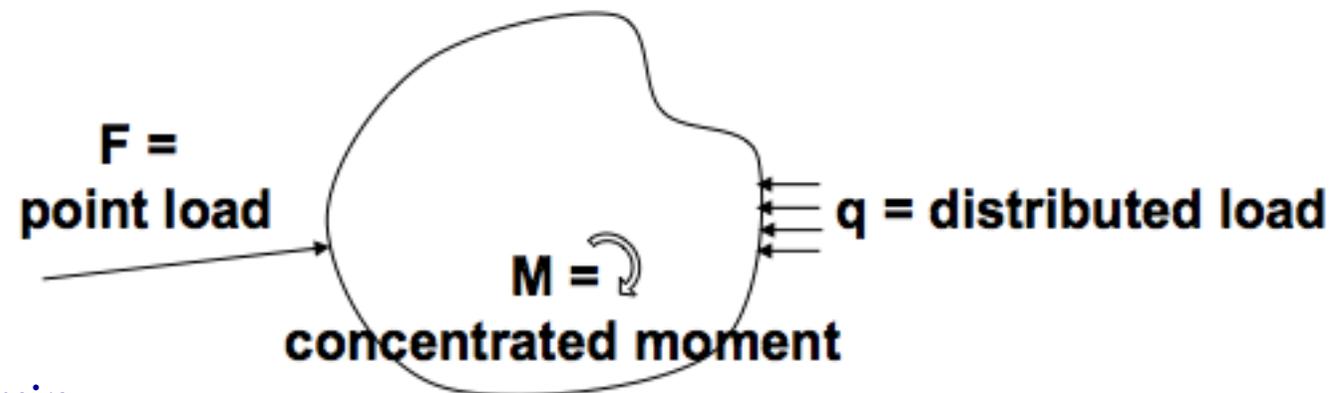
## □ Flexão de vigas

- **Cargas e apoios**
- **Momentos flectores e forças de corte**
- Curvatura e equação fundamental
- Exemplos: Vigas e vigas biencastradas

# Tipos de Carga

7

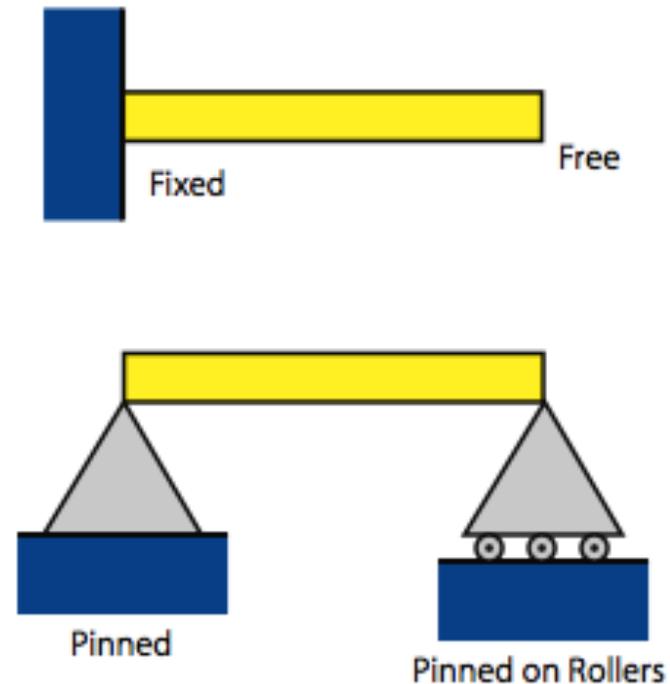
- Basicamente existem três tipos de carga (forças):
  - Carga pontual;
  - Cargas distribuídas (pressão);
  - Binário (momento concentrado).
- As forças e momentos “trabalham” conjuntamente para produzirem momentos internos à estrutura



# Tipos de apoios

8

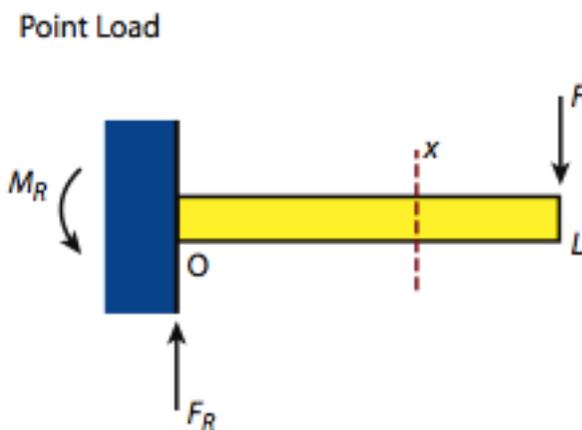
- Existem quatro condições de fronteira fundamentais:
  - Encastramento (Fixed): não ocorre movimento de translação nem de rotação
  - Apoio duplo (Pinned): não ocorre movimento de translação, mas ocorre rotação (como numa rótula)
  - Apoio simples (Pinned on rollers): ocorre translação e rotação
  - Livre (Free): sem condição de fronteira



# Reacções e Momentos

9

- O equilíbrio estático requer que a resultante das forças e momentos (em torno de um eixo) que actuam na estrutura sejam nulos;
- Esta situação origina forças e momentos de reacção;
- O termo “não pode transladar” significa que os apoios exercem forças de reacção;
- O termo “não pode rodar” significa que os apoios exercem momentos de reacção:



Joaquim Carneiro

Total moment about support :

$$M_T = M_R - FL$$

Moment must be zero in equilibrium :

$$M_R = FL$$

Net force must be zero in equilibrium :

$$F_R = F$$

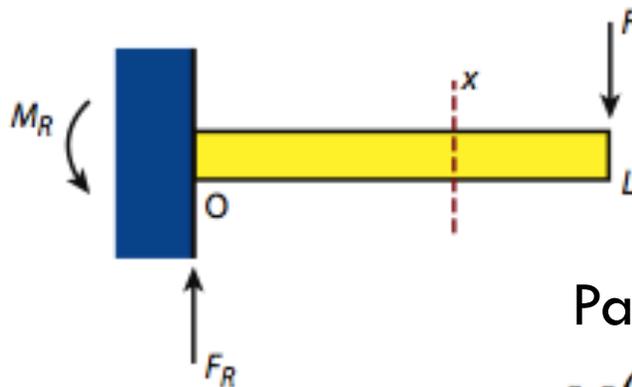
MEMS

# Forças internas e momentos

10

- Cada secção da viga deve também estar em equilíbrio;
- Esta condição origina forças internas de corte  $V(x)$  e momentos flectores  $M(x)$ .

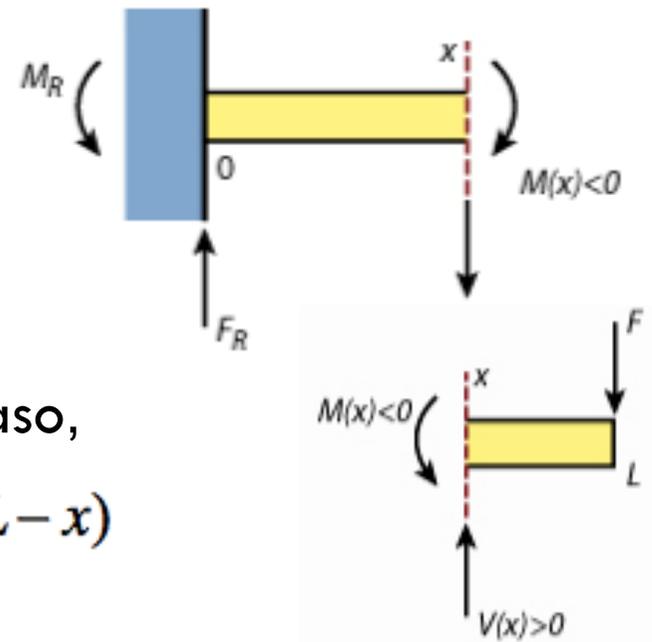
Point Load



Para este caso,

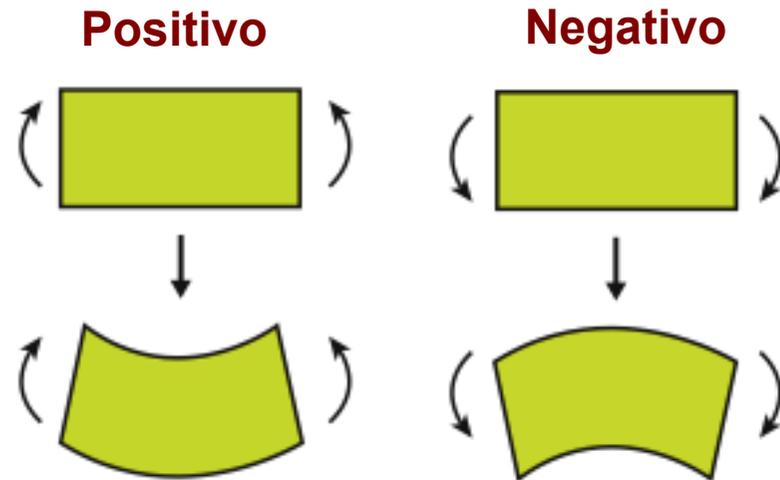
$$M(x) = -F(L - x)$$

$$V(x) = F$$



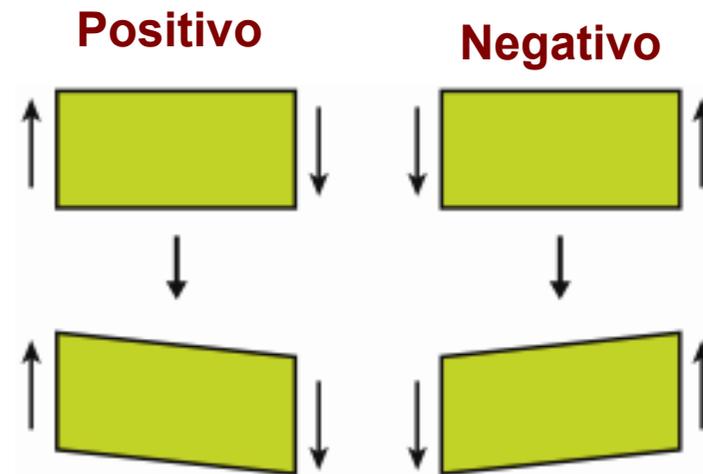
# Convenção de sinais

11



Momentos flectores (M)

Esforços transversos (V)



# Combinando todas as cargas

12

- Um elemento diferencial de viga, sujeito a cargas pontuais, cargas distribuídas e momentos estará em equilíbrio se obedecer às seguintes equações:

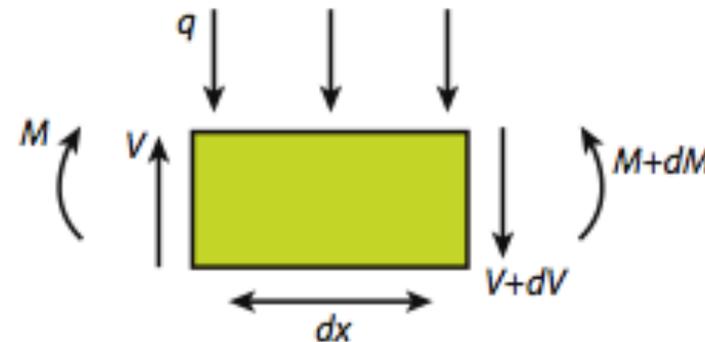
$$F_T = V - (V + dV) - q dx = 0$$



$$\frac{dV}{dx} = -q$$



$$V = - \int q dx$$



$$M_T = (M + dM) - M - (V + dV) dx - \cancel{\frac{q dx}{2} dx} = 0$$



$$\frac{dM}{dx} = V$$



$$M = \int V dx$$



# SUMÁRIO

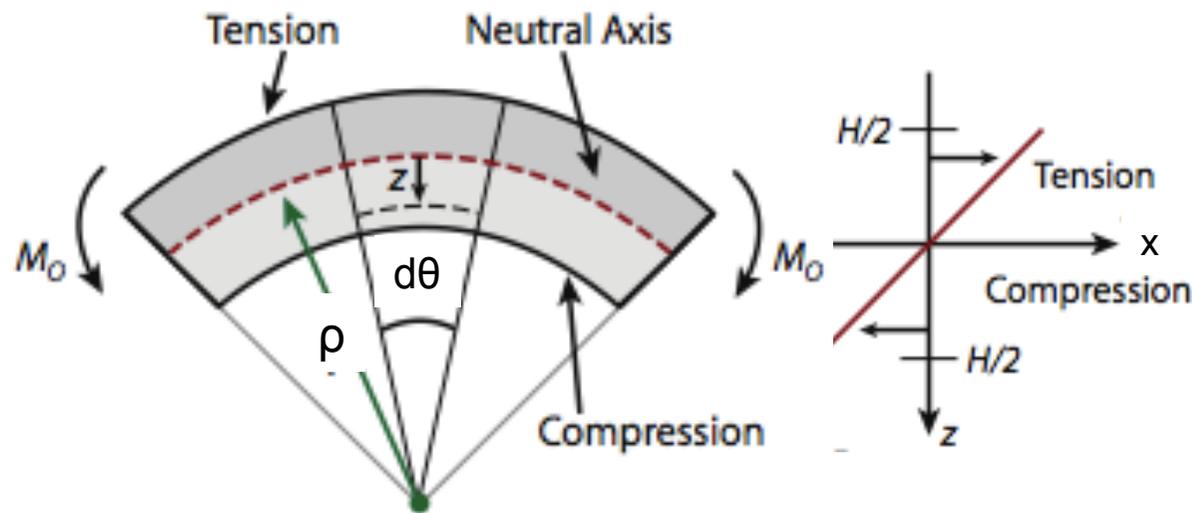
13

- Flexão de vigas
  - Cargas e apoios
  - Momentos flectores e forças de corte
  - **Curvatura e equação fundamental**
  - **Exemplos: Vigas e vigas biencastradas**

# Flexão pura

14

- Conceito importante: **O EIXO NEUTRO**
- As tensões normais variam com a distância ao eixo neutro



$$\begin{cases} dx = \rho d\theta \\ dL = (\rho - z) d\theta \end{cases}$$

$$\varepsilon_x = \frac{dL - dx}{dx} = -\frac{z}{\rho}$$

$$\sigma_x = E \varepsilon_x = -\frac{z E}{\rho}$$

# Determinação do eixo neutro

15

- Em flexão pura, a localização do eixo neutro é obtida através do equilíbrio das forças normais ( $W$  é a largura da secção transversal)

> Para materiais isotrópicos e com secção transversal simétrica, o eixo neutro **localiza-se no centro geométrico da secção transversal**

- Para materiais compósitos (diferentes  $E$ ), o eixo neutro não se localiza no centro geométrico da secção transversal

$$N = \int_A \sigma(z) dA = 0$$

$$-\frac{E W}{\rho} \int_{\text{espessura}} z dz = 0$$

# Curvatura em flexão pura

16

- A curvatura está directamente relacionada com o momento flector,  $M$

## Para materiais isotrópicos

Momento flector

$$M = \int_A z \sigma_x dA$$



$$M = -\frac{E}{\rho} \int_A z^2 dA$$

Tensão normal

$$\sigma_x = -\frac{z E}{\rho}$$

$$M = -\frac{E I}{\rho}$$

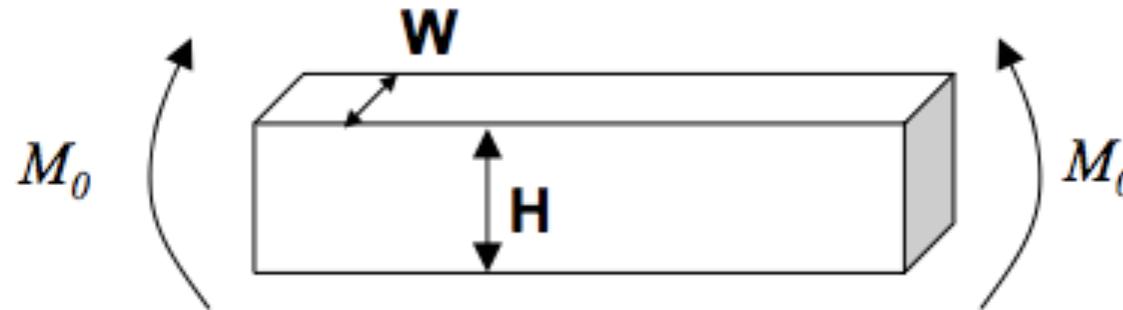
**Momento de inércia**

$$I = \int_A z^2 dA$$

# Exemplo: Viga de secção rectangular

17

- Condição de carga: Momento externo,  $M_0$



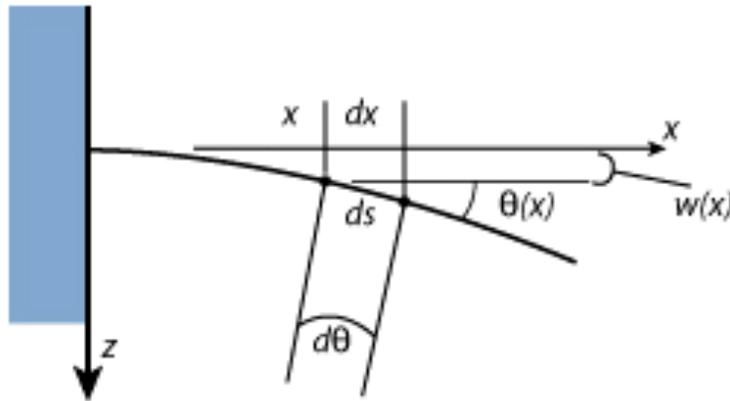
$$I = \int_{-H/2}^{H/2} W z^2 dz = \frac{W}{3} [z^3]_{-H/2}^{H/2} = \frac{WH^3}{12}$$

$$M = - \left( \frac{WH^3}{12} \right) \frac{E}{\rho}$$

# Flexão: Equação diferencial

18

> Relação entre a curvatura e a carga aplicada



$$ds = \frac{dx}{\cos \theta} \approx dx$$

$$\frac{dw}{dx} = \tan \theta \approx \theta$$

$(1/\rho) = \text{curvatura}$

$$ds = \rho d\theta \rightarrow \frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{\rho} \Leftrightarrow \frac{d}{dx} \left( \frac{dw}{dx} \right) = \frac{1}{\rho} \Leftrightarrow \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{1}{\rho}$$

Joaquim Carneiro

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

Equação da linha elástica

derivando uma vez:

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = -\frac{V}{EI}$$

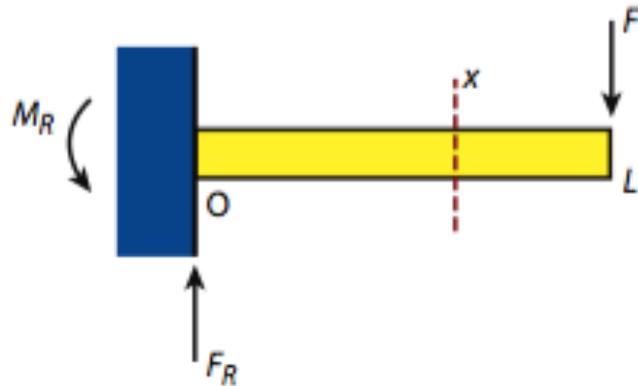
derivando novamente:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = -\frac{q}{EI}$$

MEMS

# Exemplo: Viga encastrada sujeita a carga concentrada

19



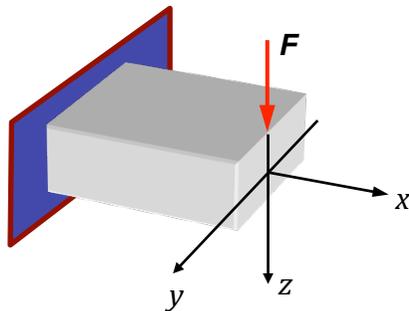
$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad \text{e} \quad M(x) = -F(L-x)$$

$$V(x) = F$$

[curvatura]:  $\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{F}{EI}(L-x) \rightarrow$  integrando

[rotação]:  $\frac{dw}{dx} = -\frac{F}{2EI}x^2 + \frac{FL}{EI}x + C_1 \rightarrow$  integrando

[deslocamento]:  $w = -\frac{F}{6EI}x^3 + \frac{FL}{2EI}x^2 + C_1x + C_2$



condições de fronteira:  $w(x=0) = 0$  ;  $\left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = 0$

logo:  $C_1 = C_2 = 0$

então:  $w = \frac{F}{6EI}(3Lx^2 - x^3)$

# Constante elástica de uma viga

20

- Atendendo a que a força é aplicada na extremidade da viga, o deslocamento máximo ( $w_{\max}$ ) ocorre nesse ponto ( $x = L$ ). No regime elástico, a razão entre a força e  $w_{\max}$  designa-se por constante elástica,  $k$ .

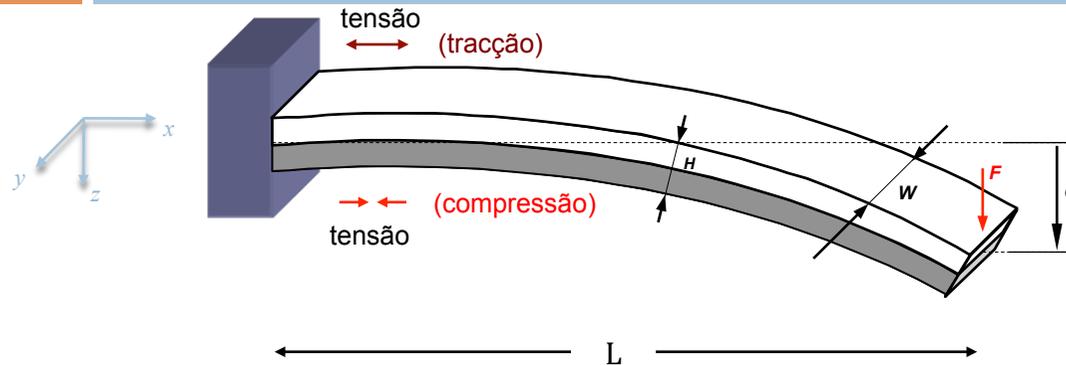
$$w_{\max} = \left( \frac{L^3}{3EI} \right) F \quad \Rightarrow \quad k = \frac{3EI}{L^3}$$

Viga encastrada  
sujeita a carga  
concentrada

*para secções rectangulares;*  $I = \frac{WH^3}{12}$

*então:*  $k = \frac{EWH^3}{4L^3}$

# Estado de tensão: O estado de tensão pode ser obtido através do momento flector, $M$ :



**Viga encastrada:  
valor max.  
ocorre no apoio ( $x=0$ )**

$$\sigma_x = \frac{M}{I} z \quad \Rightarrow \quad \sigma_x = \frac{-F(L-x)}{I} \cdot z \quad \Rightarrow \quad \sigma_{\max} = \frac{-FL}{I} \cdot z$$

$$\sigma_x = E \varepsilon_x = -\frac{zE}{\rho}$$

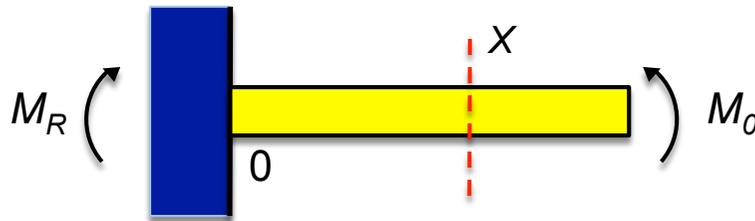
$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

$$\sigma_{\max}^{z=+H/2} = \frac{-FL}{I} \left( \frac{H}{2} \right) = -\frac{FLH}{2} \cdot \frac{12}{WH^3} = -\frac{6L}{WH^2} F \quad \text{(compressão)}$$

$$\sigma_{\max}^{z=-H/2} = \frac{-FL}{I} \left( \frac{-H}{2} \right) = \frac{6L}{WH^2} F \quad \text{(tracção)}$$

## Exemplo: Viga encastrada sujeita a um binário ( $M_0$ )

22



$$[\text{curvatura}]: \frac{d^2 w}{dx^2} = -M_0 / EI$$

$$[\text{rotação}]: \frac{dw}{dx} = (-M_0 x + C_1) \cdot (1 / EI)$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad ; \quad M(x) = M_0 \quad [\text{deslocamento}]: w = \left( -\frac{1}{2} M_0 x^2 + C_1 x + C_2 \right) \cdot (1 / EI)$$

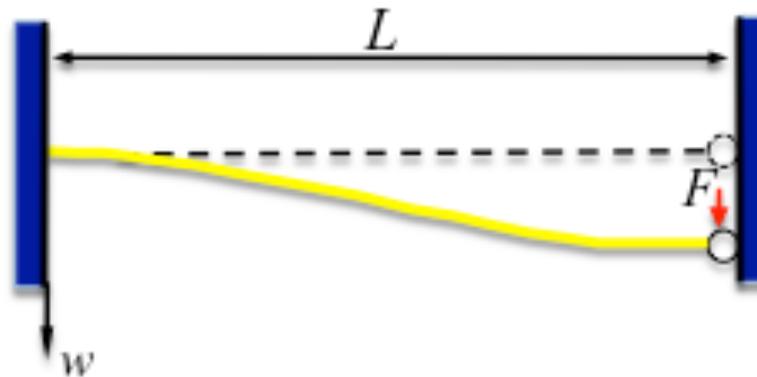
$$\text{Condições de fronteira: } w(x=0) = 0 \quad ; \quad \left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

$$\text{logo: } C_1 = C_2 = 0$$

$$\text{Então: } w = -\frac{M_0}{2EI} x^2$$

## Exemplo: Viga encastrada e guiada

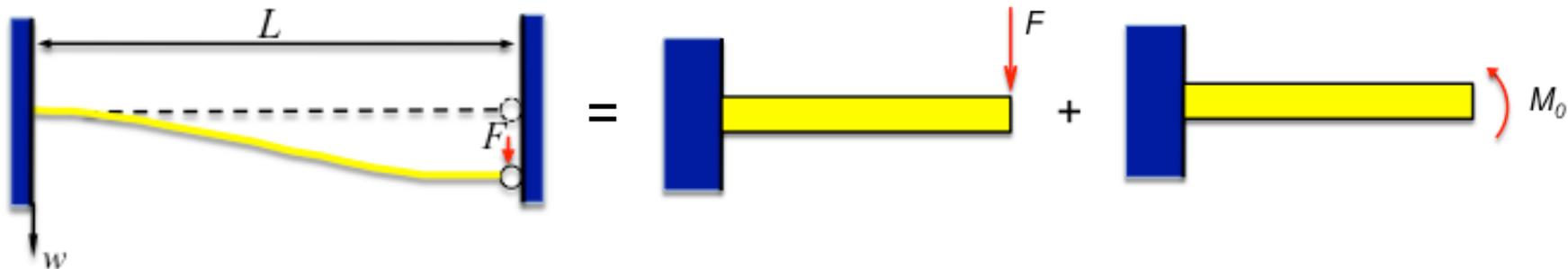
23



> A deflexão da extremidade resulta da sobreposição de dois tipos de deslocamento: o de uma viga encastrada e sujeita a uma **carga concentrada** na sua extremidade, e o de uma viga encastrada sujeita a um **binário** na sua extremidade. Estas duas situações foram já analisadas:

# Exemplo: Viga encastrada e guiada (Cont.)

24



> Para uma viga (comprimento  $L$ , largura  $W$  e espessura  $H$ ) com **carga concentrada** na extremidade:

$$w_1 = \frac{F}{6EI} (3Lx^2 - x^3)$$

> Para uma viga (comprimento  $L$ , largura  $W$  e espessura  $H$ ) com **binário** aplicado na extremidade:

$$w_2 = -\frac{M_0}{2EI} x^2$$

## Exemplo: Viga encastrada e guiada (Cont.)

25

> A deflexão resultante é:  $w = w_1 + w_2 = \frac{F}{6EI} (3Lx^2 - x^3) - \frac{M_0}{2EI} x^2$

> Usando as condições de fronteira:  $\left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=L} = 0 \Leftrightarrow \left. \frac{Fx}{EI} \left( L - \frac{x}{2} \right) - \frac{M_0 x}{EI} \right|_{x=L} = 0$

Ou seja:  $\frac{L}{EI} \left[ F \left( L - \frac{L}{2} \right) - M_0 \right] = 0 \Rightarrow M_0 = \frac{FL}{2}$

> Substituindo na equação da deflexão total, obtém-se:

$$w = \frac{F}{12EI} (3Lx^2 - 2x^3)$$

## Exemplo: Viga encastrada e guiada (Cont.)

26

- O deslocamento máximo ( $w_{\max}$ ) ocorre nesse ponto ( $x = L$ ). No regime elástico, a razão entre a força e  $w_{\max}$  designa-se por constante elástica,  $k$ .

$$w_{\max} = \left( \frac{L^3}{12EI} \right) F \quad \Rightarrow \quad k = \frac{12EI}{L^3}$$

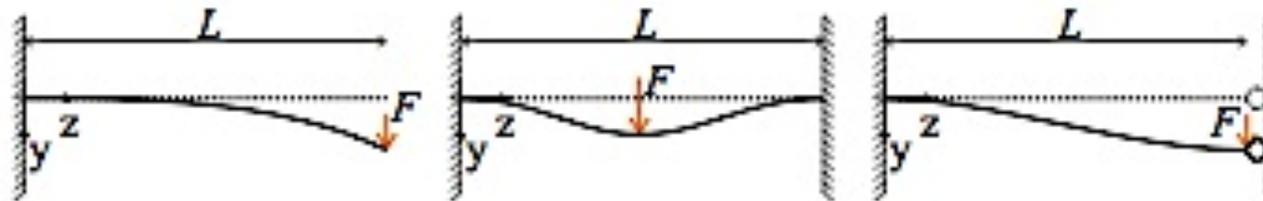
Viga encastrada e guiada

*para secções rectangulares;*  $I = \frac{WH^3}{12}$

*então:*  $k = \frac{EWH^3}{L^3}$

# Algumas soluções tabeladas

27

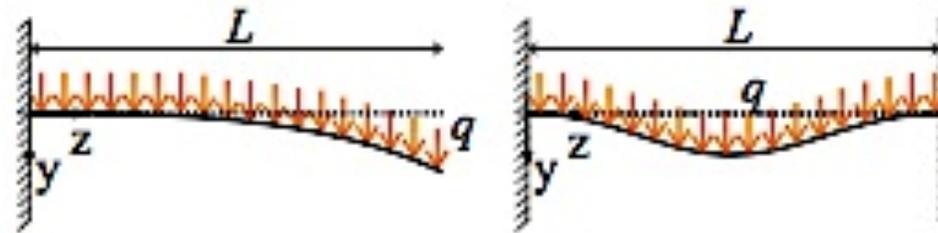


Vigas com diferentes condições de fronteira (viga encastrada, viga biencastrada e viga encastrada e guiada)

| Tipo                | Deflexão                               | Deflexão max.                 | Constante elástica      |
|---------------------|--|-------------------------------|-------------------------|
| Encastrada          | $y = \frac{F}{6EI} (3Lz^2 - z^3)$      | $y(L) = \frac{FL^3}{3EI}$     | $k = \frac{3EI}{L^3}$   |
| Biencastrada        | $y = \frac{F}{192EI} (12Lz^2 - 16z^3)$ | $y(L/2) = \frac{FL^3}{192EI}$ | $k = \frac{192EI}{L^3}$ |
| Encastrada e guiada | $y = \frac{F}{12EI} (3Lz^2 - 2z^3)$    | $y(L) = \frac{FL^3}{12EI}$    | $k = \frac{12EI}{L^3}$  |

# Algumas soluções tabeladas (Cont.)

28



Vigas sujeitas a cargas uniformemente distribuídas e com diferentes condições de fronteira

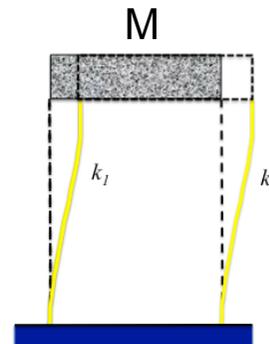
| Tipo         | Deflexão                                     | Deflexão max.                 |
|--------------|--|-------------------------------|
| Encastrada   | $y = \frac{q}{24EI} (z^4 - 4Lz^3 + 6L^2z^2)$ | $y(L) = \frac{qL^4}{8EI}$     |
| Biencastrada | $y = \frac{q}{24EI} (z^4 - 2Lz^3 + L^2z^2)$  | $y(L/2) = \frac{qL^4}{384EI}$ |

# Sistemas combinados

29

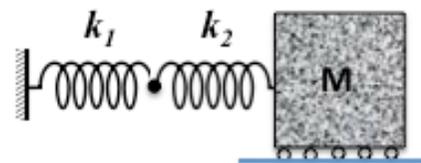
- Para sistemas combinados (vigas associadas de diferentes maneiras e com diferentes condições de apoio) o cálculo da constante elástica equivalente ( $k_{eq}$ ) pode ser complicado.

> Vigas associadas em paralelo:



$$k_{eq} = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$

> Vigas associadas em série:

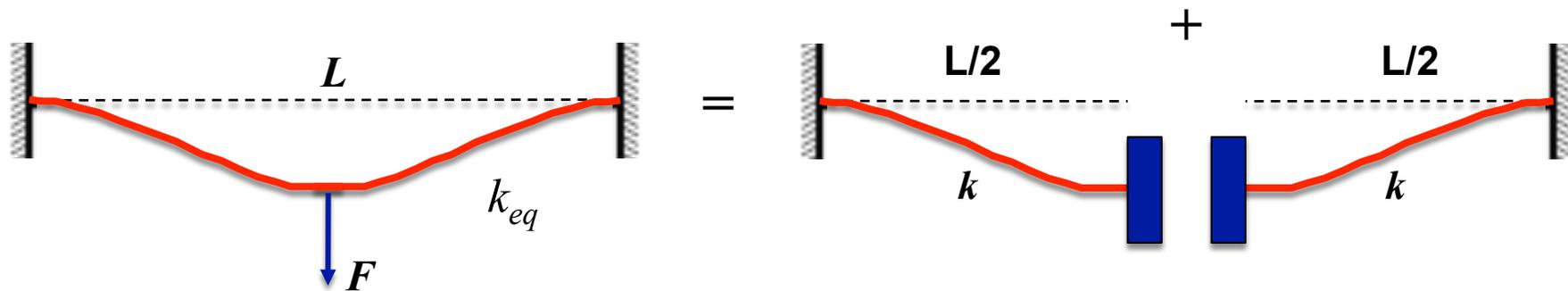


$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

# Sistemas combinados (Cont.)

30

- Exemplos:** A constante elástica de uma viga biencastada pode ser determinada, considerando que resulta da associação em paralelo de duas vigas encastadas e guiadas com comprimento  $L/2$ .



$$k_{eq} = k + k = 2 \times \frac{12EI}{(L/2)^3} = \frac{192EI}{L^3}$$

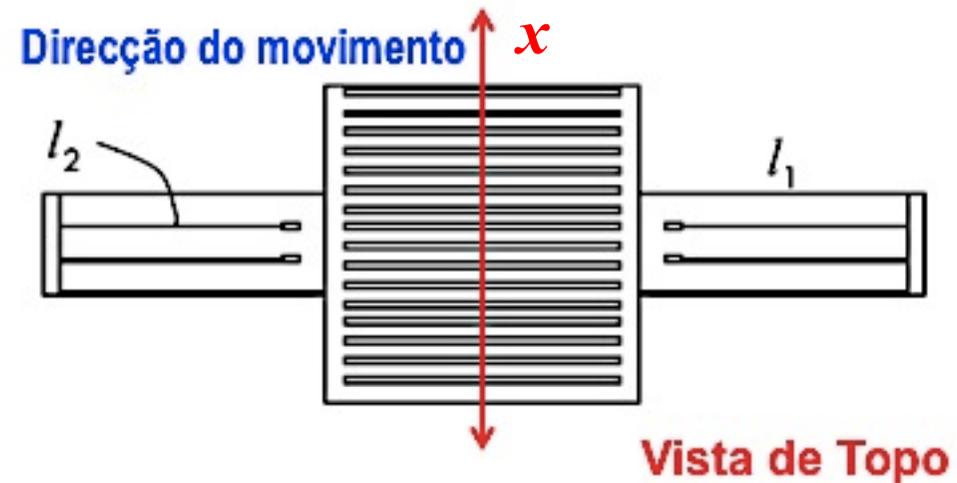
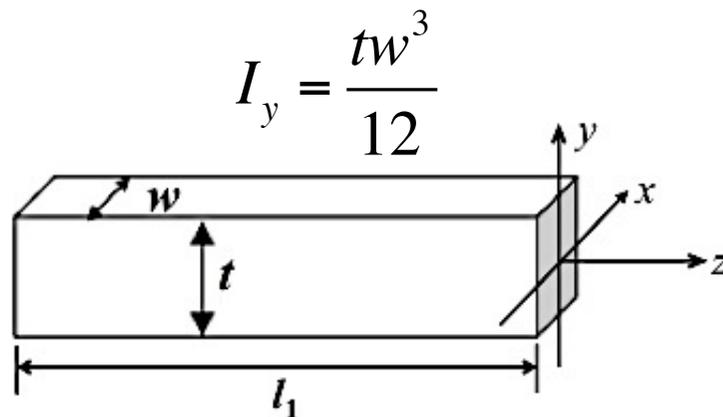
- Muitos **MEMS** - *micro electro mechanical systems* integram na sua constituição elementos de viga que têm a função de funcionarem como suspensões, elementos de transmissão ou articulações. Estes elementos (vigas) podem ser combinados de diversas maneiras. O cálculo da rigidez equivalente de um sistema constituído por diversas vigas pode ser bastante complicado; contudo, existem normalmente simetrias que permitem decompor a suspensão em vigas elementares que se associam em **série** e em **paralelo**.

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS

32

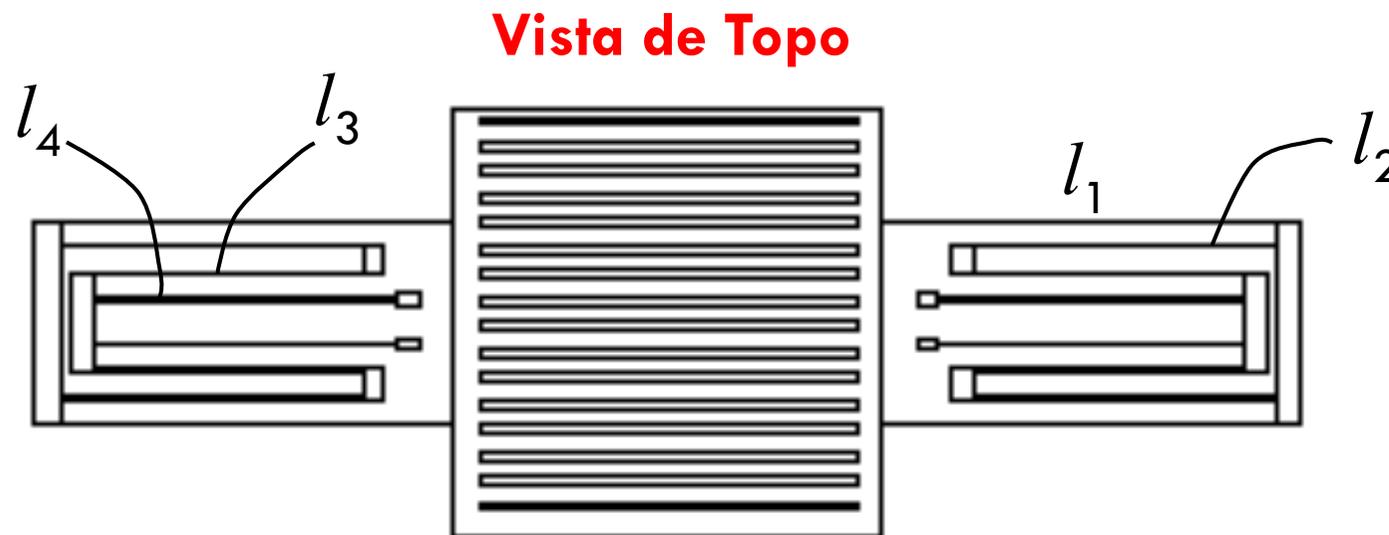
- Em dispositivos MEMS são comuns os seguintes tipos de suspensões:



- a)** Massa sísmica suportada por uma suspensão constituída por um par de feixes de vigas (*folded-beam suspension*)

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

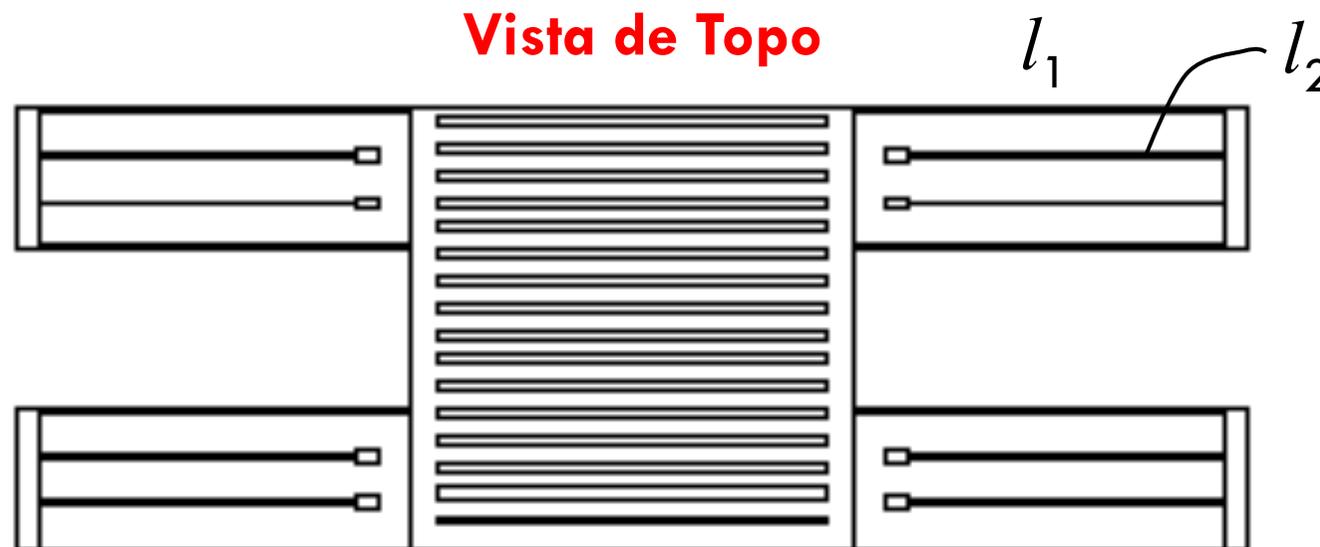
## EXEMPLOS



**b)** Massa sísmica suportada por uma suspensão constituída por um par de um duplo feixe de vigas (*double folded-beam suspension*)

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS

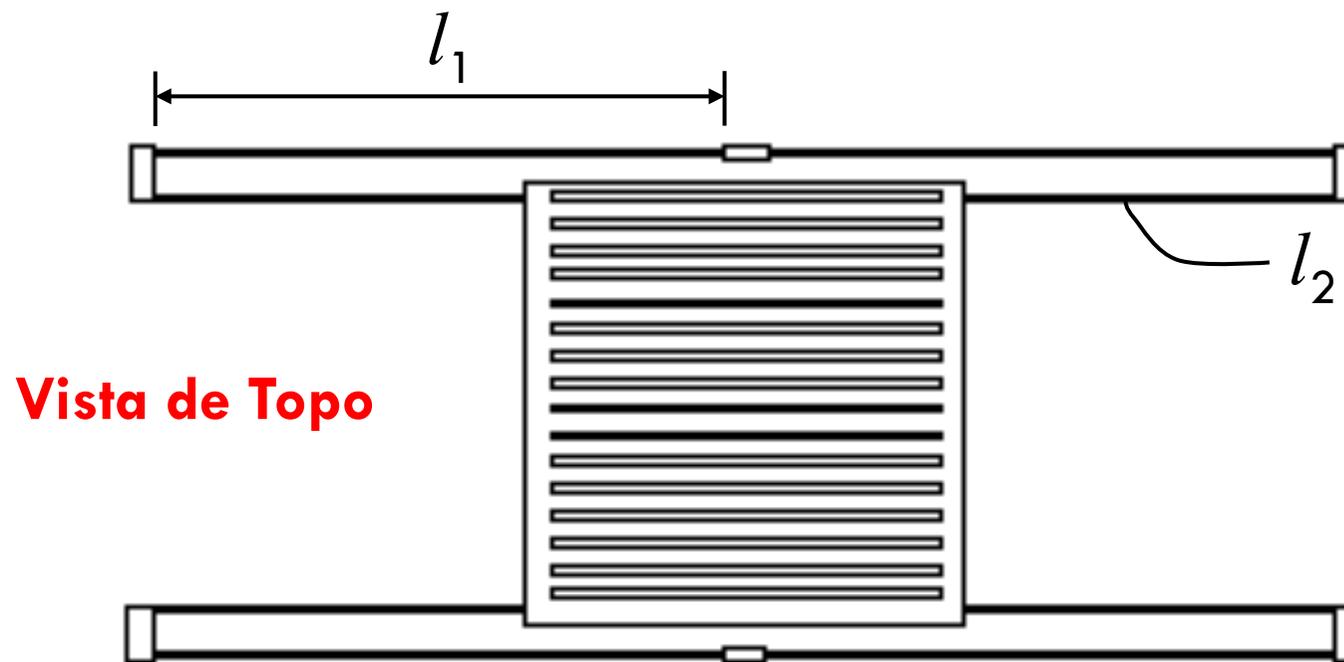


- c)** Massa sísmica suportada por uma suspensão constituída por dois pares de um feixe de vigas (*four folded-beam suspension*)

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS

35



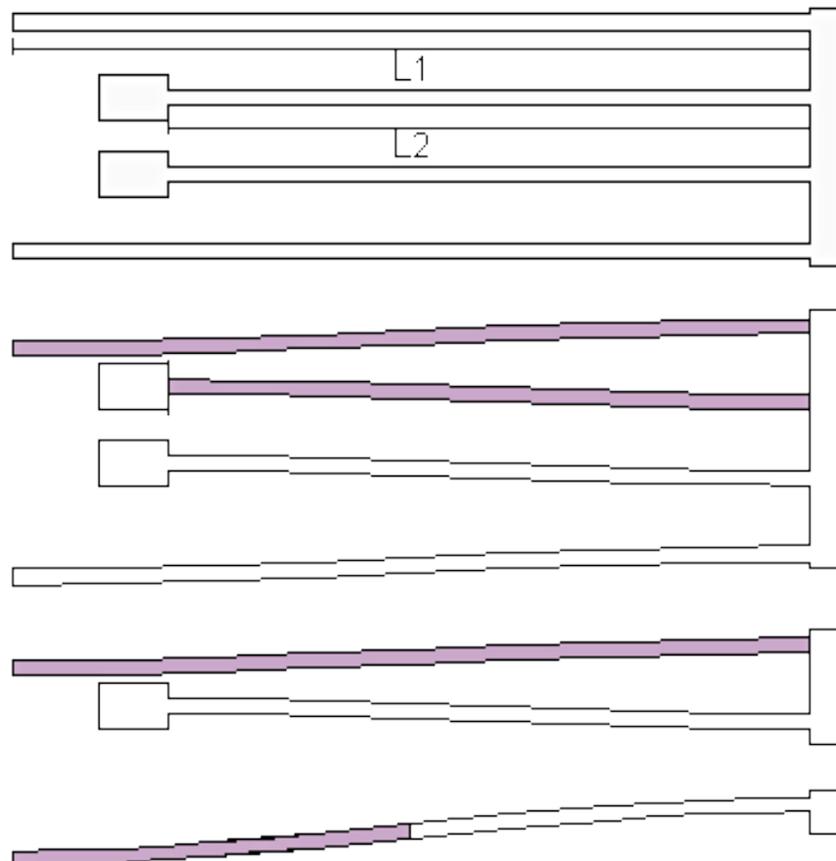
**d)** Massa sísmica suportada por uma suspensão constituída por dois pares de metade de um feixe de vigas (*four half folded-beam suspension*)

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

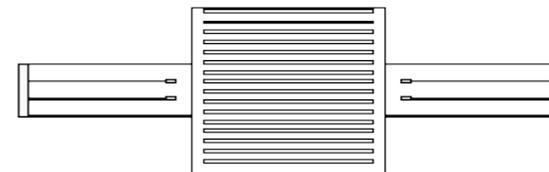
## EXEMPLOS – Análise do Sistema (a)

36

Análise do sistema (a)



Sistema (a)



*Folded beam*

*Half folded beam*

*Simple beam*

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS – Análise do Sistema (a)

37

- A viga simples (*simple beam*) de comprimento  $l_1$  tem uma rigidez (**já foi estudada anteriormente**) expressa por:

$$k_{simple\ beam1} = \frac{12EI}{l_1^3} = \frac{12E}{l_1^3} \cdot \left( \frac{tw^3}{12} \right) = \frac{Et w^3}{l_1^3}$$

> em que  $E$  representa o módulo de elasticidade do material,  $I$  é o momento de inércia da secção transversal (*rectangular*) da viga,  $t$  é a espessura e  $w$  é a largura. A viga simples de comprimento  $l_2$  (*tendo também ambas as extremidades guiadas*) é considerada de modo similar. Contudo está **associada em série** com a viga de comprimento  $l_1$ .

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS – Análise do Sistema (a)

38

- A constante de rigidez de “metade” de um feixe de vigas (*half folded beam*) é calculada da seguinte maneira:



*Half folded beam*

$$\frac{1}{k_{half\ folded\ beam}} = \frac{1}{k_{simple\ beam1}} + \frac{1}{k_{simple\ beam2}}$$

Associação em série

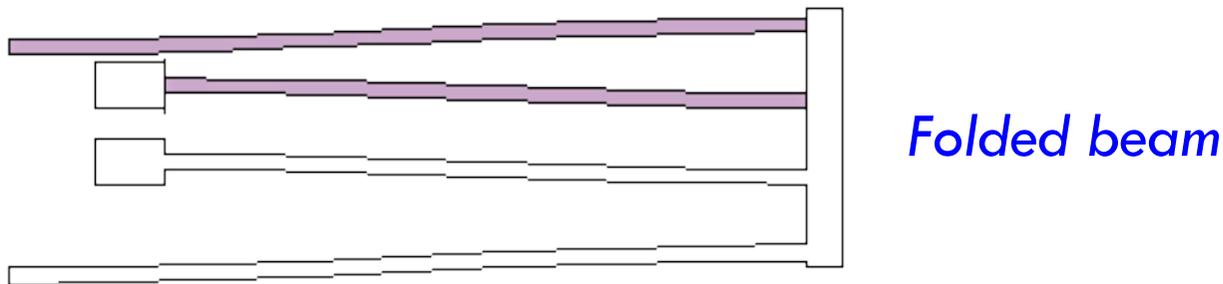
$$\frac{1}{k_{half\ folded\ beam}} = \frac{1}{(12EI/l_1^3)} + \frac{1}{(12EI/l_2^3)} \rightarrow k_{half\ folded\ beam} = \frac{12EI}{(l_1^3 + l_2^3)}$$

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS – Análise do Sistema (a)

39

- A constante de rigidez de um feixe de vigas (*folded beam*) resulta da associação em **paralelo** do sistema anterior:



$$k_{folded\ beam} = 2 \times k_{half\ folded\ beam} \quad \text{Associação em paralelo}$$

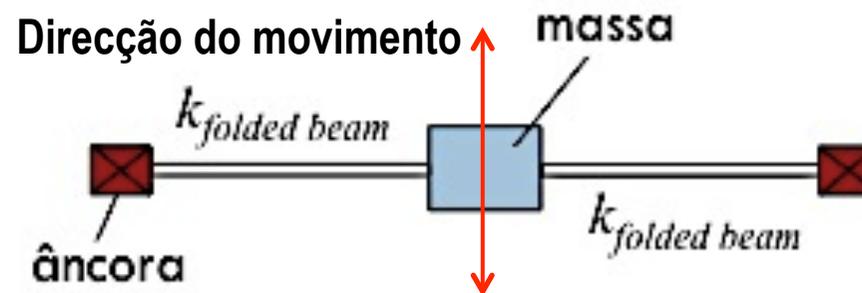
$$k_{folded\ beam} = \frac{24EI}{(l_1^3 + l_2^3)}$$

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS – Análise do Sistema (a)

40

- Finalmente, atendendo à simetria do sistema, a rigidez de uma suspensão constituída por um par de feixes de vigas (*folded-beam suspension*) é calculada da seguinte maneira:



Sistema (a)

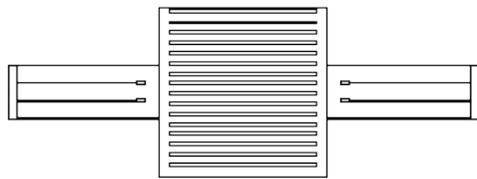
$$k_a = 2 \times k_{folded\ beam} = \frac{48EI}{(l_1^3 + l_2^3)} \rightarrow k_a = \frac{4Etw^3}{(l_1^3 + l_2^3)}$$

# Associação de vigas – aplicação em MEMS

## EXEMPLOS

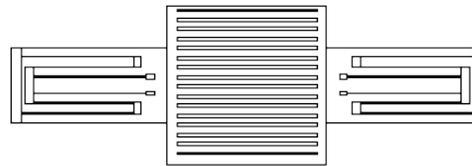
41

$$k_a = \frac{4Etw^3}{(l_1^3 + l_2^3)}$$

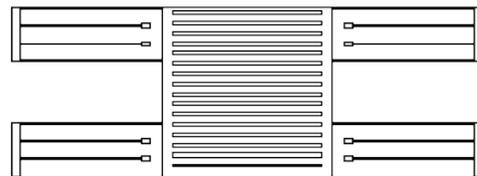


(a)

$$k_b = \frac{4Etw^3}{(l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + l_4^3)}$$

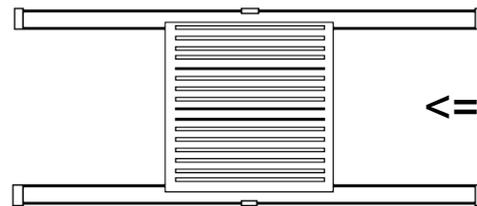


(b)



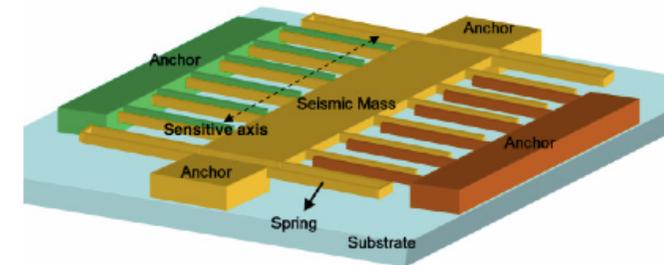
(c)

$$k_c = \frac{8Etw^3}{(l_1^3 + l_2^3)}$$



(d)

$$k_d = \frac{4Etw^3}{(l_1^3 + l_2^3)}$$



## Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atómica (AFM)

42

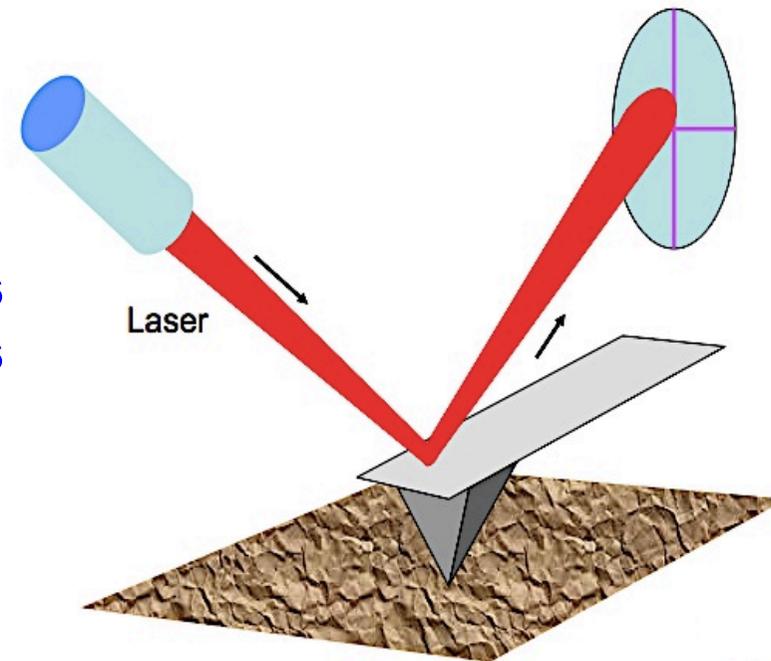
- > A aplicação da **Microscopia de Força Atómica (AFM)** no estudo dos processos de adsorção de **ácidos nucleicos** na superfície de sensores electroquímicos (eléctrodos de carbono) tem várias aplicações na tecnologia dos **biossensores**, com diversos usos em **biotecnologia** e **medicina**. O microscópio de força atómica permite a observação directa da arquitectura de uma determinada superfície. Por isso, a técnica de AFM pode fornecer informações importantes sobre a morfologia da superfície de **eléctrodos modificados com moléculas biológicas**.

## Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atómica (AFM)

43

- Em AFM é efectuado o varrimento da superfície da amostra utilizando uma sonda sensível à força (sensor de força), que consiste numa ponta de dimensões atómicas integrada num braço (**prancha ou ponteira**) em movimento.

> A ponteira é deflectida devido às interacções da ponta com os átomos da superfície.



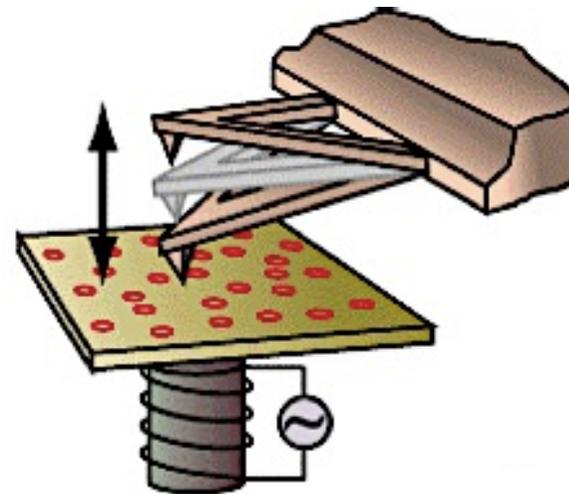
> Princípio de funcionamento do AFM

## Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atômica (AFM)

44

- Em modo magnético (MAC) de AFM é induzida uma oscilação no braço AFM, com uma frequência próxima da sua frequência de ressonância, por intermédio de um campo magnético controlado por uma bobine colocado por debaixo do suporte da amostra.

Modo magnético de corrente alternada do AFM (MAC)



# Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atómica (AFM)

45

## ➤ PROBLEMA PROPOSTO

Utilizando o processo de *micromaquinagem superficial* foi fabricada uma ponteira (viga) em nitreto de silício (SiN) através da deposição química de vapores em baixa pressão (*low pressure CVD*) ou **LPCVD**. O módulo de elasticidade do SiN tem o valor de  $E = 270$  GPa. Nesta aplicação, a ponteira tem por objectivo funcionar como um *biosensor* mecânico capaz de detectar processos específicos de **adesão** e **reconhecimento molecular**. Por exemplo, devido à interacção da ligação *antígeno-anticorpo* (com o anticorpo previamente *funcionalizado sobre a superfície* da ponteira) a ponteira sofre uma deflexão que pode ser detectada através da luz reflectida por um laser.

# Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atómica (AFM)

46

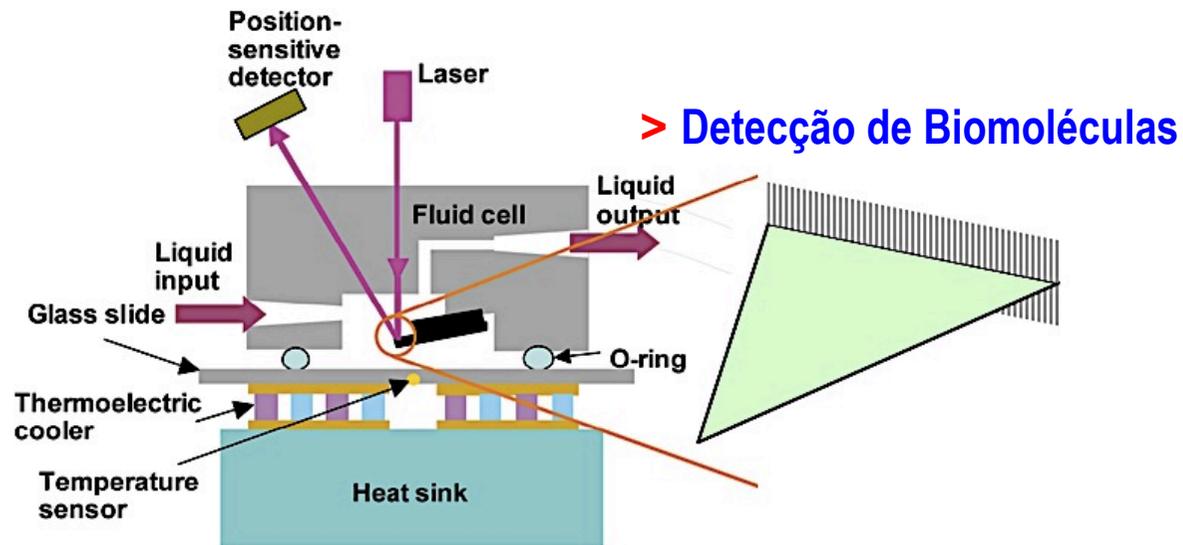
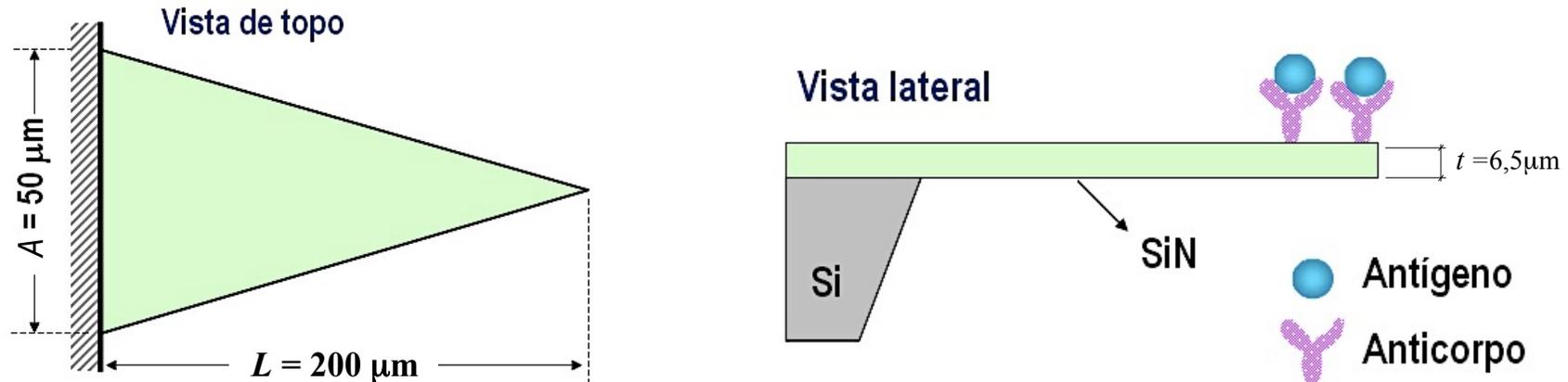
## PROBLEMA PROPOSTO

> A relação entre a deflexão da ponteira, a sua geometria e o estado de tensão depende da quantidade de pares *antígeno-anticorpo* e por conseguinte reflecte o estágio de progressão da “doença”.

A ponteira (a ser utilizada num microscópio de força atómica - AFM), tem espessura  $t = 6,5 \mu\text{m}$  (constante) e apresenta uma forma triangular quando é observada de topo.

# Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atômica (AFM)

47



# Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atómica (AFM)

- Admite-se que a ponteira é sujeita à acção de uma carga concentrada,  $F$  aplicada na sua extremidade e que resulta por exemplo, da acção do **peso** dos pares **antígeno-anticorpo** adsorvidos nessa zona.
- > Assumindo a ocorrência de pequenas deflexões, pretende-se calcular:
  1. A deflexão da extremidade da ponteira quando é sujeita à acção da força  $F$
  2. A constante de rigidez equivalente da ponteira,  $k_{eq}$
  3. A tensão (máxima) instalada na zona de ancoragem admitindo que a força  $F$  produz na extremidade da ponteira uma deflexão  $\delta = 2 \mu\text{m}$ .

# Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atómica (AFM)

**4.** Suponha agora que se utiliza uma ponteira de secção transversal retangular uniforme de área ( $A \times t$ ) e comprimento  $L$ . Determine a quantidade de massa (pares *antígeno-anticorpo*) total que deve estar adsorvida na extremidade da ponteira de forma a que produza uma deflexão  $\delta = 2 \mu\text{m}$ . Para este caso (ponteira de secção retangular uniforme), determine a tensão máxima instalada nesta ponteira e compare-a com a de geometria triangular). Teça algumas considerações referentes à resistência mecânica relativa às duas geometrias.

**5.** Suponha agora que por razões relacionadas com a facilidade do processo de microfabricação, o projetista opta por utilizar ponteira de secção transversal retangular uniforme. Contudo, por imposição de projeto, a rigidez equivalente desta ponteira tem que ser igual à da ponteira com geometria triangular. Sabe-se que o custo de fabricação é de  $250 \text{ €/mm}^2$  [correspondente a  $(A \times L)$ ] e para ponteiras com espessura superior a  $2 \mu\text{m}$  o custo adicional de fabricação é de  $3 \text{ €/}\mu\text{m}$ . Nestas condições pretende-se que faça uma estimativa dos custos de fabricação da ponteira de secção transversal retangular uniforme sabendo que o projetista só pode variar a espessura ou o comprimento. Em qual das situações se obtém o menor custo?

# Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atómica (AFM)

50

6. É possível detectar a presença de *moléculas adsorvidas* (neste caso pares *antígeno-anticorpo*) à superfície da ponteira através da avaliação da variação da *frequência de ressonância* ( $f$ ) da sistema. A *frequência de ressonância* de um sistema de *1 grau de liberdade* (como por exemplo, o caso de uma massa concentrada suspensa através de uma mola) é calculada da seguinte maneira:

No caso que está a ser considerado, a massa da ponteira não corresponde a uma massa concentrada (tal como apresentado na figura), na medida em que a massa da ponteira está uniformemente distribuída por todo o seu volume. Contudo, para a ponteira, é possível calcular o *equivalente* a uma massa concentrada (designada por *massa generalizada*,  $\tilde{m}$ ) obtida a partir da sua massa total,  $M$ . Para ponteiras com geometria triangular e rectangular, a *massa generalizada* tem respectivamente o seguinte valor:

onde  $\rho_{SiN} = 3180 \text{ kg/m}^3$  representa a densidade do nitreto de silício.

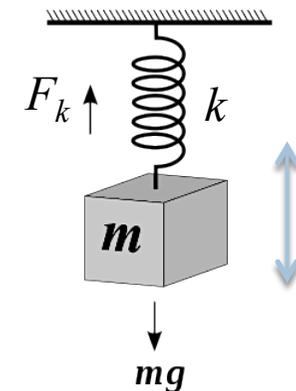
Joaquim Carneiro

**Ponteira triangular**

$$\tilde{m} = \frac{1}{30}(\rho_{SiN}AtL)$$

**Ponteira rectangular**

$$\tilde{m} = \frac{33}{140}(\rho_{SiN}AtL)$$



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

**MEMS**

# Dimensionamento de uma “ponteira” – viga para aplicação em microscopia de força atômica (AFM)

**6. (continuação):** Admita que devido a imposições de projecto, ambas as ponteiras têm que ter a mesma espessura (parâmetro  $t$ ) e a mesma largura (parâmetro  $A$ ). Por outro lado, o projetista só pode variar o comprimento (parâmetro  $L$ ).

Pretende-se que determine a relação entre os comprimentos de ambas as ponteiras de modo a que apresentem a mesma frequência de ressonância.



## Capítulo 3 – Microbombeamento de Fluídos

**UNIVERSIDADE DO MINHO**  
**Departamento de Física**

**Física Aplicada em Biodispositivos Baseados em MEMS**

# SUMÁRIO

## □ MICROFLUÍDICA

- Definição de um fluido (**Equações de Stokes – Navier**)
- Bombeamento de fluídos
  - > Bombeamento mecânico
  - > Bombeamento electrocinético: electro-osmose e electroforese
- Aplicações biológicas: Exercício proposto

# Sistemas Microfluídicos

3

- Relativamente aos designados sistemas microfluídicos (SMF) pode-se afirmar:
  - > Têm constituído um dos domínios mais importantes da utilização de MEMS
    - Mesmo sabendo que a maioria dos sistemas microfluídicos não são verdadeiros MEMS
    - Existem poucos produtos comerciais
  - > O principal impulsionador destes sistemas tem sido as ciências da vida
  - > O impulsionador **inicial** foi a química analítica através da separação de moléculas orgânicas

# Sistemas Microfluídicos

4

- Mais recentemente os SMF têm sido maioritariamente utilizados pela **Biologia** através da manipulação e separação de **DNA**, **Proteínas**, etc.
- Nos SMF, o elemento passivo principal consiste num **canal** que é usado para transportar fluidos. Contudo, os sistemas microfluídicos contêm ainda outros elementos tais como **bombas**, **reservatórios**, **misturadores**, **válvulas**, etc. Todos estes elementos podem ser utilizados numa grande variedade de aplicações que, entre outras, abrangem a química de separação, o transporte geral de líquidos, gases e misturas líquido/gás. A figura ilustra um exemplo de um dispositivo microfluídico.





# Sistemas Microfluídicos

6

- As principais vantagens de utilização destes sistemas incluem os baixos custos de fabricação, otimização do desempenho analítico e menores consumos de produtos químicos face aos tradicionais sistemas de bombeamento.
- O estudo destes sistemas sustenta-se na abordagem a problemas da mecânica de fluidos.

# Definição de um Fluido

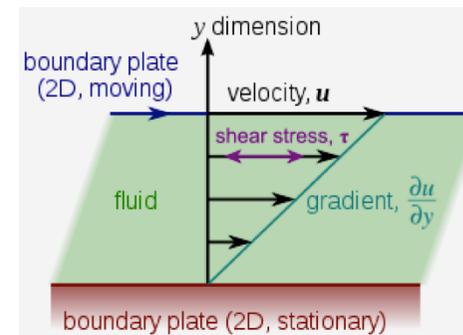
7

- Um fluido é uma substância que tem volume mas não tem forma; isto é, trata-se de um material que não consegue resistir a forças de corte ou tensões de corte, sem se mover.
- Os dois principais parâmetros que caracterizam um fluido são a **densidade** e a **viscosidade**. A densidade ou massa específica,  $\rho$ , de um fluido representa a massa por unidade de volume ( em  $\text{kg m}^{-3}$ ), e a viscosidade,  $\eta$  representa a propriedade de um fluido que provoca tensões de corte quando o fluido está em movimento. Na verdade, na ausência de viscosidade um fluido poderia mover-se sem qualquer tipo de resistência. A viscosidade dinâmica é medida e expressa no sistema SI por  $\text{kg/m.s}$ ; ou seja, Pa.s ou Poiseuille (PI).

# Definição de um Fluido

8

- A viscosidade dinâmica do **ar** tem o valor de  $1.85 \times 10^{-5}$  Pa.s enquanto que a da **água** tem o valor de  $10^{-3}$  Pa.s. Em geral, para qualquer fluido em movimento, as camadas que o compõem estando sujeitas a diferentes tensões de corte, movem-se com diferentes velocidades. Afim de melhor se compreender o fenómeno, imagine-se que se dispõe de duas placas de área  $A$  separadas por um fluido de espessura uniforme  $h$ , conforme esquematizado na figura.



# Definição de um Fluido

9

- Se a placa superior se mover com uma velocidade  $u$  relativamente à placa inferior, a força que é necessário aplicar para garantir  $u$  é  $F$ .
- A força aplicada é proporcional à área e à velocidade da placa, e inversamente proporcional à distância  $h$  entre as placas, ou seja:

$$F = \eta A \frac{u}{h}$$

> onde  $\eta$  representa o factor de proporcionalidade, designado por viscosidade dinâmica. Esta última equação pode ser expressa em termos da tensão de corte  $\tau = F/A$  (força/área em  $\text{N/m}^2$ , i.e., Pa). Assim, a tensão de corte instalada entre as diferentes camadas do fluido é proporcional ao gradiente de velocidade:

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$$

# Definição de um Fluido

## Equações de Stokes – Navier

10

- As leis fundamentais que governam o movimento dos fluidos são as designadas equações de Navier – Stokes. Estas equações representam a forma diferencial da conservação do momento linear e são aplicadas em cada instante de tempo ao estudo do movimento de uma partícula localizada arbitrariamente num fluido. A dedução destas equações está para além do objecto de estudo deste curso.

$$\rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u(x, y, z) = \rho \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial t}$$

> onde  $g$  representa a aceleração da gravidade,  $P$  a pressão (que provoca o movimento do fluido) e  $t$  representa o tempo.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

11

- Existem disponíveis actualmente no mercado diferentes tipos de tecnologias que são utilizadas para movimentar pequenas quantidades de fluidos de um reservatório para outros locais de mistura ou reacção. Entre as diferentes técnicas de propulsão microfluídica, iremos estudar o **bombeamento Mecânico** (seringas ou bombas peristálticas) e o **bombeamento Electrocinético**.
- **BOMBEAMENTO MECÂNICO**: Actualmente, a maioria dos equipamentos utilizados em biotecnologia são baseados nas tradicionais bombas peristálticas ou seringas.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

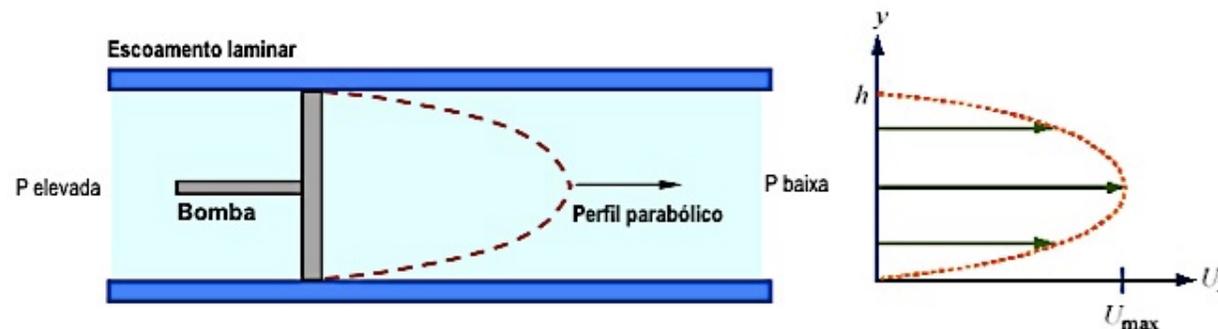
- Apesar de ser exequível a construção e integração de bombas micromaquinadas (*onde é possível obter-se elevada precisão no controlo de fluxo – da ordem de  $1\mu\text{L}/\text{min}$ , elevada sensibilidade e perdas de volume negligenciáveis*), estas bombas requerem habitualmente processos de fabricação complicados e conseguem apenas gerar pressões e fluxos bastante modestos.
- Por isso, tornam-se muitas vezes inúteis nas situações em que a reduzida dimensão dos dispositivos ou então as elevadas pressões, são requisitos impostos.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

13

- Num sistema de propulsão microfluídica actuado por uma diferença de pressão (*pressure-driven system*) utiliza-se uma bomba externa como meio capaz de fornecer a “força” de bombeamento. A figura esquematiza o perfil parabólico relativo à velocidade de um fluido que se movimenta dentro de um canal de secção transversal rectangular (largura  $w$  e altura  $h$ , sendo  $h \ll w$ ), devido a uma diferença de pressão  $\Delta P$  entre as suas extremidades.



# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

- O perfil de velocidade de um fluido actuado por diferença de pressão (*pressure-driven system*) pode ser obtido a partir das equações de **Navier – Stokes**. A solução obtida sustenta-se na adopção dos seguintes pressupostos:
  1. Desprezam-se as forças gravíticas e considera-se uma condição quasi-estática (*steady state condition*);

$$\rho g = 0 \quad ; \quad \rho \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial t} = 0$$

2. Assume-se um gradiente de pressão uniforme ao longo do comprimento do canal;

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

$$\frac{dP}{dx} = -K$$

3. Assume-se que a velocidade  $U$  tem a direcção  $x$  e que a sua intensidade varia segundo a direcção  $y$ ;

$$\frac{d^2U_x}{dy^2} = -\frac{K}{\eta}$$

- Integrando uma vez esta equação obtém-se:

$$\frac{dU_x}{dy} = -\frac{K}{\eta}y + C_1$$

>  $C_1$  é uma constante a ser calculada em função das condições de fronteira.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

□ Integrando novamente obtém-se:

$$U_x = -\frac{K}{2\eta} y^2 + C_1 y + C_2 \quad > \quad C_2 \text{ é uma constante a ser calculada em função das condições de fronteira.}$$

**4.** Como condição de fronteira, assume-se que a velocidade é nula junto às paredes do canal.

### Condições de fronteira

$$\begin{cases} y=0 & \Rightarrow U_x=0 & \rightarrow C_2=0 \\ y=h & \Rightarrow U_x=0 & \Leftrightarrow 0 = \frac{K}{2\eta} h^2 + C_1 h & \Rightarrow C_1 = -\frac{K}{2\eta} h \end{cases}$$

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

17

- Atendendo a que nesta fase as constantes  $C_1$  e  $C_2$  são já conhecidas, então a velocidade do fluido tem a seguinte expressão:

$$U_x = \frac{K}{2\eta} [y(h-y)]$$

- A velocidade atinge o seu valor máximo,  $U_{\max}$  quando  $y = h/2$  (ou seja, a meia distância das paredes do canal).

$$U_{\max} = \frac{h^2}{8\eta} K$$

- Na injeção de um fluido para dentro de um microcanal, o volume  $V$  que é injetado ao fim de um certo intervalo de tempo, depende do **fluxo** (ou caudal)  $Q$  (em  $\text{m}^3/\text{s}$ ) que atravessa a secção transversal em cada segundo.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

18

- O fluxo  $Q$  de um fluido incompressível com viscosidade  $\eta$  (Pa.s) que atravessa em cada instante a secção transversal de um canal de largura  $w$  (m), altura  $h$  (m) e comprimento  $dx$  (m), resultante da aplicação de uma diferença de pressão  $dP$ , é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$Q = \int_0^h U_x w dy$$

- onde  $w dy = dA$  representa a área de um pequeno elemento da secção transversal do canal onde o fluido se movimenta. Substituindo a equação relativa à velocidade do fluído na equação anterior, obtém-se:

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

$$Q = \frac{K_w}{2\eta} \int_0^h (hy - y^2) dy \quad \Leftrightarrow \quad Q = -\frac{dP}{dx} \frac{wh^3}{12\eta}$$

- Esta equação expressa (**aproximadamente**) a relação entre o fluxo e a diferença de pressão aplicada. Contudo, a **expressão exata** que permite obter o fluxo através da secção transversal de um canal, quando sujeito a uma certa diferença de pressão é mais complexa. As expressões analíticas, referentes a duas diferentes geometrias (secção rectangular e circular), são apresentadas na tabela seguinte.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

| Secção Transversal | Fluxo   |
|--------------------|---|
| Rectangular        | $Q = -\frac{dP}{dx} \frac{w h^3}{12 \eta} \left[ 1 - \frac{192h}{\pi^5 w} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\tanh((2i+1)\pi w/2h)}{(2i+1)^5} \right]$ |
| Circular           | $Q = -\frac{dP}{dx} \frac{\pi r^4}{8 \eta}$   |

- Fluxo de um fluido em canais de secção transversal rectangular e circular.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento mecânico

21

- Se o canal tiver uma secção transversal de área  $A = wh$  (m<sup>2</sup>) e comprimento total  $L$  (m) a diferença de pressão entre os seus extremos será  $\Delta P$ . Desta forma, a diferença de pressão  $\Delta P$  relaciona-se com o fluxo  $Q$  através da designada lei de Poiseuille:

$$\Delta P = \frac{12\eta L}{wh^3} Q$$

- De acordo com Poiseuille, a designada **resistência do fluido** que se movimenta no canal quando sujeito a uma diferença de pressão  $\Delta P$  é dada pela seguinte expressão:

$$R_{pois} = \frac{12\eta L}{wh^3}$$

### □ BOMBEAMENTO ELECTROKINÉTICO:

Nesta secção, irá introduzir-se os conceitos de *Electro – osmose* e *Electroforese*. Estes fenómenos dependem diretamente da utilização da electricidade, na medida em que esta funciona como uma “ferramenta” que é utilizada para **movimentar fluidos** condutores (ex. *fluidos biológicos* contendo diferentes iões e sais, são condutores) e partículas electricamente carregadas.

Na verdade, se um campo eléctrico for aplicado ao longo de um microcanal (**com paredes interiores electricamente carregadas**) que contenha um **fluido** e **partículas** (**moléculas**) electricamente carregadas, o resultado obtido consiste na movimentação destas duas “entidades”.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

23

- O movimento do fluído que é produzido pela acção da força eléctrica, designa-se por **electro-osmose** enquanto que o movimento das **partículas (moléculas)** carregadas (sujeitas à acção da força eléctrica) designa-se por **electroforese**.
- Ambos os fenómenos são de extrema importância em processos e tecnologia/ciência de miniaturização; a **electroforese** é utilizada para a **separação** de compostos e a **electro-osmose** utiliza-se para movimentar os fluidos (**bombeamento electro-osmótico**) que “transportam” as moléculas.

### □ Electro – Osmose

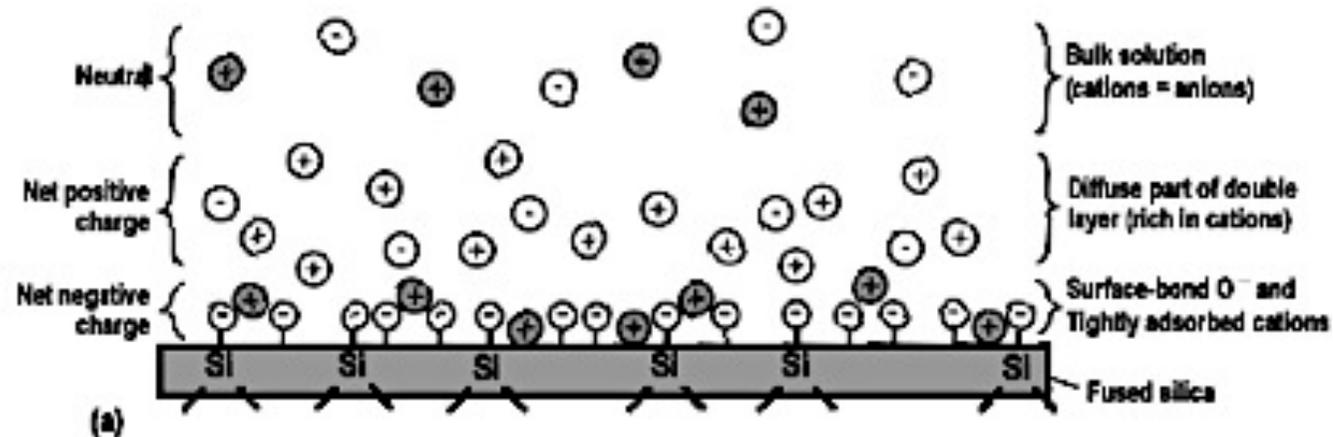
O bombeamento electro-osmótico ocorre quando se aplica um campo eléctrico a uma solução (*fluido*) contida dentro de um microcanal (habitualmente de vidro) e cuja superfície das suas paredes interiores estejam electricamente carregadas. A acumulação nas paredes interiores de uma carga eléctrica superficialmente distribuída ocorre quando por exemplo, se introduz nesse micro canal uma solução tampão. Para microcanais à base de sílica, a parede interior é coberta por grupos silano (Si-OH). Para valores de  $\text{PH} > 2$ , os grupos silano ionizam-se negativamente produzindo grupos (Si-O<sup>-</sup>) e por conseguinte constituem a origem da carga eléctrica negativa, superficialmente distribuída.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

25

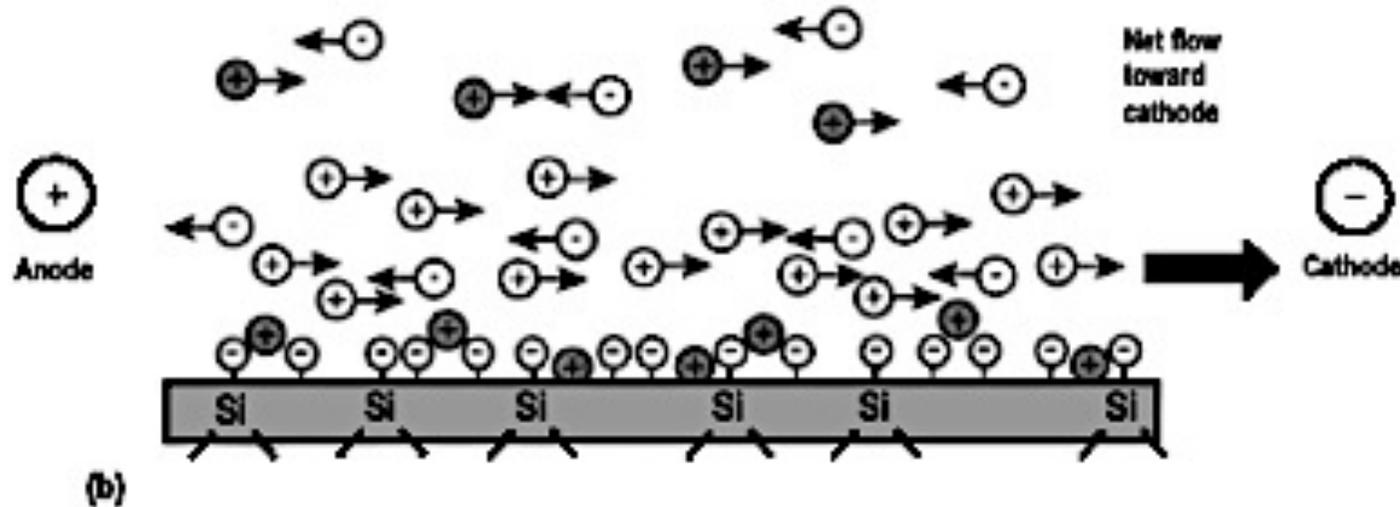
- Devido às forças de natureza electrostática, os iões positivos (**catiões**) presentes na solução tampão são atraídos para as proximidades da parede interna do microcanal, dando origem à formação de duas camadas electricamente positivas, conforme representado esquematicamente na Figura.



# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

26



- Diagrama esquemático mostrando a origem do 'bombeamento electro-osmótico. **(a)** a dupla camada eléctrica é criada devido à existência de cargas eléctricas negativas na superfície da sílica, e um excesso de catiões que se estende até à parte difusa; **(b)** a predominância de catiões na dentro da parte difusa da camada eléctrica, produz um bombeamento electro-osmótico para o cátodo quando externamente se aplica um campo eléctrico.

- A primeira camada (designada por ***Stern layer***), localizada de modo imediatamente adjacente à superfície da parede interna do material (até  $\sim 0.2 \text{ nm}$ ), é formada por iões positivos fortemente “ligados” aos grupos ( $\text{Si-O}^-$ ) e por conseguinte é considerada uma camada **imóvel**.
- Na segunda camada (conhecida por ***Gouy-Chapman layer***), os iões positivos situam-se em regiões muito mais afastadas (distâncias até  $\sim 20 \text{ nm}$ ) dos grupos ( $\text{Si-O}^-$ ) e por isso é considerada a camada **móvel**. Deste modo, na presença de um campo eléctrico, o excesso de catiões situados na parte móvel da camada difusa (ver figura anterior) são atraídos para o cátodo e por isso ‘empurram’ (acção de bombeamento) a coluna de fluido como um todo, para o cátodo.

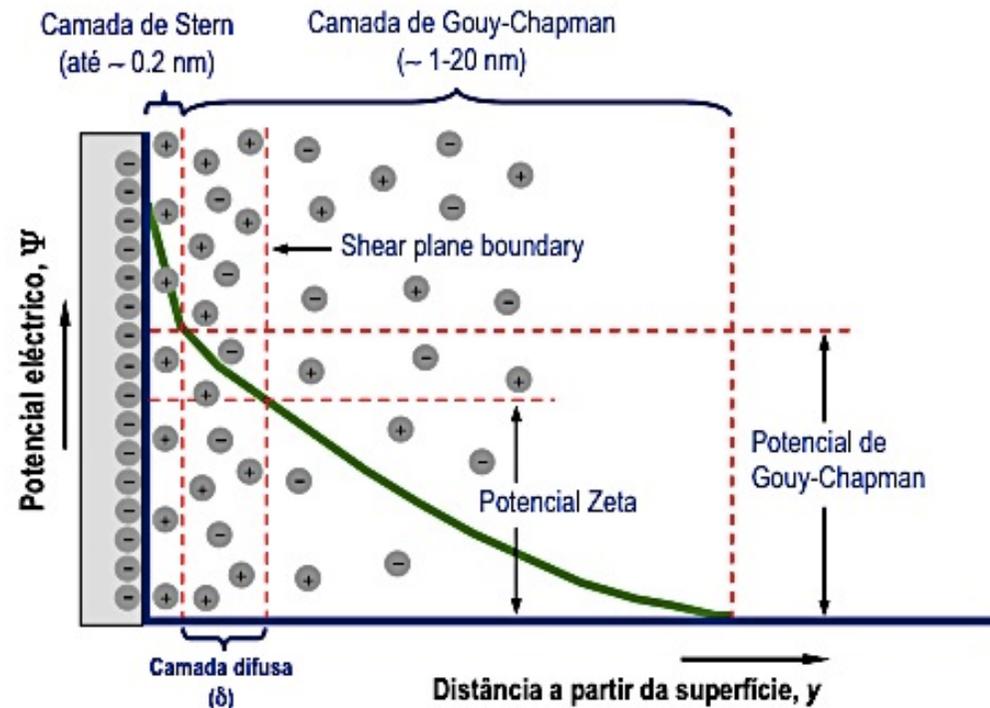
# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

28

- O movimento do fluido inicia-se no designado plano de corte (*shear plane*) que corresponde ao limite da camada difusa. O potencial electrostático,  $\Psi$  a uma distância  $y$  a partir da superfície da parede do microcanal está representado graficamente na figura.

- Representação gráfica da variação do potencial eléctrico a partir da superfície da parede do microcanal.



- O potencial eléctrico,  $\Psi$  decresce exponencialmente com o aumento da distância  $y$  (tomada a partir da superfície da parede do microcanal), de acordo com a seguinte equação:

$$\Psi = \psi_p e^{-\frac{y}{L_D}}$$

> onde:

$$\psi_p = \frac{\sigma_p L_D}{\varepsilon}$$

> Em que  $\sigma_p$  representa a densidade de carga eléctrica da parede do microcanal,  $\varepsilon$  é a constante dieléctrica do fluido e  $L_D$  é o comprimento de Debye (CD). O CD representa fundamentalmente uma distância a partir da qual ocorre uma significativa separação de carga eléctrica.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

30

- Para um electrólito que colocado à temperatura de 25°C, o comprimento de Debye pode ser aproximadamente calculado de acordo com a seguinte equação:

$$L_D = \frac{0.304}{\sqrt{I}}$$

- onde  $L_D$  é expresso em nanómetros ( $nm$ ), e  $I$  representa a força iónica do electrólito, expressa em mol/L. A força iónica de uma solução é função da concentração de todos os iões presentes nessa solução, ou seja:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i Z_i^2$$

> em que  $C_i$  é a concentração molar do ião  $i$  (mol/L) e  $Z_i$  é o seu número de valência. Por exemplo, a força iónica de uma solução mista de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0.05M) e  $\text{NaCl}$  (0.02M) é:

$$I = 1/2((2 \times (+1)^2 \times 0.050) + (+1)^2 \times 0.020 + (-2)^2 \times 0.050 + (-1)^2 \times 0.020) = 0.17 \text{ mol/L}$$

> **EXEMPLO:** Uma solução de  $\text{NaCl}$  (0.02M) tem uma constante dieléctrica  $\epsilon = 8.84 \times 10^{-12}$  ( $\text{C}^2 / \text{J.m}$ ). A solução está contida dentro de um microcanal com uma densidade superficial de carga eléctrica  $\sigma_p = 4 \times 10^{-3}$  ( $\text{C}/\text{m}^2$ ). Nestas condições, obtenha a expressão que lhe permite representar graficamente o potencial eléctrico,  $\Psi$  em função da distância  $y$  tomada a partir da superfície da parede do microcanal.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

32

> **Resolução:** Reescrevendo a equação que permite calcular o potencial eléctrico:

$$\Psi = \psi_p e^{-\frac{y}{L_D}} \Leftrightarrow \Psi = \frac{\sigma_p L_D}{\varepsilon} \cdot e^{-\frac{y}{L_D}}$$

> o comprimento de Debye é calculado da seguinte maneira:

$$L_D = \frac{0.304}{\sqrt{I}} = \frac{0.304}{\sqrt{0.02 \times (+1)^2 + 0.02 \times (-1)^2}} \approx 1.5 \text{ nm}$$

> Deste modo obtém-se:

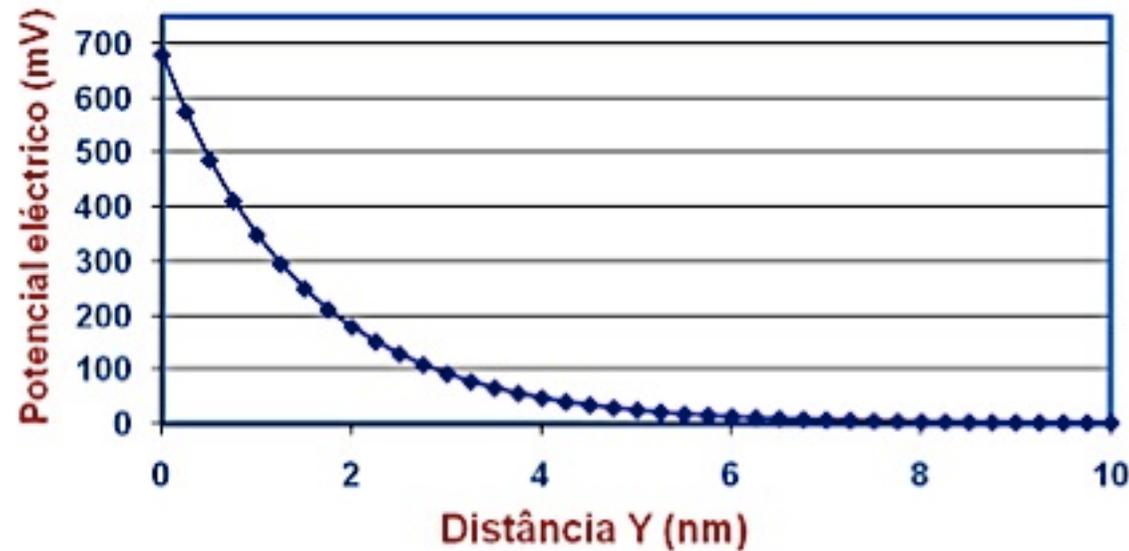
$$\Psi = \frac{4 \times 10^{-3} \cdot 1,5 \times 10^{-9}}{8,4 \times 10^{-12}} \cdot e^{-\frac{y}{1,5 \times 10^{-9}}} \Leftrightarrow \Psi = 0,68 \cdot e^{-(0,67 \times 10^9 \cdot y)} \text{ (V)}$$

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

33

> A representação gráfica do potencial eléctrico é mostrada na figura seguinte.



- Representação gráfica da variação do potencial eléctrico a partir da superfície da parede do micro canal.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

34

> **POTENCIAL ZETA:** A espessura da camada difusa,  $\delta$  é definida como sendo a distância a partir da camada imóvel de Stern até um ponto no qual o potencial eléctrico decresce cerca de 37%. Nestas condições, o potencial eléctrico toma a designação de *potencial zeta*,  $\xi$ .

$$\xi = \psi(y = \delta) = \frac{\sigma_p L_D}{\epsilon} \cdot e^{-\frac{\delta}{L_D}}$$

> Quando um campo eléctrico  $E_Z$  é aplicado ao longo do microcanal (ou *uma diferença de potencial*), o excesso de catiões situados na camada móvel são atraídos para o cátodo e “*arrastam*” (i.e., bombeiam) consigo toda a solução.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

35

> O perfil de velocidade  $U_Z$  do fluido que é actuado por *electro-osmose* pode ser obtido a partir das equações de **Navier – Stokes**, ou seja:

$$\frac{d^2 U_Z}{dy^2} = \left( \frac{\sigma_p}{L_D \eta} \cdot e^{-\frac{y}{L_D}} \right) E_Z$$

> Integrando duas vezes a equação anterior e considerando as seguintes condições de fronteira:

$$U_Z(y = \delta) = 0 \quad ; \quad \psi(y = \delta) = \xi \quad ; \quad \left. \frac{dU_Z}{dy} \right|_{y=h/2} = 0$$

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

36

> obtém-se:

$$U_Z = \frac{\varepsilon}{\eta} (\xi - \psi) E_Z$$

> Para distâncias suficientemente afastadas da parede do micro canal ( $y > 3L_D$ ) o potencial eléctrico tende para zero e a velocidade do fluido atinge o valor máximo, que se designa por *velocidade electro-osmótica*,  $U_{EO}$ :

$$U_{EO} = \left( \frac{\varepsilon \xi}{\eta} \right) \cdot E_Z$$

- onde a designada *mobilidade electro-osmótica*,  $\mu_{eo}$  é dada por:

$$\mu_{eo} = \left( \frac{\varepsilon \xi}{\eta} \right)$$

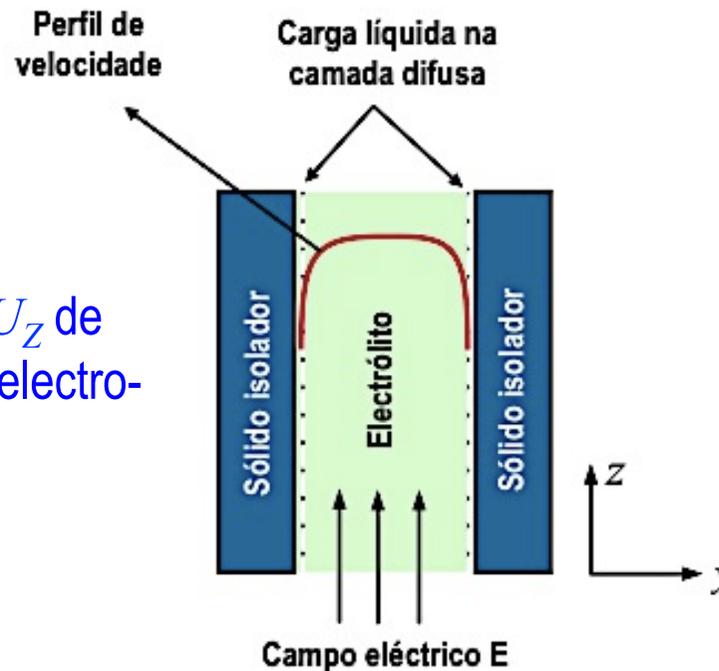
# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

37

> A figura representa esquematicamente o perfil de velocidade  $U_z$  de um fluido bombeado por electro-osmose.

- Perfil de velocidade  $U_z$  de um fluido actuado por electro-osmose.



- A velocidade  $U_z$  é praticamente constante ao longo da largura do microcanal.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

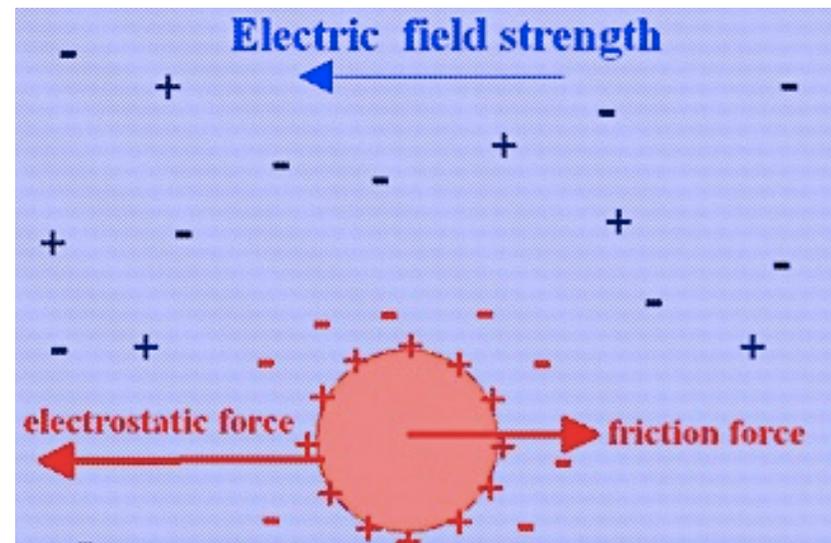
## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

38

### □ Electroforese

Foi referido que o fenómeno correspondente à migração de partículas (*moléculas*) carregadas (iões) num meio de separação (fluido) sob a acção de um campo eléctrico é designado por *electroforese*.

> A figura esquematiza o conjunto de forças que actuam numa partícula (ou *molécula*) electricamente carregada que se movimenta num fluido.



# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

39

- Durante o movimento, a condição de **velocidade estacionária** é alcançada quando a força eléctrica (provoca aceleração) que actua sobre um ião (molécula) é contrabalançada pela força de amortecimento (**força de fricção**) exercida pelo meio de separação (fluido):

$$qE = f U_E$$

> onde  $f$  corresponde ao coeficiente de amortecimento e  $U_E$  representa a **velocidade electroforética**, ou seja, a velocidade do ião (molécula) em estado estacionário.

- O coeficiente de amortecimento de uma partícula (molécula) esférica de raio  $r$  que se movimenta através de um fluido com viscosidade  $\eta$  é dado por  $6\pi\eta r$  (coeficiente de Stokes). Deste modo, a *velocidade estacionária* é calculada da seguinte maneira:

$$U_E = (q / f) E \quad \Leftrightarrow \quad U_E = \frac{q}{6\pi\eta r} E$$

> em que

$$\mu_e = (q / 6\pi\eta r)$$

representa a *mobilidade electroforética*.

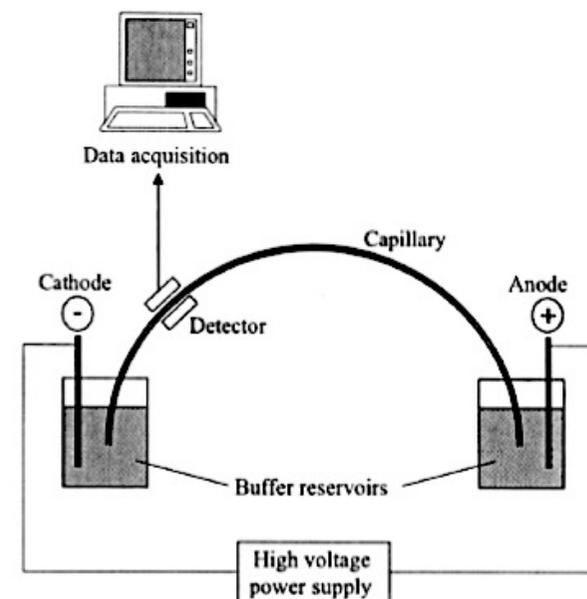
# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

41

- Um procedimento experimental que permite efectuar a separação de diferentes espécies iónicas que se movimentam num determinado fluido, é a designada **capilaridade electroforética**. Os componentes que são requeridos para a execução desta técnica são relativamente simples, conforme esquematizado na figura seguinte.

> Capilaridade electroforética -  
Representação esquemática do  
processo experimental



# Métodos de Propulsão de Fluidos



## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

42

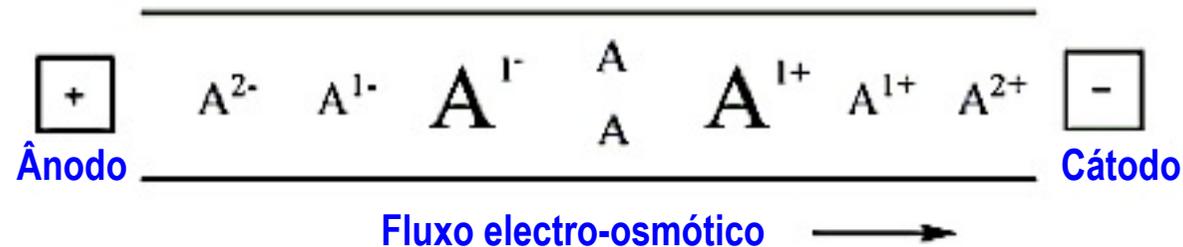
- As extremidades do tubo capilar (normalmente de silicone fundido, com diâmetro que varia entre os 25 e 100  $\mu\text{m}$ ) são colocadas em reservatórios (contendo um electrólito) separados que contêm eléctrodos ligados a uma fonte de elevada tensão, capaz de produzir um campo eléctrico de intensidade superior a 1 kV/cm. O sistema é sujeito à aplicação de uma diferença de potencial que permite realizar a separação das diferentes espécies iónicas. A sua detecção é normalmente efectuada através da utilização de um espectrofotómetro de absorção (UV-Vis ou por fluorescência) colocado a uma distância do ânodo,  $L$  que pode ser variável.

- É importante referir que todas as espécies iónicas, positivas ou negativas (e mesmo **neutras**) são “**empurradas**” através do tubo capilar, na mesma direcção, através do “bombeamento electro-osmótico”. Em geral, a mobilidade electro-osmótica é superior à mobilidade electroforética. Na verdade, para valores de  $PH > 7$  a mobilidade electro-osmótica é suficientemente elevada para assegurar que todas as espécies iónicas migrem para o cátodo, independentemente da sua carga eléctrica. A figura seguinte esquematiza o processo de separação electroforética de espécies iónicas carregadas, que migram do ânodo para o cátodo através do fluxo electro-osmótico.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

44



- Durante o processo de migração do ânodo para o cátodo, a separação dos diferentes iões depende das suas diferentes mobilidades electroforéticas. Neste processo, os iões negativamente carregados tendem a ser atraídos para o ânodo, contra o fluxo electro-osmótico, enquanto os iões positivos são atraídas para o cátodo, no sentido do fluxo electro-osmótico.

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

45

- A ordem de migração que é mostrada na figura anterior (*avaliada pelo detector*) é tal que:
- *Pequenos* iões positivos com carga mais elevada migram para o cátodo mais rapidamente (permanecem menos tempo dentro do tubo capilar), enquanto que os *pequenos* iões negativos com carga mais elevada migram muito mais lentamente. Com efeito, a velocidade total (  $U$  ) de uma espécie iónica que se movimenta (sob a acção de um campo eléctrico) através de um electrólito é definida de acordo com a seguinte equação:

$$\vec{U} = \vec{U}_{EO} + \vec{U}_E \quad \Leftrightarrow \quad \vec{U} = (\vec{\mu}_{eo} + \vec{\mu}_e) \cdot \vec{E}$$

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

46

> onde:

$$\vec{\mu}_a = (\vec{\mu}_{eo} + \vec{\mu}_e)$$

é uma grandeza designada por **mobilidade aparente** (i.e. resulta da soma das mobilidades electro-osmótica e electroforética). Experimentalmente, a mobilidade electro-osmótica ( $\mu_{eo}$ ) pode ser determinada através da medição do tempo (**tempo de migração,  $t_{ro}$** ) que uma **espécie neutra** demora a percorrer a distância  $L$  do ânodo até ao detector. Atendendo a que para **espécies neutras** a mobilidade electroforética é nula ( $\mu_e = 0$ ), a velocidade total  $U$  é calculada da seguinte forma:

$$\vec{U}^0 = \vec{\mu}_{eo} \cdot \vec{E}$$

# Métodos de Propulsão de Fluidos

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

47

> onde  $U^0$  representa a velocidade de migração de uma espécie neutra. Em estado estacionário, a velocidade relaciona-se com o espaço percorrido e o tempo de migração, ou seja:  $U^0 = L / t_{ro}$ . Por outro lado, a diferença de potencial ( $V$ ) relaciona-se com o campo eléctrico ( $E$ ) de acordo com a seguinte equação:

$$V = E L_t$$

> em que  $L_t$  corresponde ao comprimento total do tubo capilar. Substituindo esta equação na equação da página anterior, e rearranjando os termos, obtém-se:

$$\mu_{eo} = \left( \frac{L}{t_{ro}} \right) \cdot \left( \frac{L_t}{V} \right)$$

- Os dados relativos aos fenómenos electrocinéticos são obtidos na forma de um espectro, que se assemelha aos dados obtidos por *cromatografia*. O espectro consiste no registo gráfico da resposta do detector (habitualmente a *absorvância UV-Vis*, que depende da concentração das espécies iónicas) vs. o tempo de migração.
- O aspecto de um espectro típico é mostrado na figura seguinte que se refere por exemplo, à separação de três componentes de uma mistura constituída por catiões, aniões e espécies neutras.

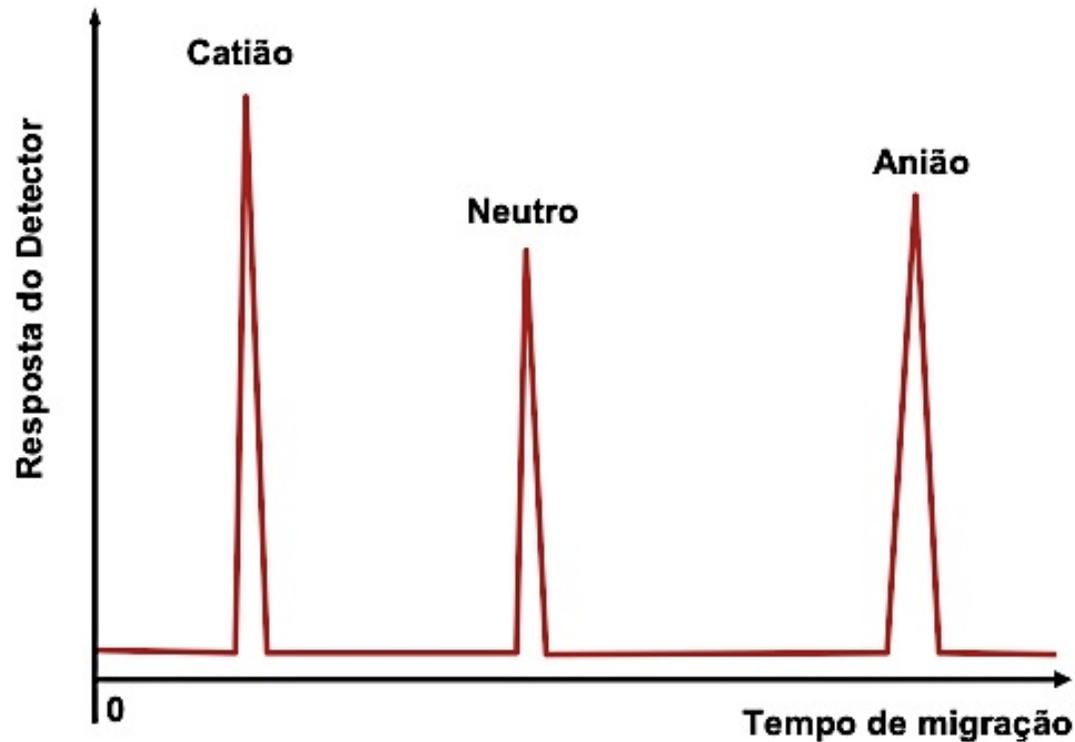
# Métodos de Propulsão de Fluidos



Universidade do Minho

## Bombeamento Electrocinético: Electro - Osmose e Electroforese

49



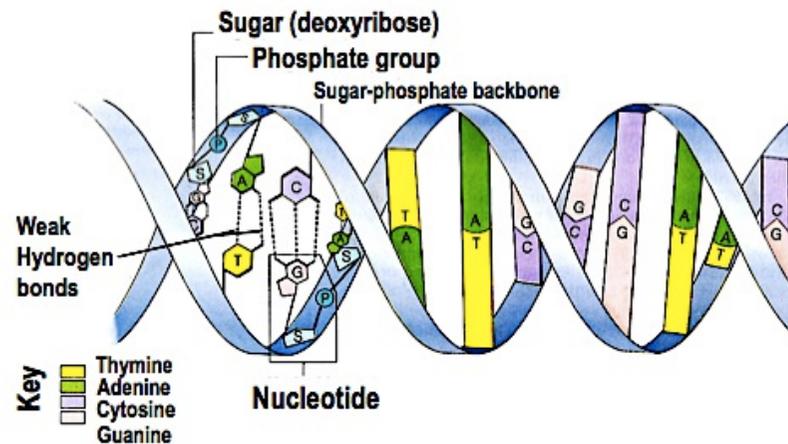
*Espectro típico referente à separação electroforética de diferentes espécies iónicas*

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## A Estrutura do DNA

50

> O código genético é armazenado nos cromossomos das células, cada uma contendo longas cadeias de ácido desoxirribonucleico (**DNA**). Os “*blocos de construção*” do DNA são moléculas designadas por nucleotídeos, que são constituídos por uma “base” ligada a um açúcar fosfatado.



Joaquim Carneiro

> A nomenclatura geralmente varia entre “base” e “nucleotídeo” para representar o mesmo bloco de construção. No DNA existem quatro tipos de nucleotídeos diferenciados pelas suas **BASES**: *adenina*, *timina*, *citossina*, e *guanina*. Os nucleotídeos são identificados de acordo com a primeira letra das suas bases correspondentes: A, T, C e G respectivamente.

**MEMS**

## A Estrutura do DNA

51

➤ Cada molécula de um nucleotídeo tem duas extremidades, identificadas por 3' e 5', correspondendo aos grupos hidroxilo e fosfato que se ligam às posições 3' e 5' dos átomos de carbono na molécula de açúcar. Na cadeia de DNA, a extremidade 3' de um nucleotídeo liga-se à extremidade 5' do nucleotídeo seguinte. Este modo de ligação é essencialmente responsável por conferir direccionalidade à cadeia de DNA.

➤ **Reacção de polimerização em cadeia (PCR):**

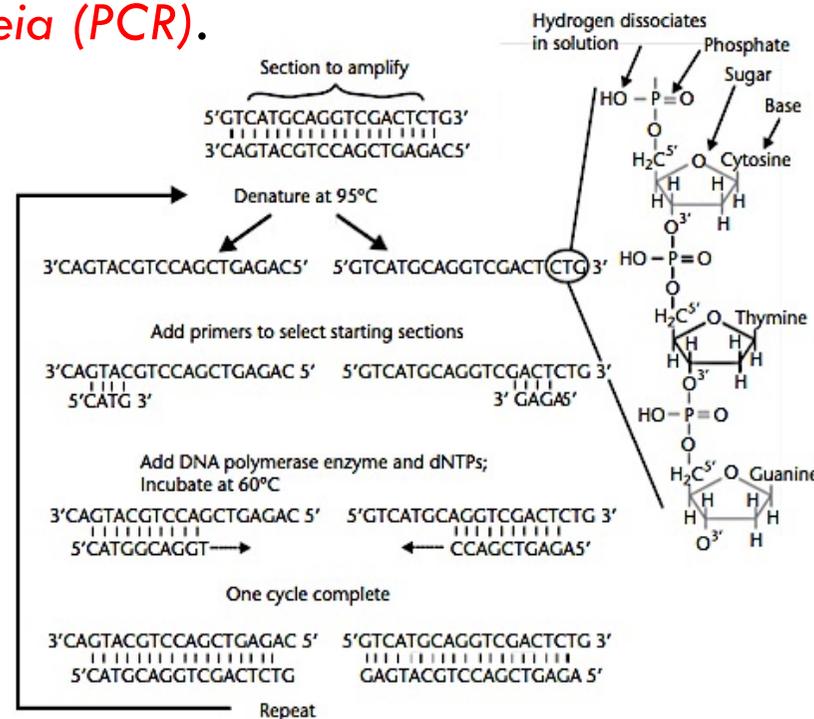
O principal objectivo no âmbito do diagnóstico genético consiste em decifrar a sequência de nucleotídeos num fragmento de DNA, após a sua extração e purificação a partir do núcleo de uma célula. Trata-se de uma tarefa é difícil devido à baixa concentração de DNA contida numa única célula.

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## A Estrutura do DNA

52

- A actual solução, consiste na utilização de um processo designado por amplificação bioquímica que permite criar um elevado número de cópias idênticas a um único fragmento de DNA. O método de amplificação mais comum denomina-se por *reação de polimerização em cadeia (PCR)*.



> *Reação de polimerização em cadeia (PCR)*. A partir de 95°C ocorre a desnaturação do DNA (**molde**) produzindo-se duas cadeias, cada uma contendo toda a informação que é necessária para criar uma réplica complementar.

➤ Este processo, foi inventado em 1980 por Kary Mullis, (Prémio Nobel de Química em 1993) e permite a replicação de um único fragmento de DNA utilizando a sua complementaridade. A ideia básica consiste em separar fisicamente (desnaturar) as duas cadeias de uma dupla hélice e usar cada cadeia como um molde para criar uma réplica complementar.

### ➤ PCR num Chip:

A *reação de polimerização em cadeia* pode ser realizada através da utilização de um dispositivo miniaturizado. Na verdade existe uma enorme vantagem em se utilizarem câmaras de reduzida dimensão, na medida em que apresentam elevadas razões de área / volume.

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## PCR num Chip

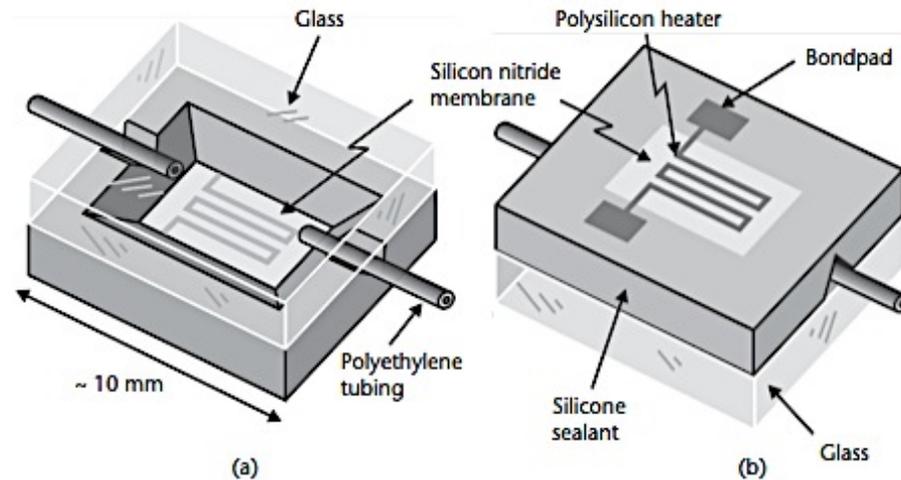
54

- A área superficial afecta directamente a velocidade de condução do calor e o volume determina a quantidade de calor que é necessário fornecer para realizar um ciclo térmico. Por isso, elevadas razões de área / volume (*devices miniaturizados*) permitem executar muito mais rapidamente os ciclos térmicos no processo de PCR.

(a) lado da frente

(b) lado de trás

Câmara de PCR micromaquinada em silício.



# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Electroforese e Electro-osmose num Chip



55

- A determinação da sequência de nucleotídeos numa cadeia de DNA envolve, numa primeira etapa, a amplificação e identificação química dos fragmentos de DNA através da utilização de marcadores específicos fluorescentes e uma subsequente e distinta etapa que visa a detecção e análise dos fragmentos de DNA previamente marcados. Os fenómenos electrocinéticos (*electro-osmose e electroforese*) representam um processo através da qual é possível desenvolver micro/nano tecnologia que permite a movimentação de fluidos e espécies electricamente carregadas.

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletroforese e Electro-osmose num Chip



56

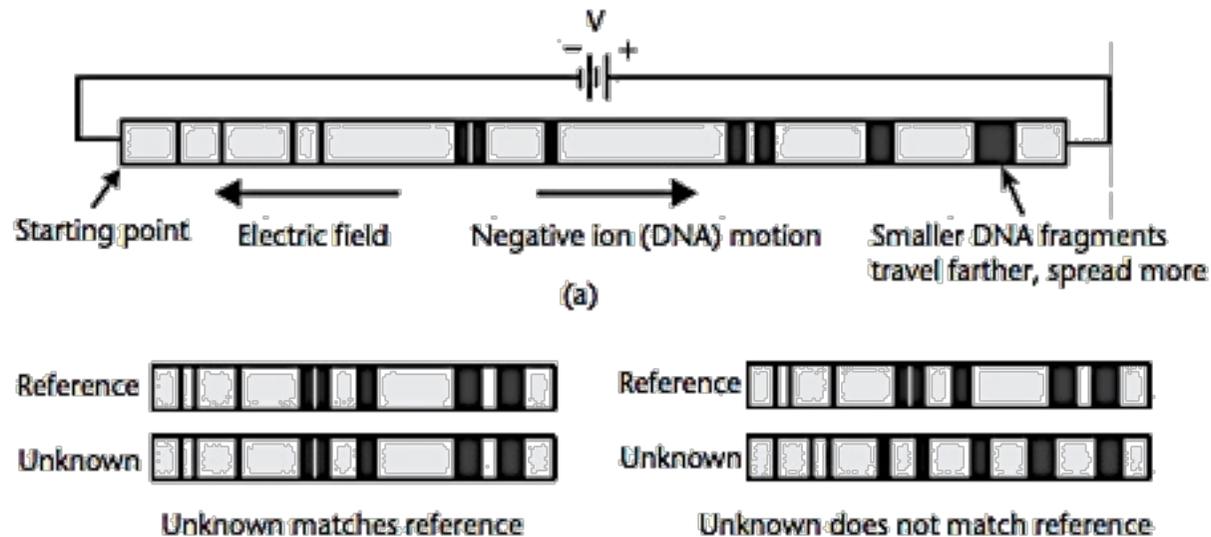
- Por isso, é possível realizar a separação de diferentes **espécies químicas** e **biológicas** (fragmentos de **DNA**), sem que exista a necessidade de se recorrer à utilização de componentes mecânicos móveis. Neste sentido, pode ser desenvolvida tecnologia de modo a se poder implementar este processo em dispositivos miniaturizados (ex. *laboratory-on-a-chip: LOC*) que envolvam a presença de canais micromaquinados.

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletroforese e Electro-osmose num Chip

57

- A figura esquematiza o processo de separação de fragmentos de DNA com diferentes dimensões. Neste caso, assume-se que o meio de separação é tal que os fragmentos com carga negativa movem-se para a direita sob o efeito do campo elétrico aplicado.



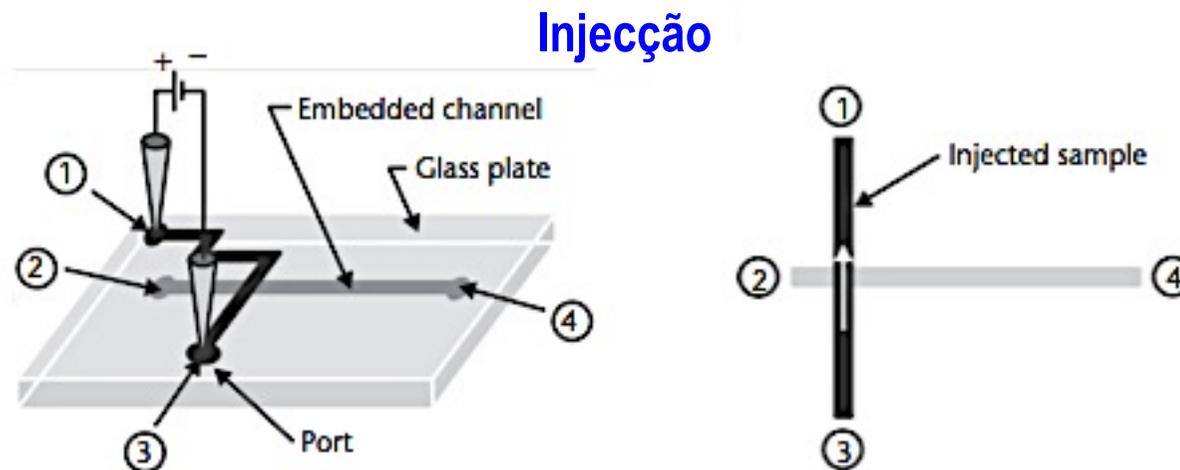
> Em solução, os iões de hidrogênio dissociam-se dos grupos fosfato deixando a cadeia de DNA com uma carga líquida negativa.

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletoforese e Electro-osmose num Chip

58

- Os cientistas Woolley e Mathies da Universidade da Califórnia foram os primeiros, em 1994 a executar num Chip a separação de fragmentos de DNA através do bombeamento electrocinético. O dispositivo era composto por dois canais ortogonais fabricados num substrato de vidro através de micromaquinagem volúmica com ácido fluorídrico.



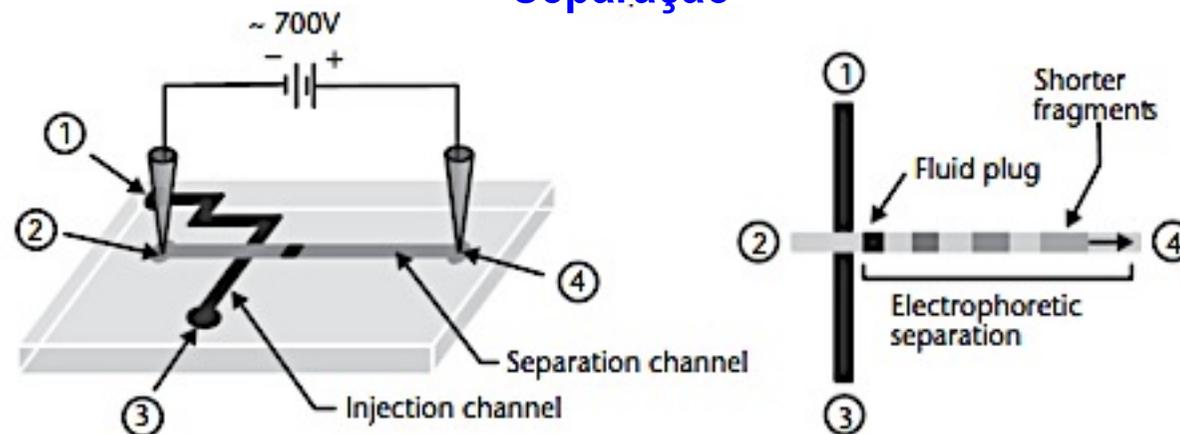
# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletroforese e Electro-osmose num Chip

59

- O primeiro canal (curto) é utilizado para injetar o fluido, enquanto que o segundo canal (2 → 3), muito mais longo, é utilizado para efectuar o processo de separação dos fragmentos de DNA.

### Separação



- > Ilustração da injeção de um fluido e subseqüentes etapas de separação molecular num sistema miniaturizado para realizar a electroforese de DNA

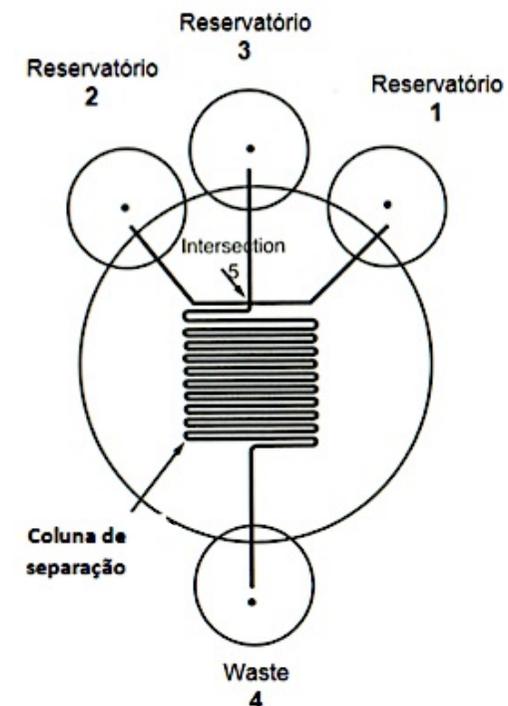
# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletoforese e Electro-osmose num Chip (EXERCÍCIO)

### ➤ Exercício:

A figura representa o esquema de um dispositivo microfluídico contendo quatro canais micromaquinados sobre um substrato de sílica.

> Admite-se que os reservatórios contêm uma solução aquosa onde estão dissolvidas duas espécies iónicas com diferentes cargas eléctricas.



- A espécie “1” está *positivamente* carregada (catiónica) enquanto a espécie “2” tem carga negativa (aniónica). O comprimento total  $L$ , medido entre o “ponto 5” (intersecção) e o depósito (ponto 4) é de ***4,5cm***. Considere que o **detector** está localizado no “ponto 4”.
- A fim de se efectuar a separação electroforética das duas espécies iónicas, é aplicado exteriormente um campo eléctrico  ***$E = 300V/cm$***  entre o reservatório “3” e o depósito (waste). Atendendo à natureza do material que é utilizado na fabricação dos microcanais, admite-se que o *potencial zeta* tem o valor de  ***$\xi = 300 mV$*** .

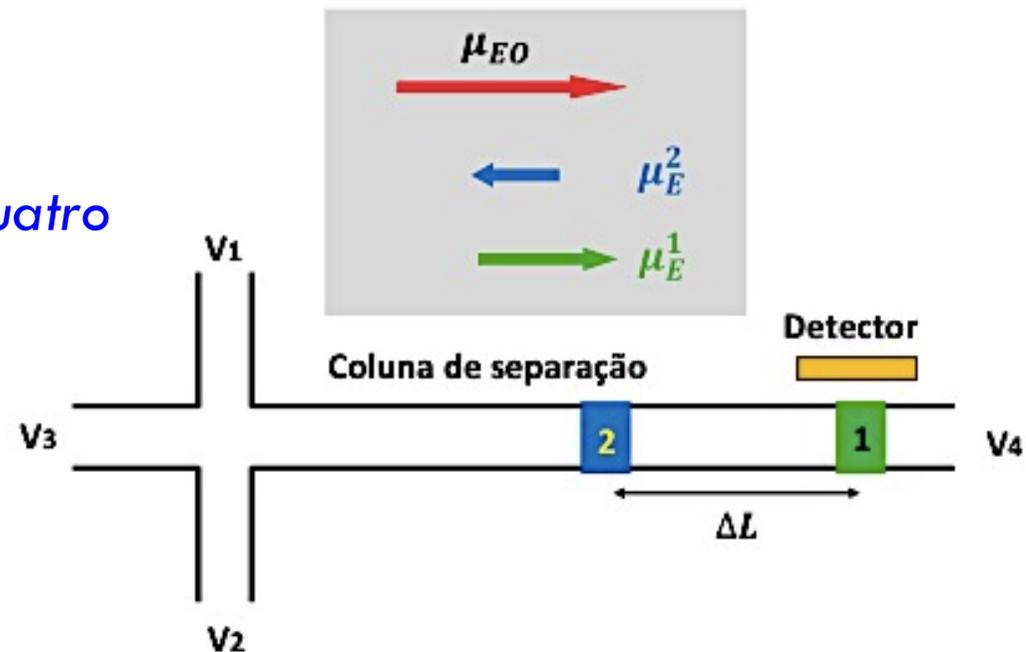
- Por outro lado, admite-se que a *mobilidade electro-osmótica* ( $\mu_{eo}$ ) é o dobro da *mobilidade electroforética* ( $\mu_e$ ) da espécie “1” e apenas 1,5 vezes maior do que a *mobilidade electroforética* da espécie “2”.
- Admite-se ainda que a constante dielétrica do fluído tem o valor  $\epsilon = 10,6 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{J.m}$  e que a sua viscosidade assume o valor de  $\eta = 10^{-3} \text{ Pa.s}$ .
- Nestas condições, pretende-se determinar o **tempo de migração das duas espécies,  $t_m$**  (tempo de chegada ao detector) bem como a **sua distância de separação,  $\Delta L$** .

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletroforese e Electro-osmose num Chip (EXERCÍCIO)

- A figura representa um esquema equivalente ao diagrama do dispositivo microfluídico contendo quatro canais micromaquinados.

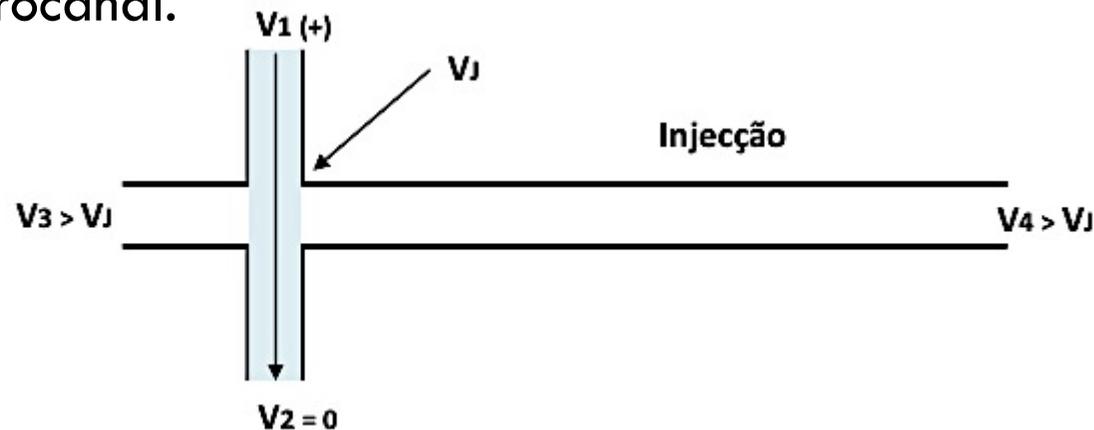
> Esquema dispositivo microfluídico contendo quatro canais micromaquinados



# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletoforese e Electro-osmose num Chip (EXERCÍCIO)

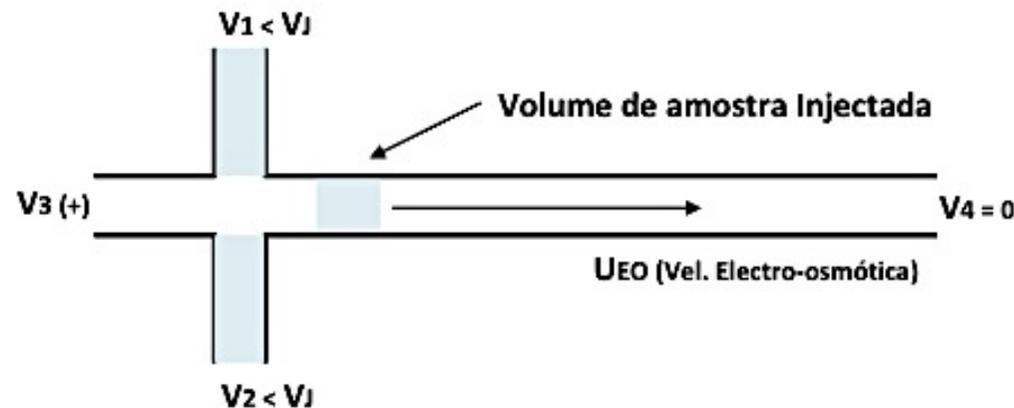
- Na prática o procedimento que é utilizado para movimentar o fluido é o seguinte: o primeiro passo consiste em aplicar uma diferença de potencial entre o reservatório “1” e o reservatório “2” (nesta fase, o reservatório “2” está ligado à terra) enquanto os potenciais eléctricos dos reservatórios “3” e “4” são ambos mantidos com um valor igual a cerca de metade do potencial eléctrico do reservatório “1”. Este procedimento permite a injeção do microcanal.



# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletoforese e Electro-osmose num Chip (EXERCÍCIO)

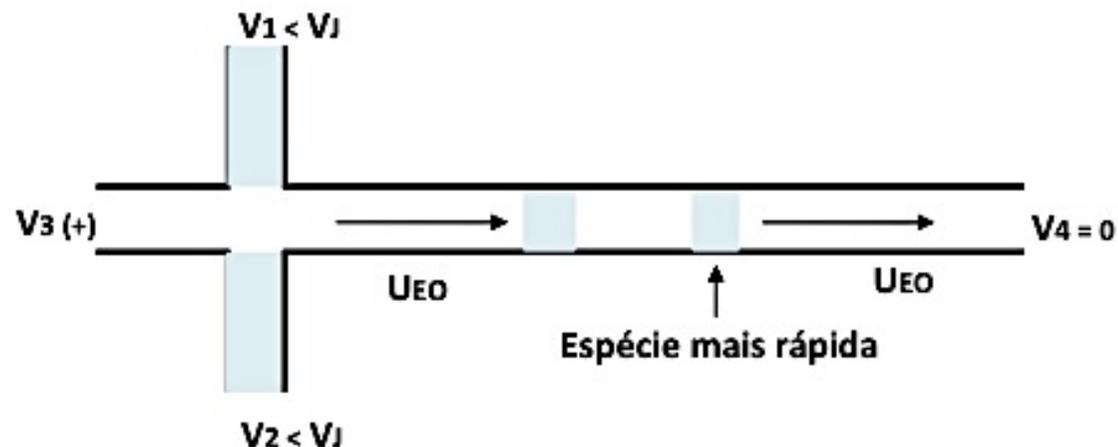
- O segundo passo consiste em aplicar uma diferença de potencial entre o reservatório “3” e o reservatório “4” (nesta fase, o reservatório “4” está ligado à terra) enquanto os potenciais eléctricos dos reservatórios “1” e “2” são ambos mantidos com um valor igual a cerca de metade do potencial eléctrico do reservatório “3”. Este procedimento permite a injeção das espécies iónicas no *microcanal de separação*.



# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Eletoforese e Electro-osmose num Chip (EXERCÍCIO)

- Finalmente, atendendo à diferente mobilidade electroforética das duas diferentes espécies iónicas, a manutenção dos potenciais eléctricos correspondentes à anterior situação permitirá que ao longo do tempo, ocorra a separação das diferentes espécies iónicas.



### □ Cálculo da mobilidade electro-osmótica

> o valor da mobilidade electro-osmótica é calculado da seguinte maneira:

$$\mu_{eo} = \frac{\varepsilon \xi}{\eta} = \frac{10,6 \times 10^{-12} \cdot 300 \times 10^{-3}}{10^{-3}} = 3,18 \times 10^{-9} \text{ (m}^2 \cdot \text{s / V)}$$

### □ Cálculo da mobilidade aparente da espécie 1 (positiva)

> o valor da mobilidade aparente da espécie “1” é calculado da seguinte maneira:

$$\mu_{a,1} = (\mu_{eo} + \mu_e^{(1)}) = (1 + 1/2) \mu_{eo} = 4,77 \times 10^{-9} \text{ (m}^2 \cdot \text{s / V)}$$

### □ Cálculo da velocidade da espécie 1

> o valor da velocidade da espécie 1 é calculado da seguinte forma:

$$U_1 = \mu_{a,1} \cdot E = 4,77 \times 10^{-9} \cdot \left( \frac{300}{10^{-2}} \right) = 143,1 \mu m / s$$

### □ Cálculo do tempo de migração da espécie 1

> o valor do tempo de migração da espécie “1” é calculado da seguinte maneira:

$$U_1 = \frac{L}{t_m^{(1)}} \Rightarrow t_m^{(1)} = \frac{L}{U_1} = \frac{4,5 \times 10^{-2}}{143,1 \times 10^{-6}} = 314,47 s \approx 5,24 \text{ min}$$

### □ Cálculo da mobilidade aparente da espécie 2 (negativa)

> o valor da mobilidade aparente da espécie “2” é calculado da seguinte forma:

$$\mu_{a,2} = (\mu_{eo} - \mu_e^{(2)}) = (1 - 2/3) \mu_{eo} = 1,06 \times 10^{-6} \text{ (m}^2 \cdot \text{s / V)}$$

### □ Cálculo da velocidade da espécie 2

> o valor da velocidade da espécie 2 é calculado da seguinte forma:

$$U_2 = \mu_{a,2} \cdot E = 1,06 \times 10^{-6} \cdot \left( \frac{300}{10^{-2}} \right) = 31,8 \text{ } \mu\text{m / s}$$

### □ Cálculo do tempo de migração da espécie 2

> o valor do tempo de migração da espécie “2” é calculado da seguinte maneira:

$$U_2 = \frac{L}{t_m^{(2)}} \Rightarrow t_m^{(2)} = \frac{L}{U_2} = \frac{4,5 \times 10^{-2}}{31,8 \times 10^{-6}} = 1415,1 \text{ s} \approx 23,6 \text{ min}$$

### □ Cálculo da distância de separação entre as duas espécies

> O intervalo de tempo que a **espécie 1** necessita para percorrer a distância  $L_1 = L = 4,5 \text{ cm}$  (**comprimento da coluna de separação**) é de  $t_m^{(1)} = 314,47 \text{ s}$ .

- Durante esse mesmo intervalo de tempo, a **espécie 2** percorre uma distância  $L_2 = U_2 \cdot t_m^{(1)} = 31 \times 10^{-6} \cdot 314,47 \approx 1 \text{ cm}$ . Deste modo, a **distância de separação** entre as duas espécies é calculada da seguinte maneira:

$$\Delta L = L_1 - L_2 = (4,5 - 1) = 3,5 \text{ cm}$$

- É importante referir que as diferentes espécies iónicas (consideradas neste exercício) poderiam perfeitamente corresponder a **fragmentos de moléculas de DNA** (com diferentes tamanhos e polaridades) que poderiam ser separadas por este processo electrocinético.

# Microfluídica para aplicações Biológicas

## Electroforese e Electro-osmose num Chip (EXERCÍCIO)



72

- Nesse caso, o processo demoraria aproximadamente 23,6 mim para efectuar completamente a separação destes dois **fragmentos de moléculas de DNA**, que se moviam dentro de um fluído contido por um **canal microfabricado**.
- Se o processo fosse efectuado através da utilização da electroforese capilar convencional (onde tipicamente o comprimento do tubo capilar -  $L$ - corresponderia a cerca de 50 cm e o campo eléctrico aplicado teria uma intensidade de 1kV/cm), então o tempo total de separação deveria corresponder a cerca de **1 a 2 horas !!**

# Bombeamento de Fluídos

## PROBLEMA PROPOSTO



Universidade do Minho

73

- No processo de fabricação de sistemas microfluídicos é habitual a presença de múltiplos canais que têm como objectivo distribuir um fluído (contido previamente num reservatório comum) para diferentes regiões. As diferentes geometrias e dimensões dos microcanais, influem directamente na dificuldade (**resistência**) de um fluído se movimentar através desses microcanais, e por isso, condicionando inevitavelmente o fluxo do fluído através das suas secções transversais. A figura seguinte esquematiza um sistema microfluídico (**instalado num Chip**) constituído por 4 microcanais fabricados em sílica através de micromaquinagem volúmica.

# Bombeamento de Fluidos

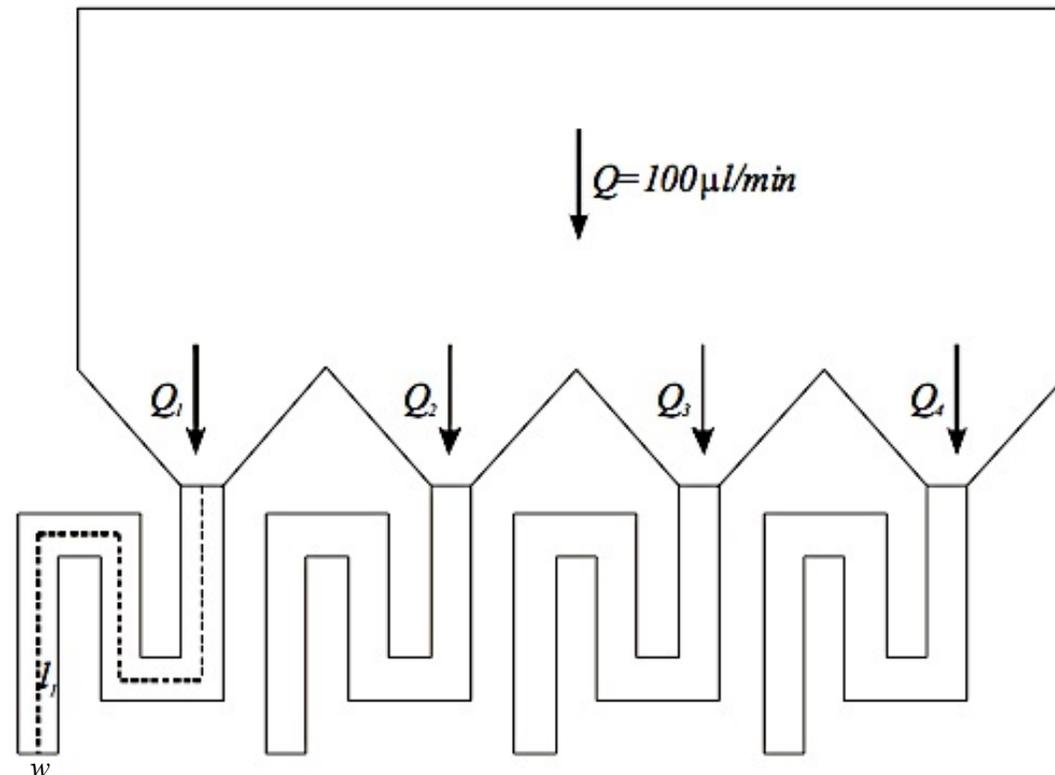
## PROBLEMA PROPOSTO



Universidade do Minho

74

- > sistema microfluídico (*instalado num Chip*) constituído por 4 microcanais fabricados em sílica através de micromaquinagem volúmica



# Bombeamento de Fluidos

## PROBLEMA PROPOSTO

- Neste problema considera-se que o fluido contido no reservatório é água ( $\eta = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ). O fluxo total de água que deverá ser distribuído pelos 4 microcanais tem o valor de  $Q = 100 \mu\text{l}/\text{min}$ . Por outro lado, é necessário garantir que a razão entre os fluxos de água que atravessam os diferentes microcanais deve obedecer à relação (1:3:9:27), ou seja:

$$(Q_2 / Q_1) = 3 \quad ; \quad (Q_3 / Q_1) = 9 \quad ; \quad (Q_4 / Q_1) = 27$$

- Devido a imposição de projecto, a espessura ( $h$ ) e a largura ( $w$ ) dos 4 microcanais é a mesma. Considera-se que  $h = 50 \mu\text{m}$ , enquanto que  $w \geq 150 \mu\text{m}$ .

# Bombeamento de Fluídos

## PROBLEMA PROPOSTO



Universidade do Minho

76

- Considera-se também que a queda de pressão ( $\Delta P$ ) ao longo de um microcanal é igual para todos os 4 microcanais e deverá ser  $\Delta P \leq 2 \text{ kPa}$ . Por outro lado, um dos objectivos do projecto traduz-se na necessidade de se minimizar a área ( $A$ ) total do chip que deverá ser  $A < 25 \text{ mm}^2$ . Neste caso, considera-se que a área superficial,  $n$  de cada microcanal é  $A_n = 2l_n w$  (de modo a contemplar os espaços entre os canais adjacentes).
- Admitindo que o escoamento do fluído é governado pela lei de Poiseuille (bombeamento mecânico) determine o comprimento de cada microcanal, bem como a correspondente queda de pressão.