LPP
Laboratório de Plasmas e Processos

MT-203
Ciência e Tecnologia de Filmes Finos
Prof. Douglas Leite

Estágio Docência
Bárbara Damasceno / Regiane Santana

INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE AERONÁUTICA

Perfilometria

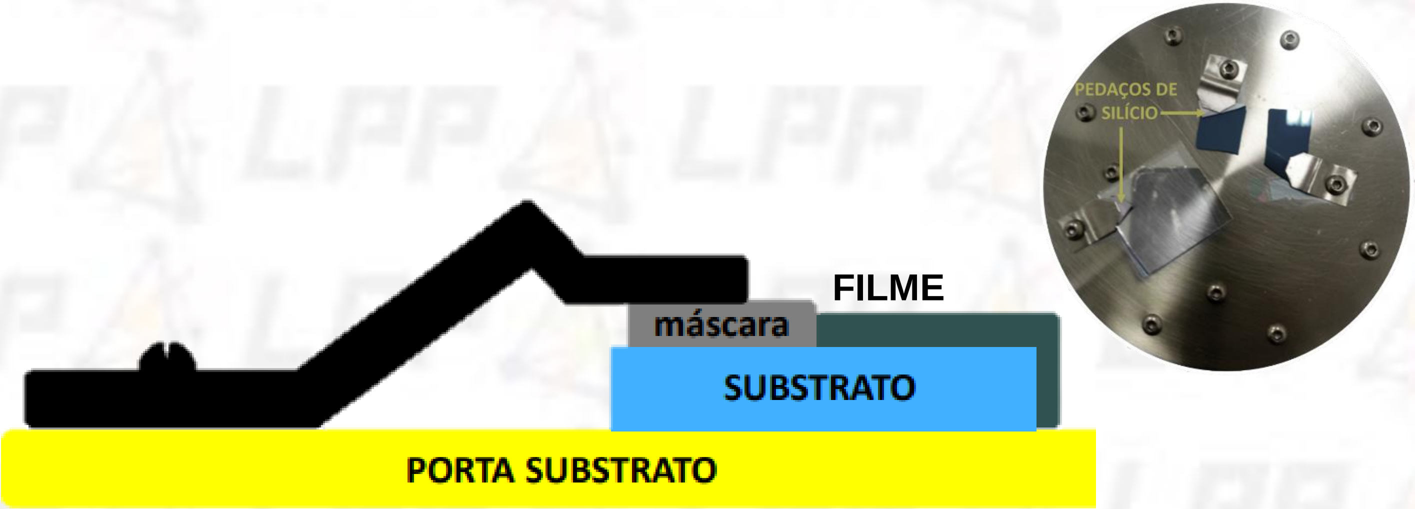
- **Propriedades Estruturais**

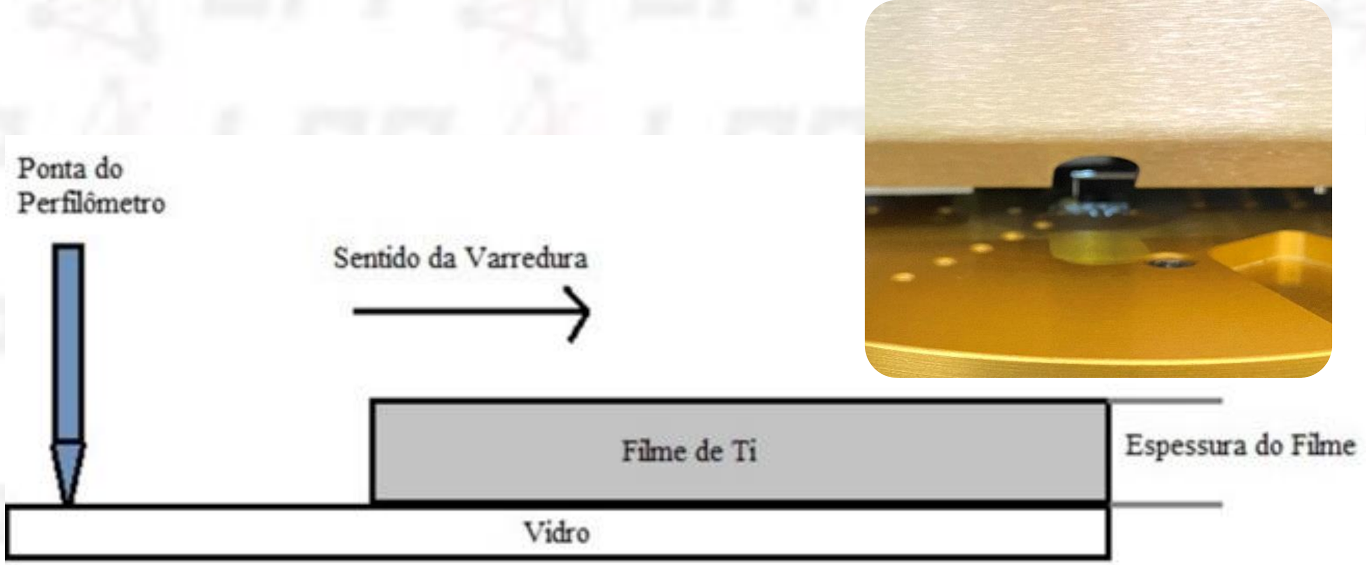
→ Espessura

→ Rugosidade

→ Tensão residual

KLA Tencor
P - 7
SMS
NÃO DESLIGAR


FILME
máscara
SUBSTRATO
PORTA SUBSTRATO
PEDAÇOS DE SILÍCIO


Ponta do Perfilômetro
Sentido da Varredura
Filme de Ti
Espessura do Filme
Vidro

Perfilometria

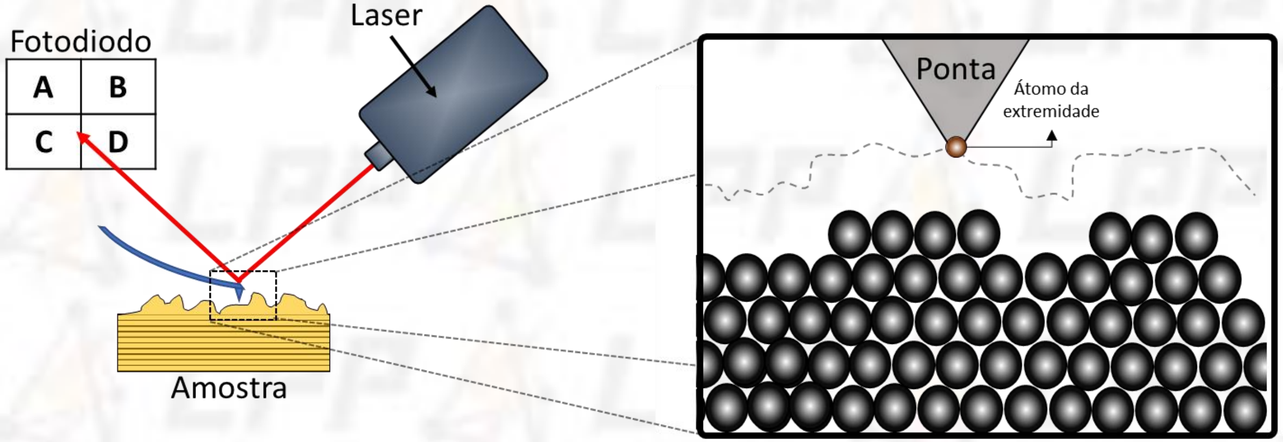
- Vídeo Youtube: https://youtu.be/MvGH8nw16_g

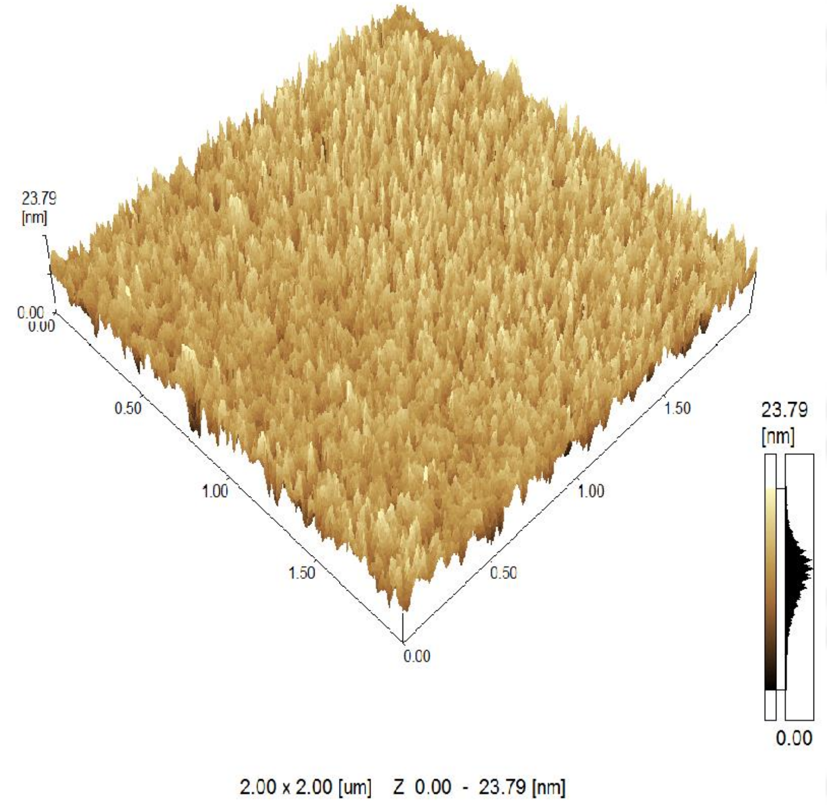
AFM - Microscopia de Força Atômica

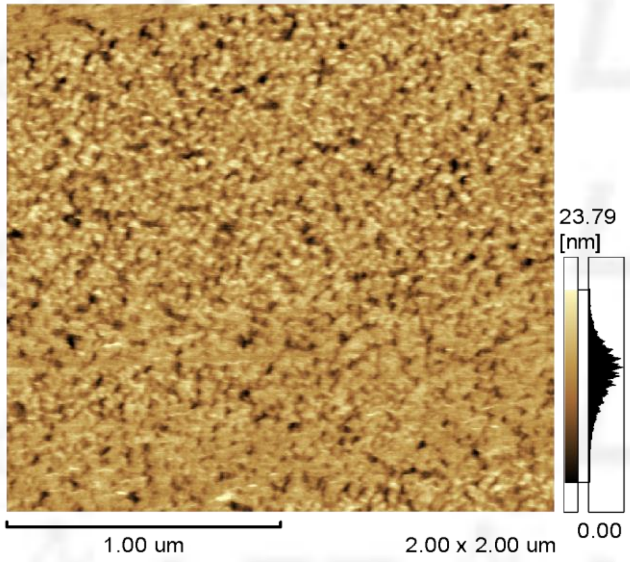
- **Propriedades Estruturais**

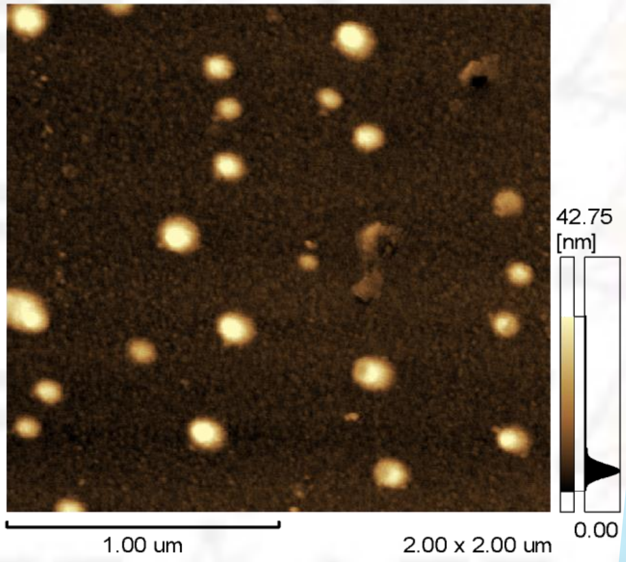
→ Rugosidade

→ Distribuição de tamanho de grãos


Fotodiodo
A
B
C
D
Laser
Amostra
Ponta
Átomo da extremidade


23.79
[nm]
0.00
0.00
0.50
1.00
1.50
1.50
1.00
0.50
0.00
23.79
[nm]
0.00
2.00 x 2.00 [um] Z 0.00 - 23.79 [nm]


23.79
[nm]
0.00
1.00 um
2.00 x 2.00 um


42.75
[nm]
0.00
1.00 um
2.00 x 2.00 um

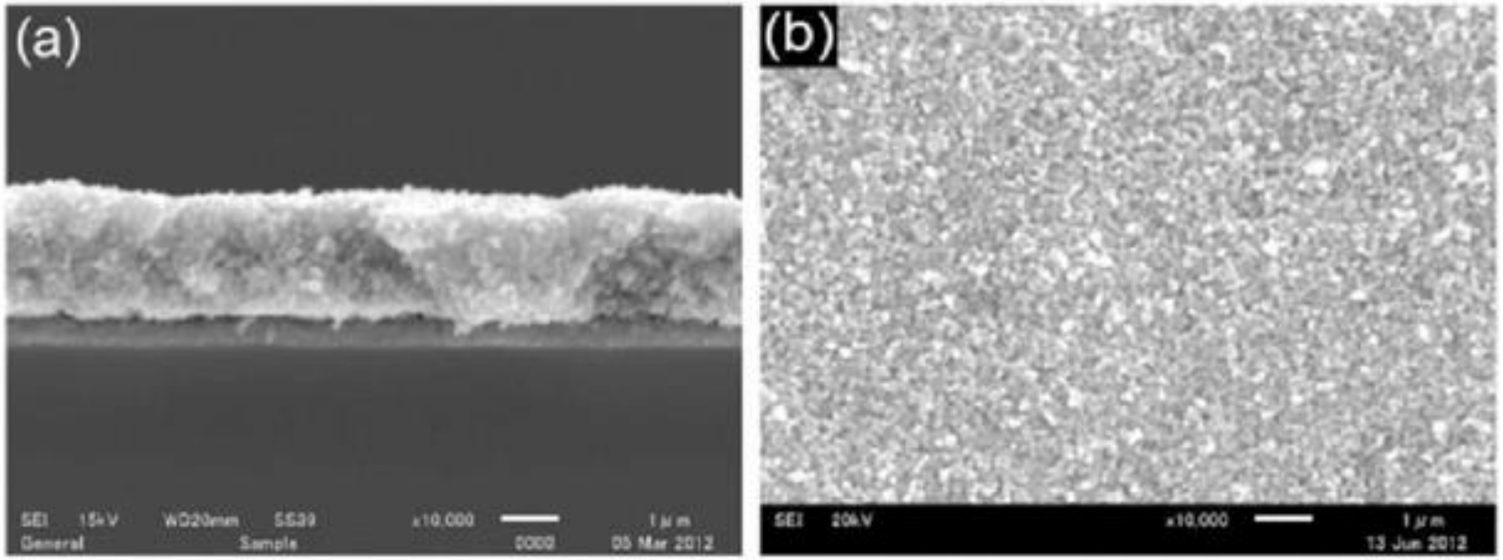
MEV e MET – Microscopia Eletrônica de Varredura/Transmissão

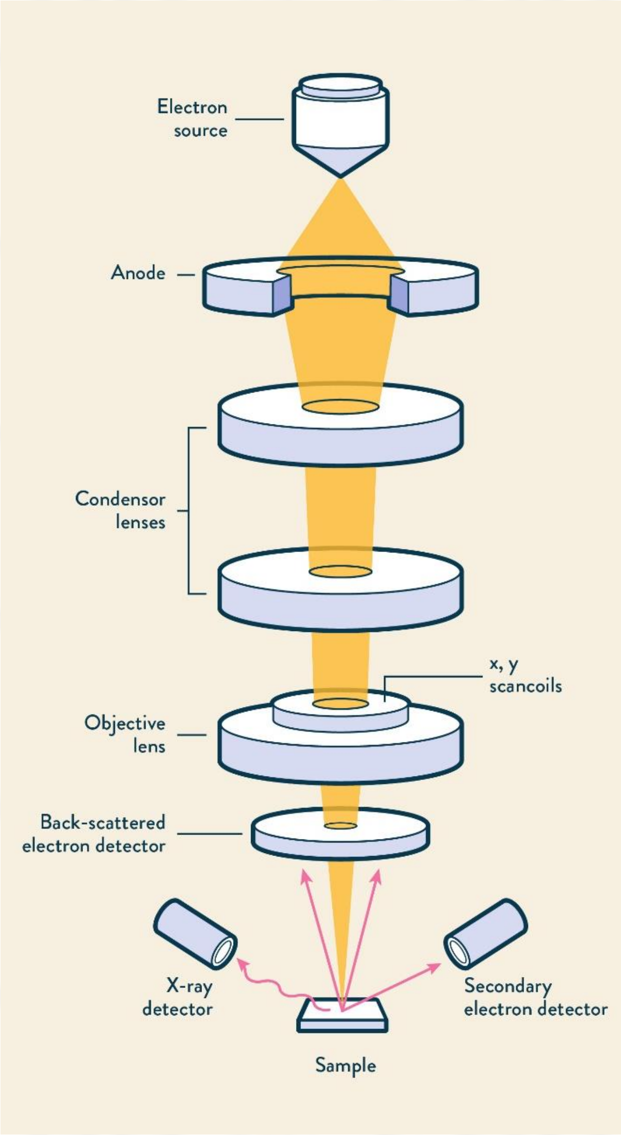
- **Propriedades Estruturais**

→ Morfologia Superficial

→ Morfologia Transversal

→ Composição (EDS)


(a)
SEI 15kV WD20mm SS30 x10,000 1 μm
General Sample 0000 05 Mar 2012
(b)
SEI 20kV x10,000 1 μm
13 Jun 2012


Electron source
Anode
Condensor lenses
x, y scancoils
Objective lens
Back-scattered electron detector
X-ray detector
Secondary electron detector
Sample

DRX – Difração de Raios-X

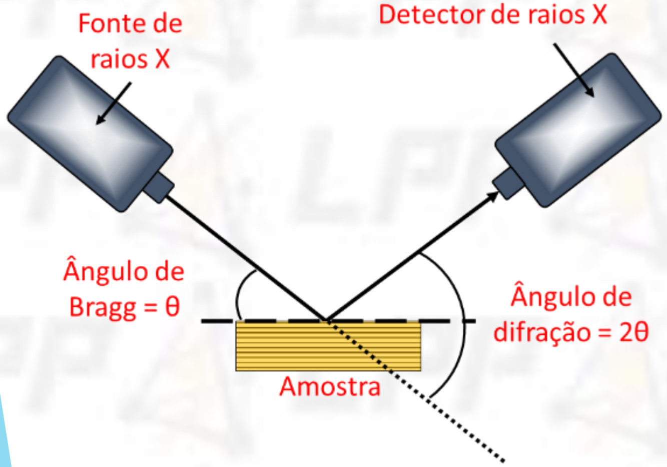
- **Propriedades Estruturais**

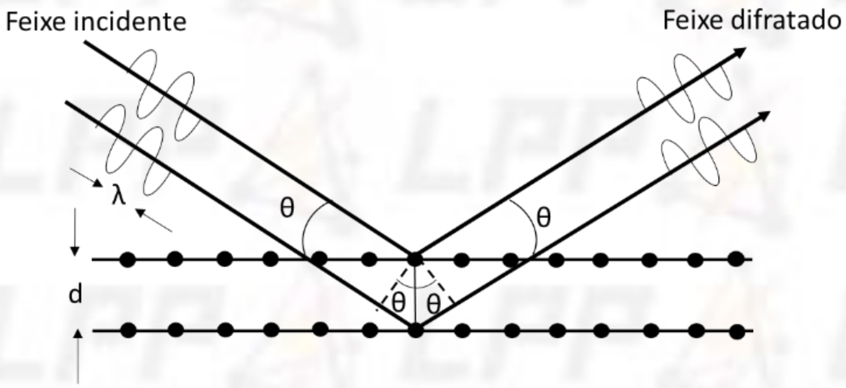
→ Estrutura das fases cristalinas

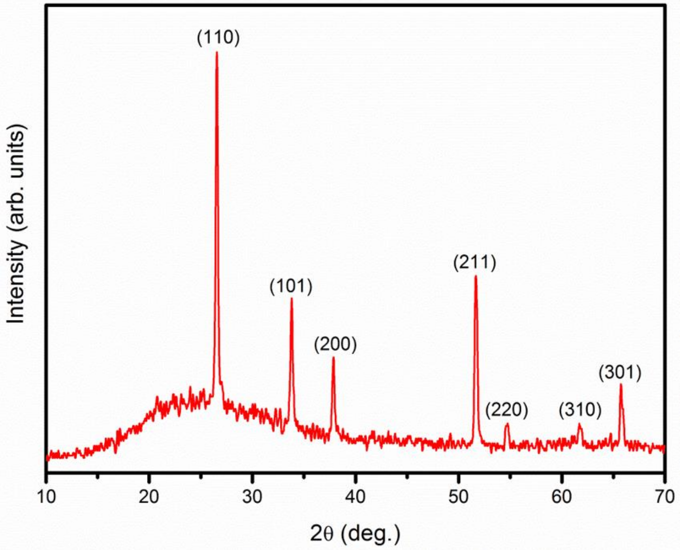
→ Tamanhos de grãos

→ Tensões e parâmetros de rede

→ Textura orientacional

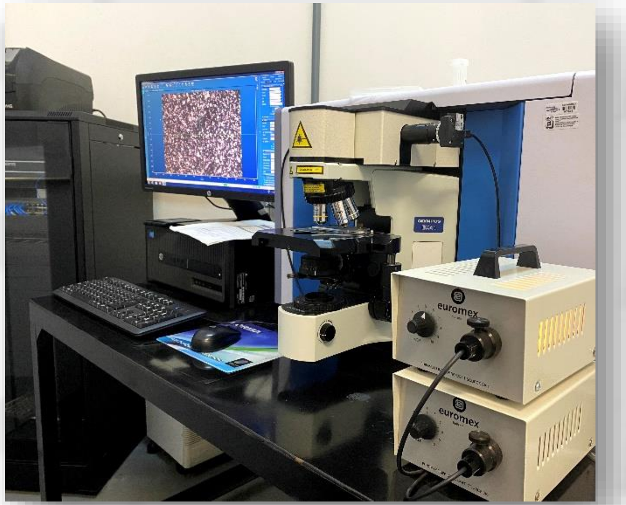

Fonte de raios X
Detector de raios X
Ângulo de Bragg = θ
Ângulo de difração = 2θ
Amostra

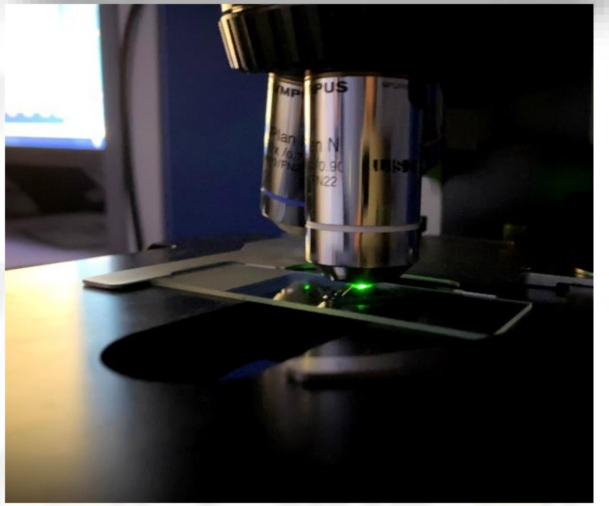

Feixe incidente
Feixe difratado
λ
θ
θ
d
θ
θ

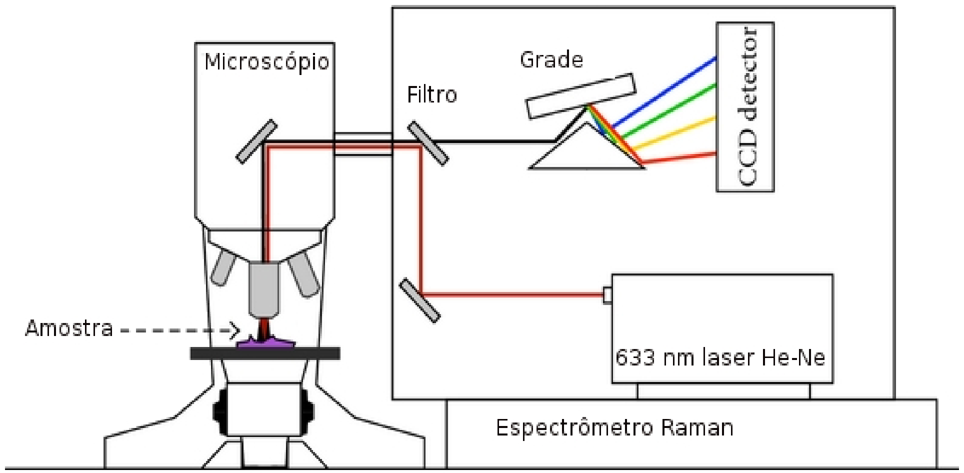


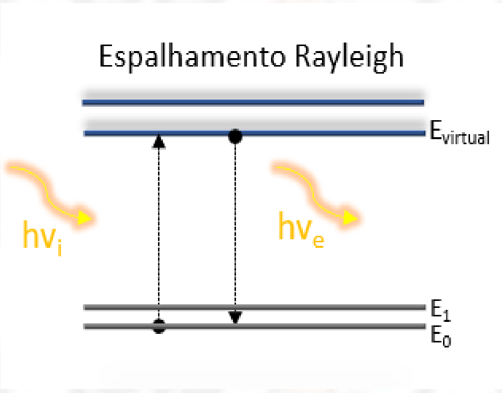
Espectroscopia Raman

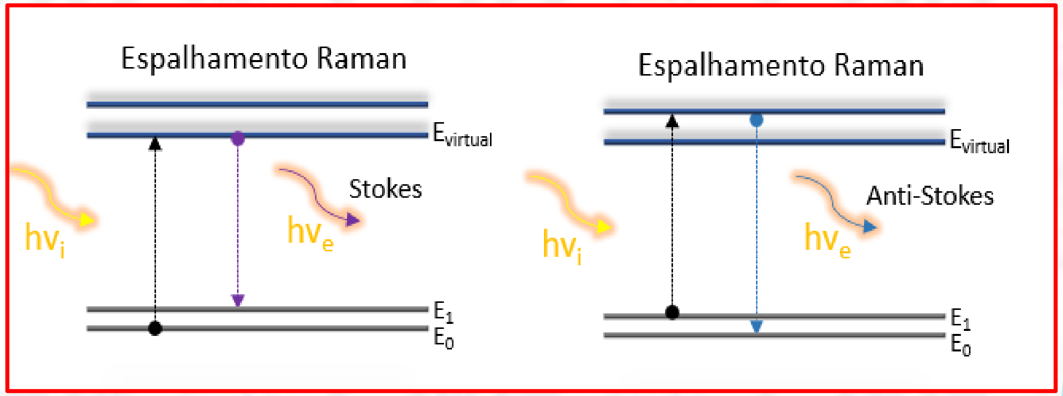
- **Propriedades Estruturais**






Microscópio
Grade
Filtro
CCD detector
Amostra
633 nm laser He-Ne
Espectrômetro Raman


Espalhamento Rayleigh
$E_{virtual}$
$h\nu_i$
$h\nu_e$
E_1
E_0


Espalhamento Raman
$E_{virtual}$
Stokes
$h\nu_i$
$h\nu_e$
E_1
E_0
Espalhamento Raman
$E_{virtual}$
Anti-Stokes
$h\nu_i$
$h\nu_e$
E_1
E_0

Espectroscopia Raman

- **Propriedades Estruturais**

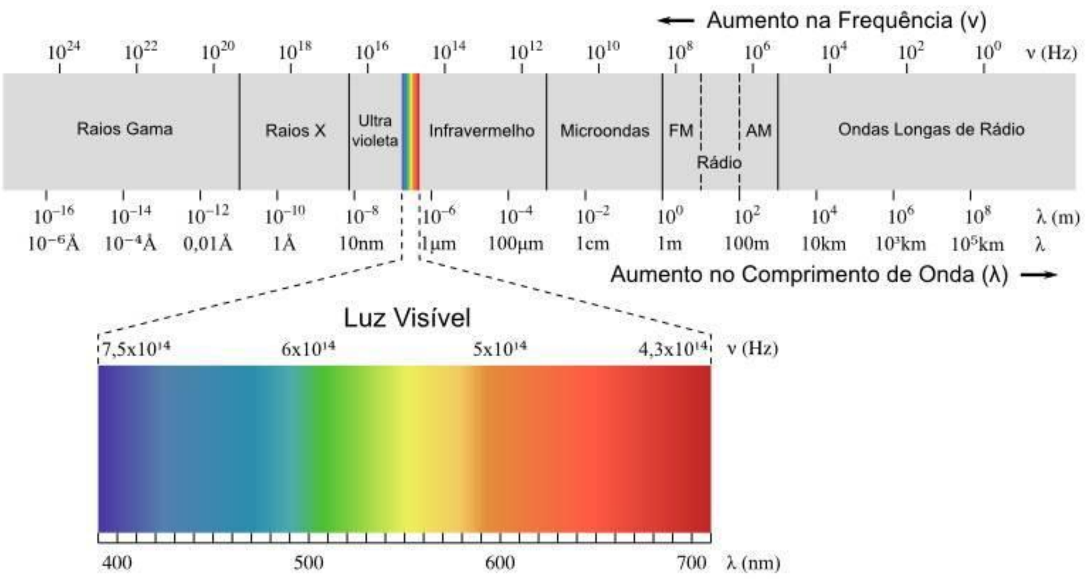
→ Modos vibracionais

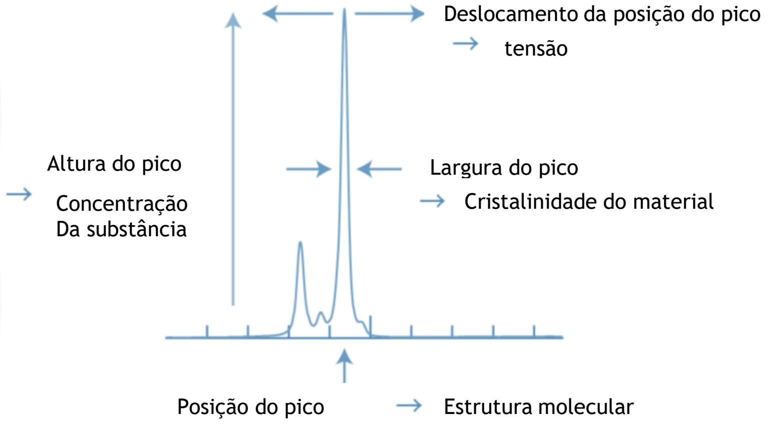
→ Estruturas das fases cristalinas

→ Ligações e defeitos químicos

→ Fases e polimorfismo

→ Contaminação e impurezas


← Aumento na Frequência (ν)
10^{24}
10^{22}
10^{20}
10^{18}
10^{16}
10^{14}
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
10^{0}
ν (Hz)
Raios Gama
Raios X
Ultra violeta
Infravermelho
Microondas
FM
AM
Rádio
Ondas Longas de Rádio
10^{-16}
10^{-14}
10^{-12}
10^{-10}
10^{-8}
10^{-6}
10^{-4}
10^{-2}
10^{0}
10^{2}
10^{4}
10^{6}
10^{8}
λ (m)
10^{-6}Å
10^{-4}Å
0,01Å
1Å
10nm
1μm
100μm
1cm
1m
100m
10km
10^{3}km
10^{5}km
λ
Aumento no Comprimento de Onda (λ) →
Luz Visível
$7,5\times10^{14}$
6×10^{14}
5×10^{14}
$4,3\times10^{14}$
ν (Hz)
400
500
600
700
λ (nm)



Deslocamento da posição do pico

→ tensão

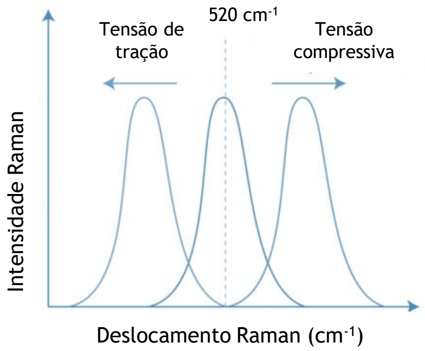
Altura do pico

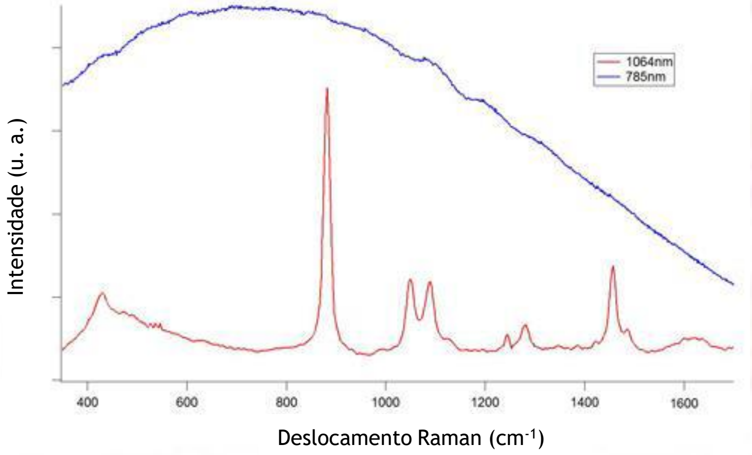
→ Concentração Da substância

Largura do pico

→ Cristalinidade do material

Posição do pico → Estrutura molecular


Tensão de tração
520 cm^{-1}
Tensão compressiva
Intensidade Raman
Deslocamento Raman (cm^{-1})



Espectroscopia Raman

- Vídeo youtube: https://youtu.be/kinwOoDP9Ck

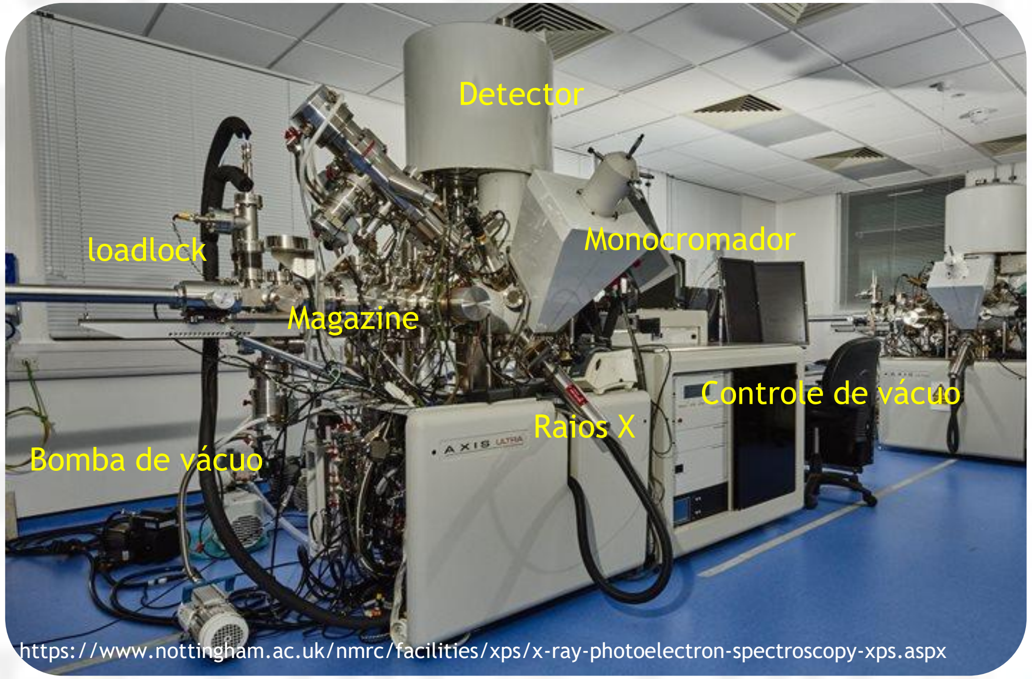
Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS)

- **Propriedades Estruturais**

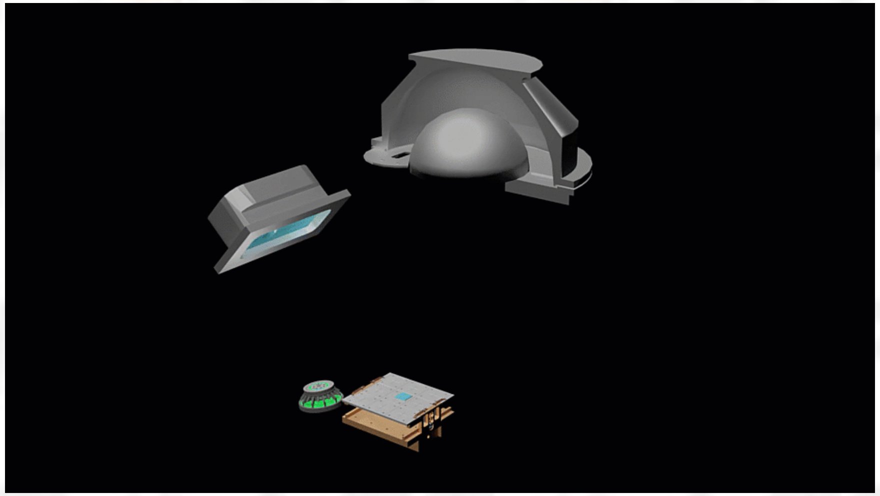
→ Composição superficial

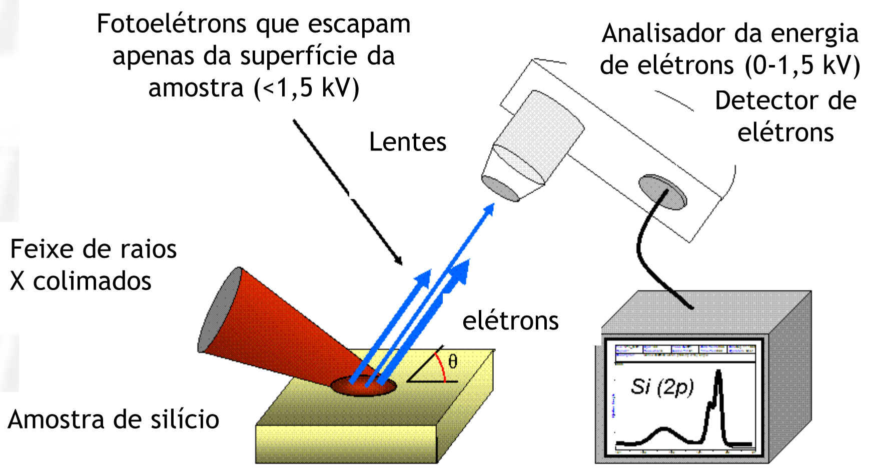
→ Ligações químicas

→ Camadas de até 10 nm.


Detector
loadlock
Monocromador
Magazine
Controle de vácuo
Raios X
Bomba de vácuo
AXIS ULTRA

https://www.nottingham.ac.uk/nmrc/facilities/xps/x-ray-photoelectron-spectroscopy-xps.aspx





Fotoelétrons que escapam apenas da superfície da amostra (<1,5 kV)

Analisador da energia de elétrons (0-1,5 kV)

Detector de elétrons

Lentes

Feixe de raios X colimados

elétrons

Amostra de silício

Amostras normalmente sólidas devido a necessidade de ultra alto vácuo ($<10^{-8}$ Torr)

Espectro de uma amostra de silício

Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS)

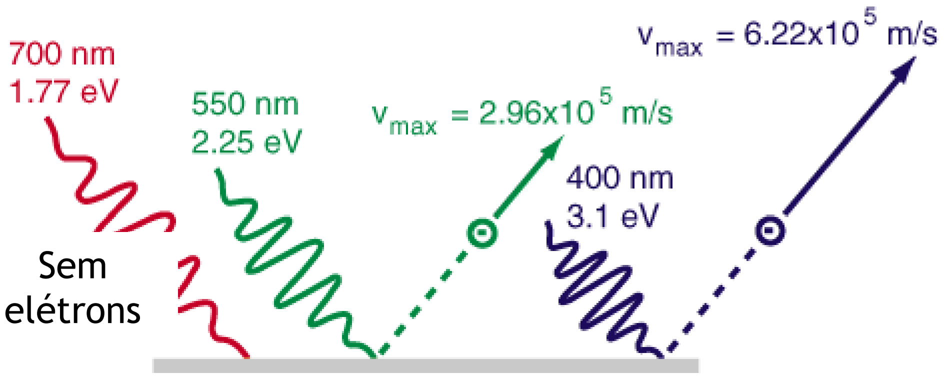
- **Propriedades Estruturais**

→ Composição superficial

→ Ligações químicas

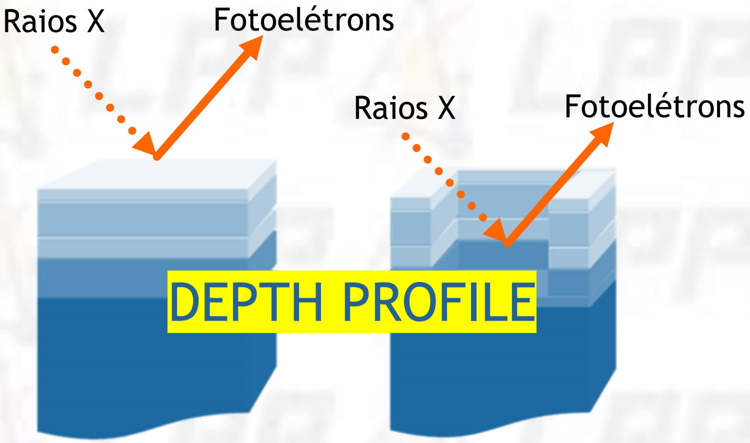
→ Camadas de até 10 nm.

$E_{fóton} = h\nu$


700 nm
1.77 eV
Sem elétrons
550 nm
2.25 eV
$v_{max} = 2.96 \times 10^5$ m/s
400 nm
3.1 eV
$v_{max} = 6.22 \times 10^5$ m/s

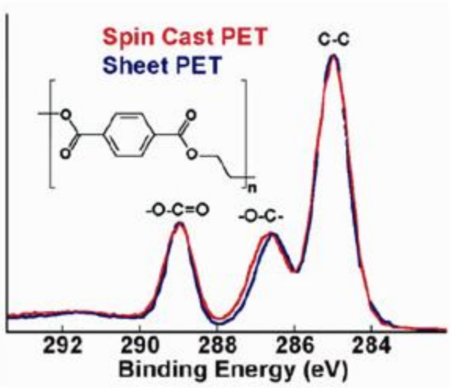
2 eV é requerido para ejetar elétrons

EFEITO FOTOELÉTRICO


Raios X
Fotoelétrons
Raios X
Fotoelétrons

DEPTH PROFILE

ESPECTRO



The C 1s region of the XPS spectrum from spin-cast and sheet polyethylene terephthalate (PET). Carbon is present in three distinct chemical states. The structure of PET is illustrated in the inset. (Spectra by Dr. G. Beamson, RUSTI, Daresbury, UK.)

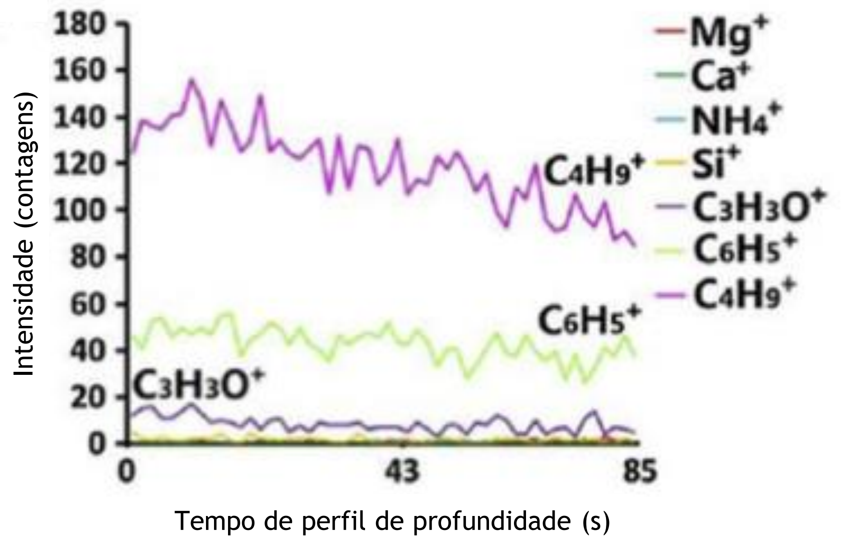
https://xpssimplified.com/whatisxps.php

Espectroscopia de massa de íons secundários (SIMS)

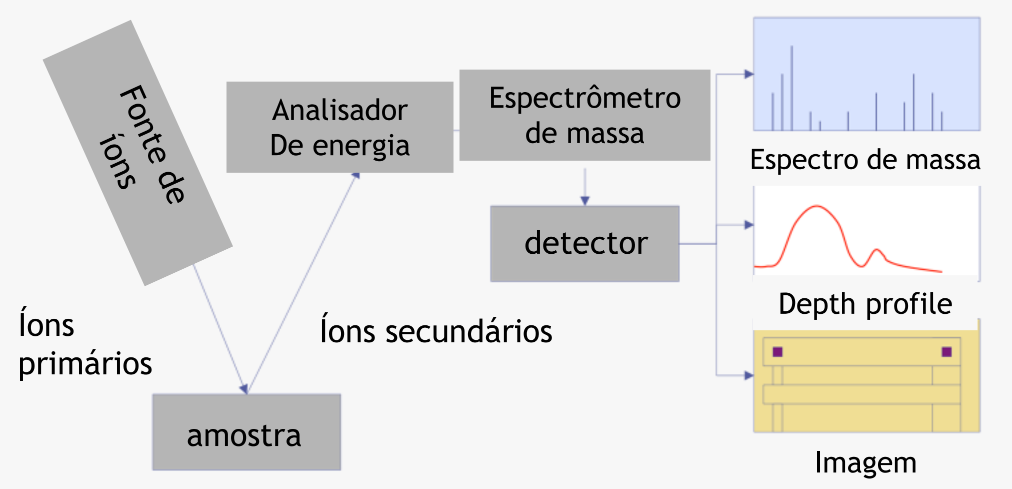
- **Propriedades Estruturais**

→ Composição em perfil

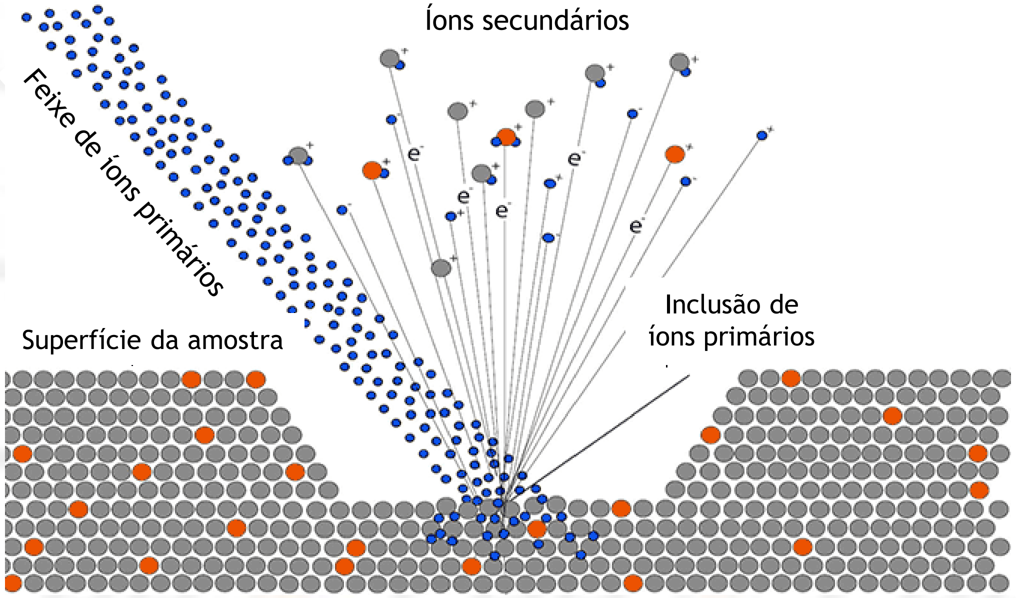
doi.org/10.1016/j.aca.2017.07.042



https://www.semitracks.com/reference-material/failure-and-yield-analysis/failure-analysis-materials-characterization/secondary-ion-mass-spectrometry.php



Fonte de íons
Analisador De energia
Espectrômetro de massa
detector
Íons primários
Íons secundários
amostra
Espectro de massa
Depth profile
Imagem



Íons secundários
Feixe de íons primários
e-
Superfície da amostra
Inclusão de íons primários

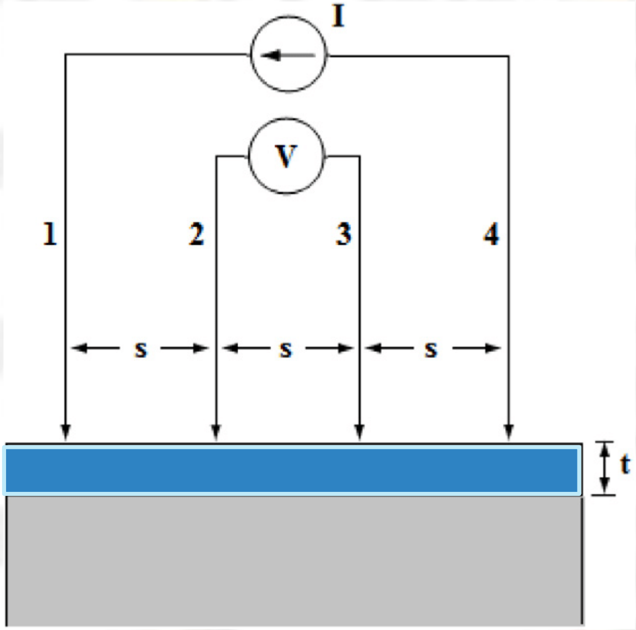
https://www.cameca.com/products/sims/technique

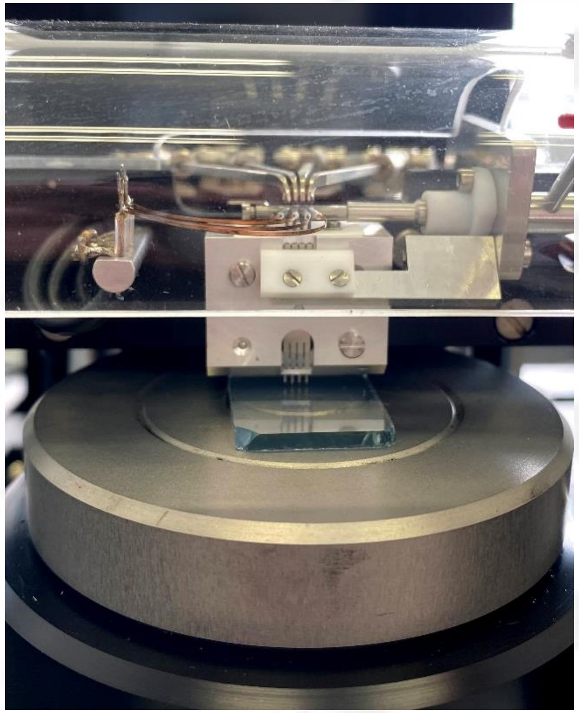
doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1218

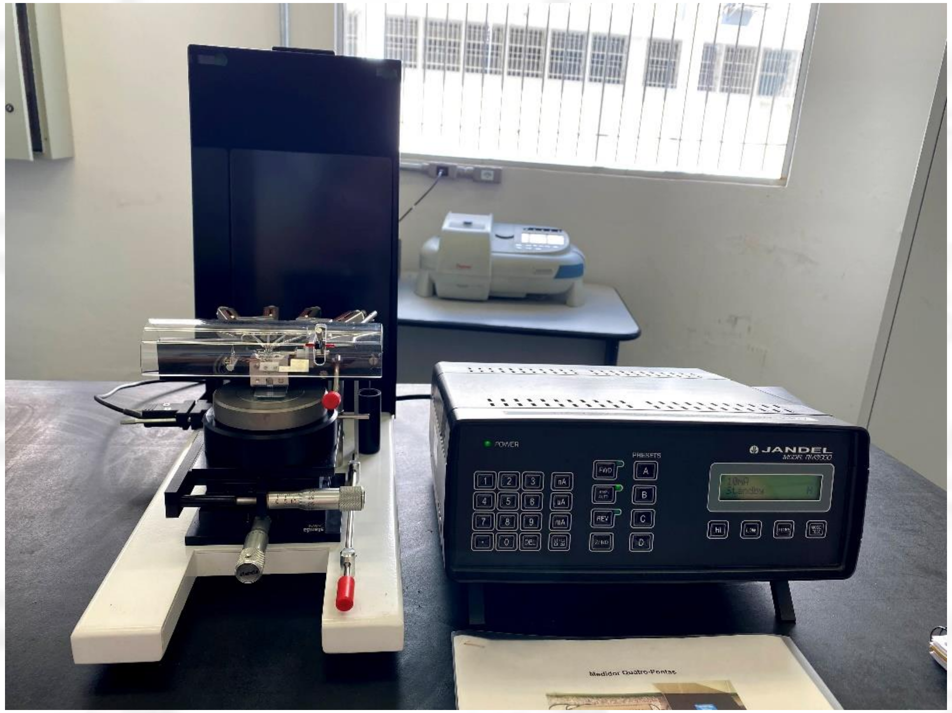
4-Pontas

- **Propriedades elétricas/eletrônicas**

→ Resistividade de folha


I
V
1
2
3
4
s
s
s
t





4-Pontas

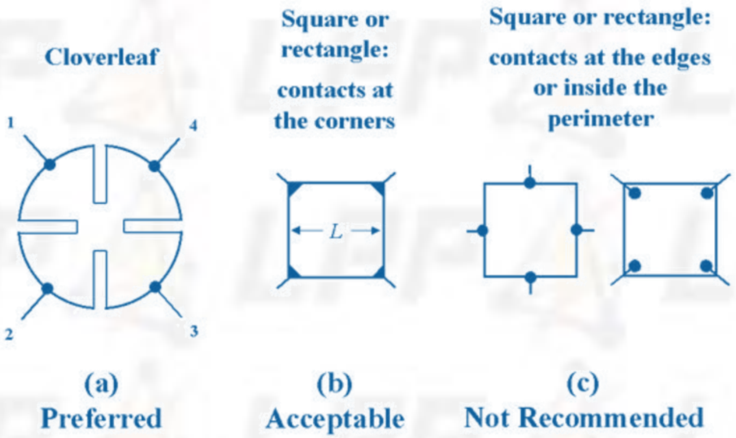
- Vídeo Youtube: https://youtu.be/I6Sq01_20qc

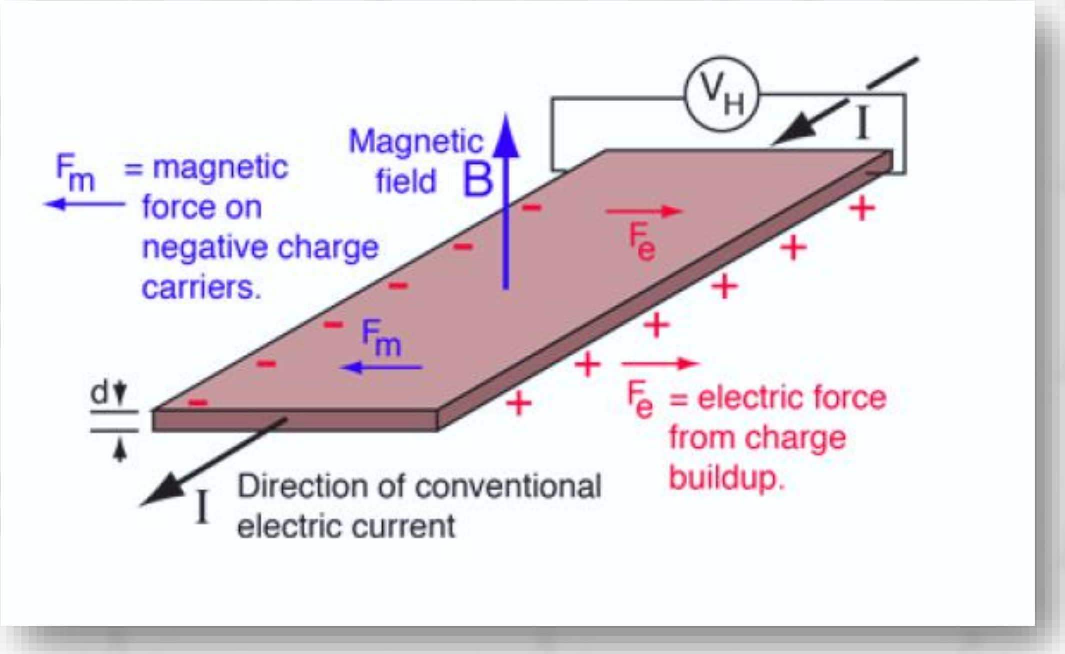
Hall (Efeito hall)

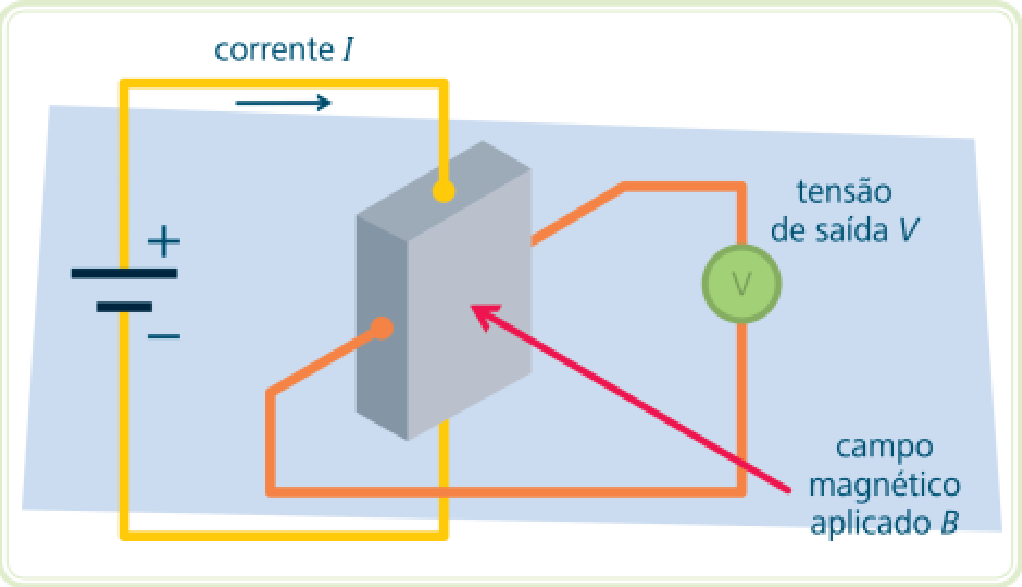
- **Propriedades elétricas/eletrônicas**

→ Densidade de portadores

→ Tipo de portador majoritário (e^- ou h^+)


Cloverleaf
1
4
2
3
Square or rectangle:
contacts at the corners
L
Square or rectangle:
contacts at the edges or inside the perimeter
(a)
Preferred
(b)
Acceptable
(c)
Not Recommended


V_H
I
Magnetic field B
F_m = magnetic force on negative charge carriers.
F_e
F_m
d
I
Direction of conventional electric current
F_e = electric force from charge buildup.


corrente I
tensão de saída V
V
+
−
campo magnético aplicado B

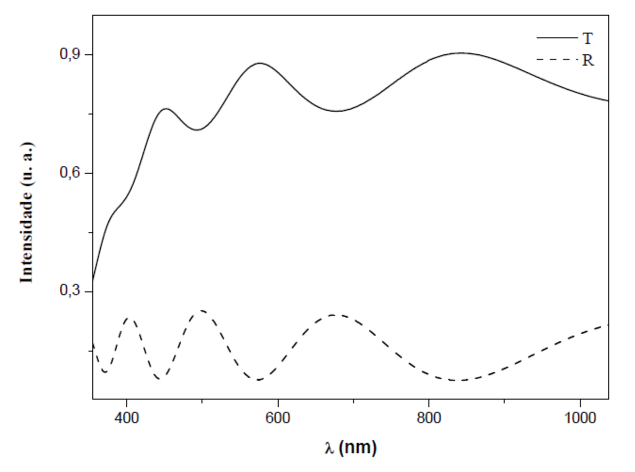
Transmitância (T%) e Reflectância (R%)

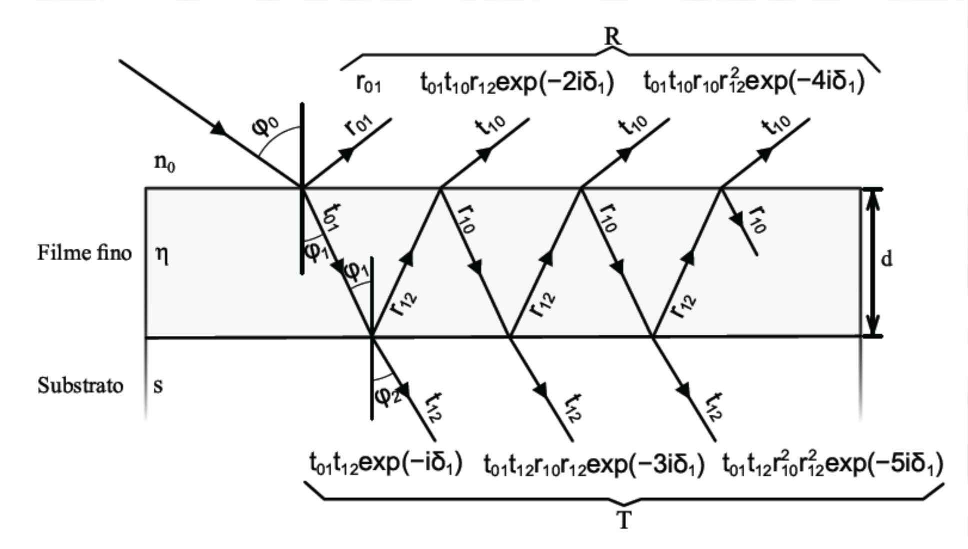
- **Propriedades ópticas**

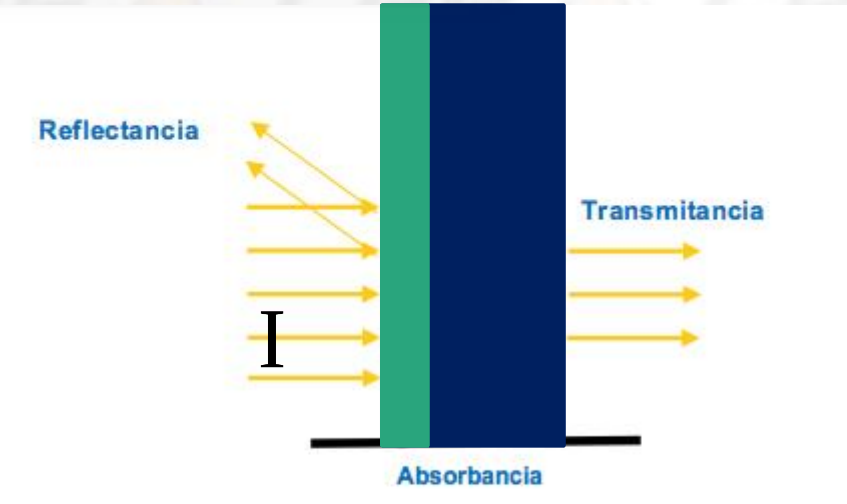
→ Índice de refração

→ GAP (filmes semicondutores)

→ Outras propriedades - Espessura




R
r_{01}
$t_{01}t_{10}r_{12}\exp(-2i\delta_1)$
$t_{01}t_{10}r_{10}r_{12}^2\exp(-4i\delta_1)$
φ_0
r_{01}
t_{10}
t_{10}
t_{10}
n_0
Filme fino
η
t_{01}
φ_1
φ_1
r_{10}
r_{10}
r_{10}
r_{12}
r_{12}
r_{12}
d
Substrato
s
φ_2
t_{12}
t_{12}
t_{12}
$t_{01}t_{12}\exp(-i\delta_1)$
$t_{01}t_{12}r_{10}r_{12}\exp(-3i\delta_1)$
$t_{01}t_{12}r_{10}^2r_{12}^2\exp(-5i\delta_1)$
T


Reflectancia
Transmitancia
I
Absorbancia

Ensaio de Elipsometria

- **Propriedades ópticas**

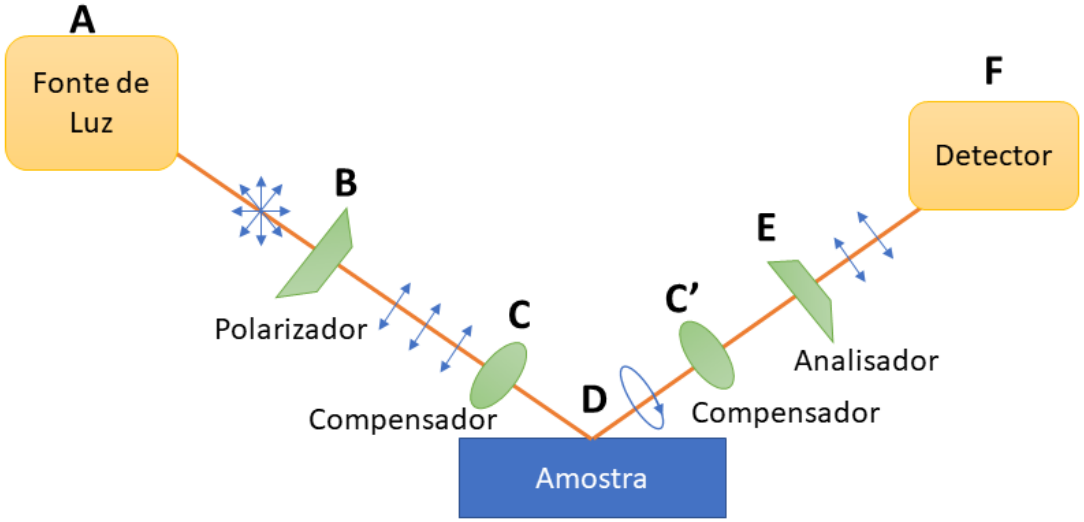
→ Índice de refração

→ Gap (filmes semicondutores)

→ Outras propriedades – Espessura, composição, rugosidade superficial

$$\Psi = \frac{|r_p|}{|r_s|}$$

$$\Delta = \delta_{rp} - \delta_{rs}$$


A
Fonte de Luz
B
Polarizador
C
Compensador
D
Amostra
C'
Compensador
E
Analisador
F
Detector

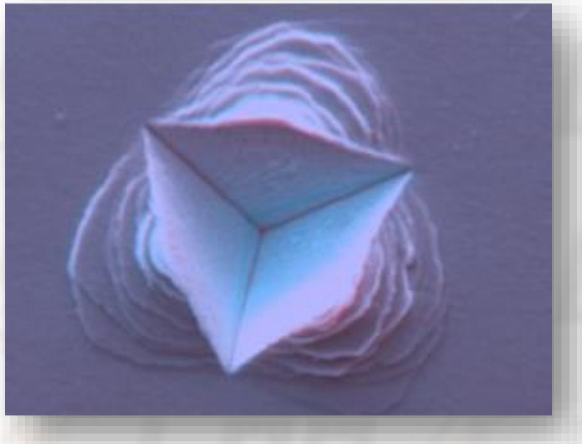
Nanodureza

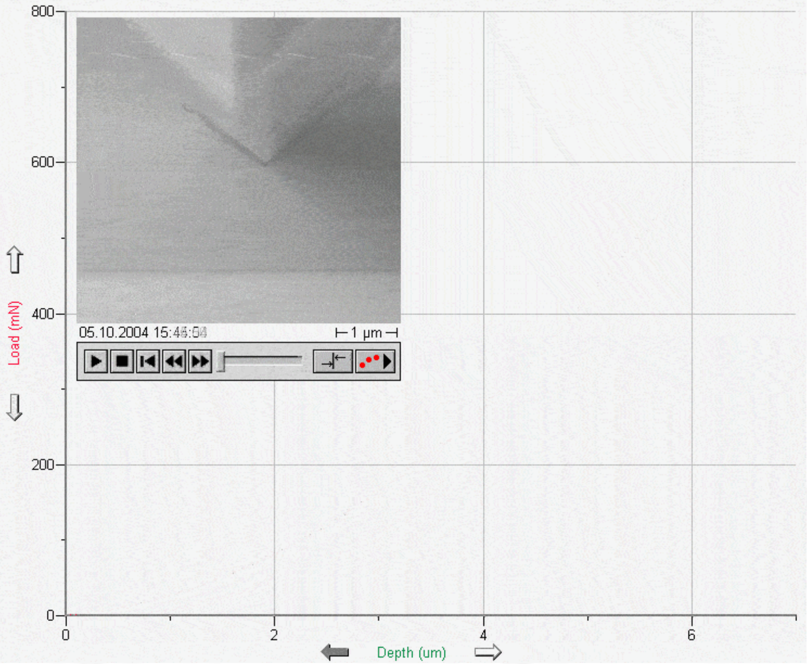
- **Propriedades Mecânicas**

→ Dureza

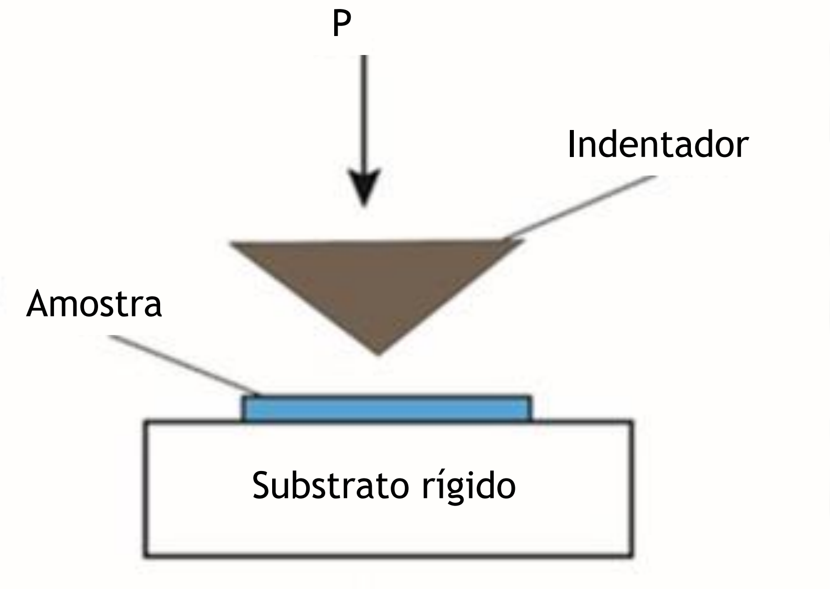
→ Elasticidade

→ Aderência




800
600
400
200
0
Load (mN)
05.10.2004 15:44:54
1 µm
0
2
4
6
Depth (um)

https://alemnis.com/indentation/

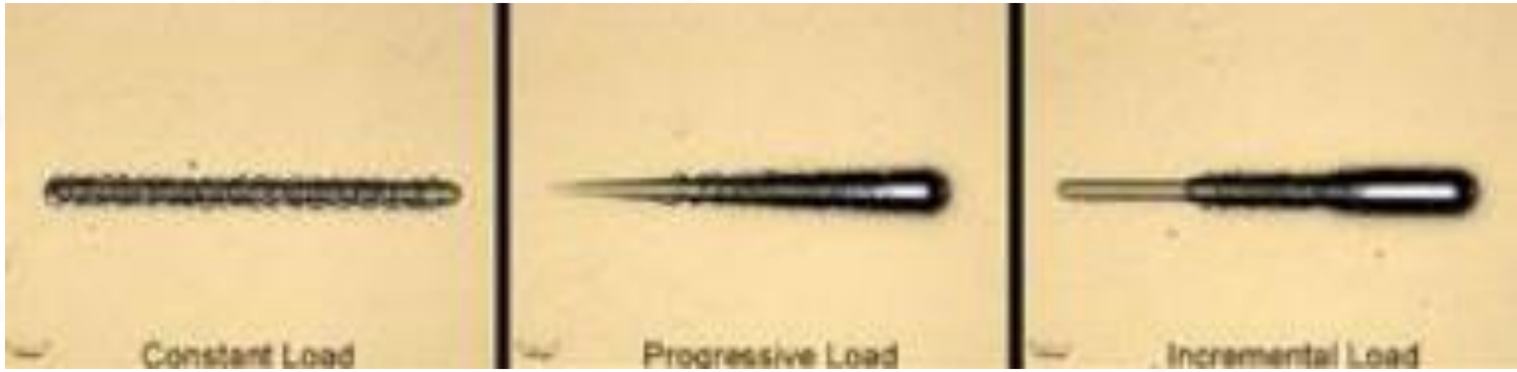

P
Indentador
Amostra
Substrato rígido

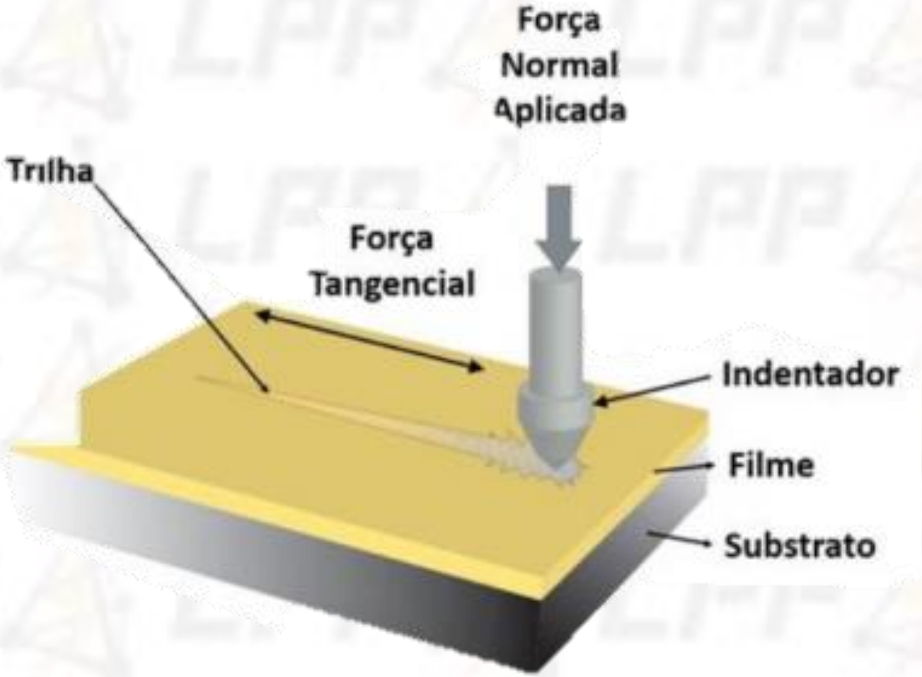
Scratch Test

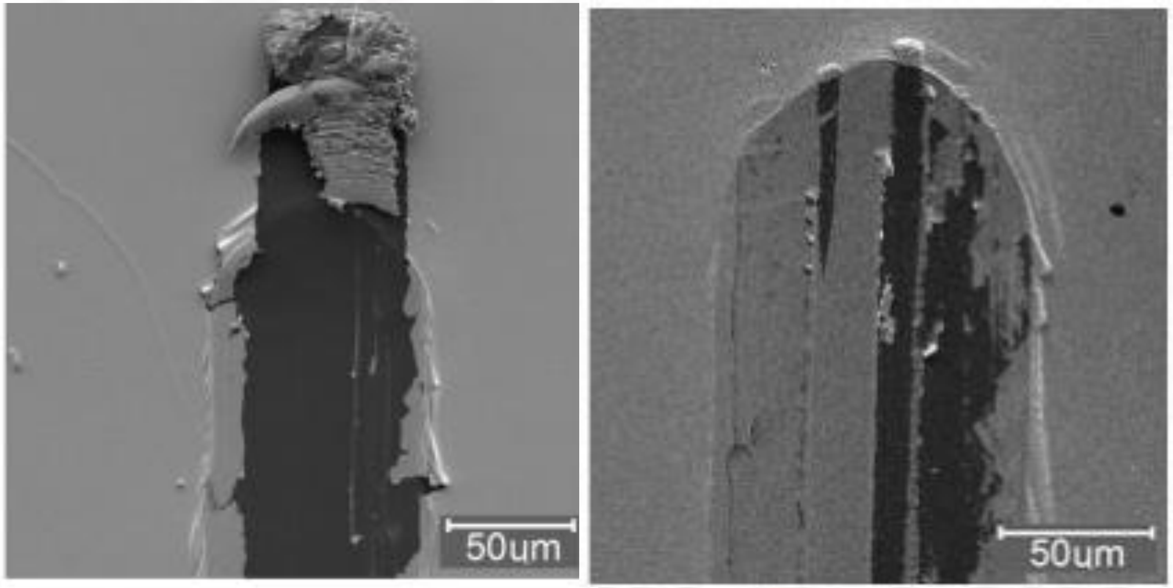
- **Propriedades Mecânicas**

→ Adesão do filme

→ Propriedades tribológicas


Constant Load
Progressive Load
Incremental Load


Força
Normal
Aplicada
Trilha
Força
Tangencial
Indentador
Filme
Substrato

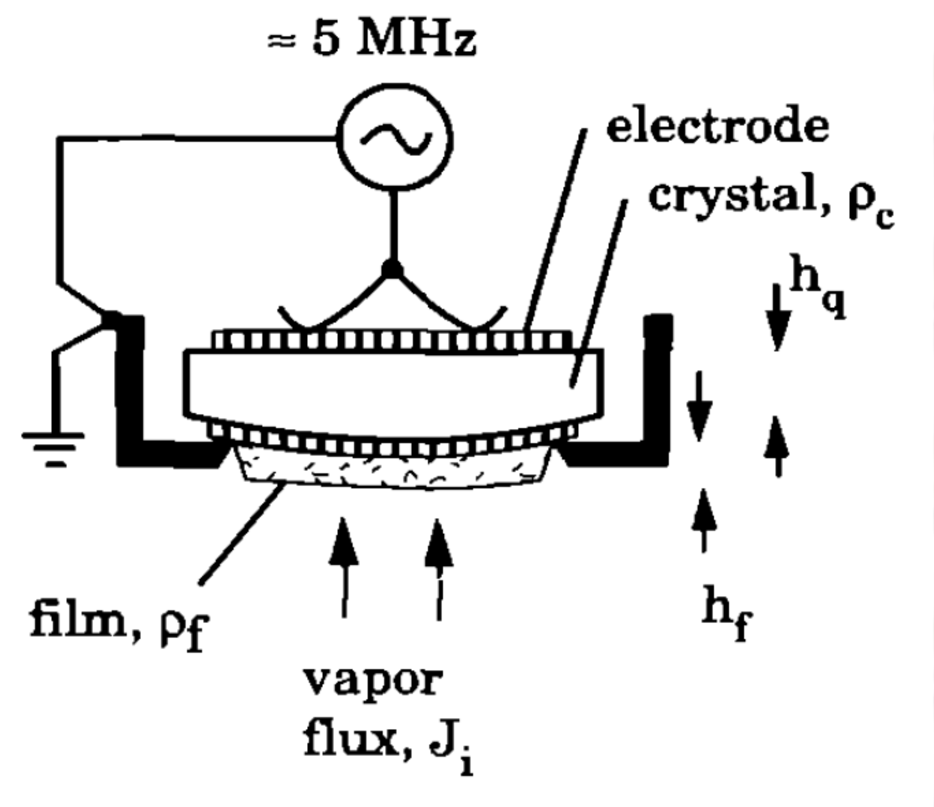


Balança de Quartzo

- **Monitoramento de Deposição**

→ Taxa de deposição instantânea

→ Espessura acumulada


≈ 5 MHz
electrode
crystal, ρ_c
h_q
film, ρ_f
h_f
vapor flux, J_i

Interferência óptica (reflexão/refração)

- **Monitoramento de Deposição**
- Interferência óptica (reflexão/refração) com ou sem elipsometria

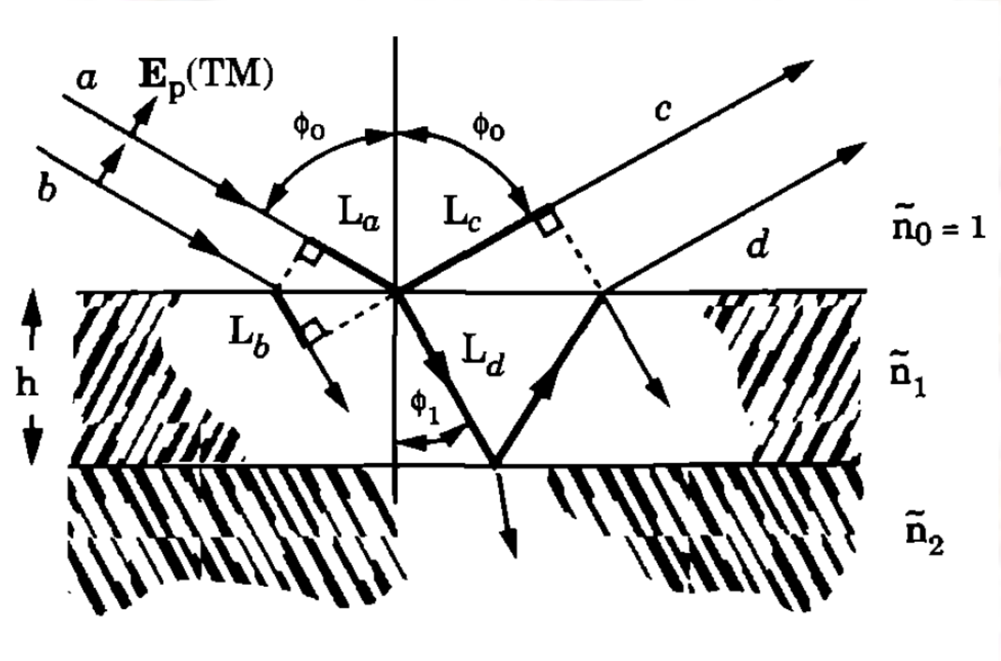
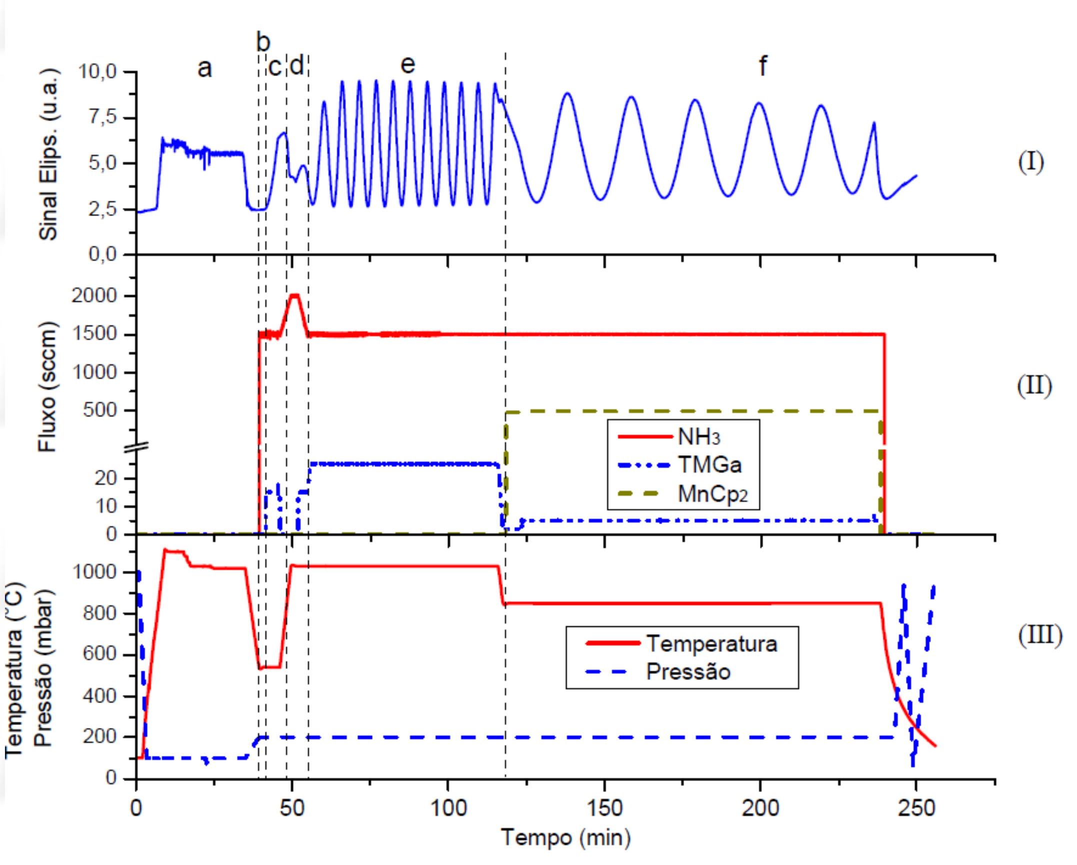

a
E_p(TM)
b
ϕ_o
ϕ_o
c
d
L_a
L_c
L_b
L_d
$\tilde{n}_0 = 1$
$\tilde{n}_1$
$\tilde{n}_2$
h
ϕ_1

Figure 4.18 Geometry of refraction and interference.

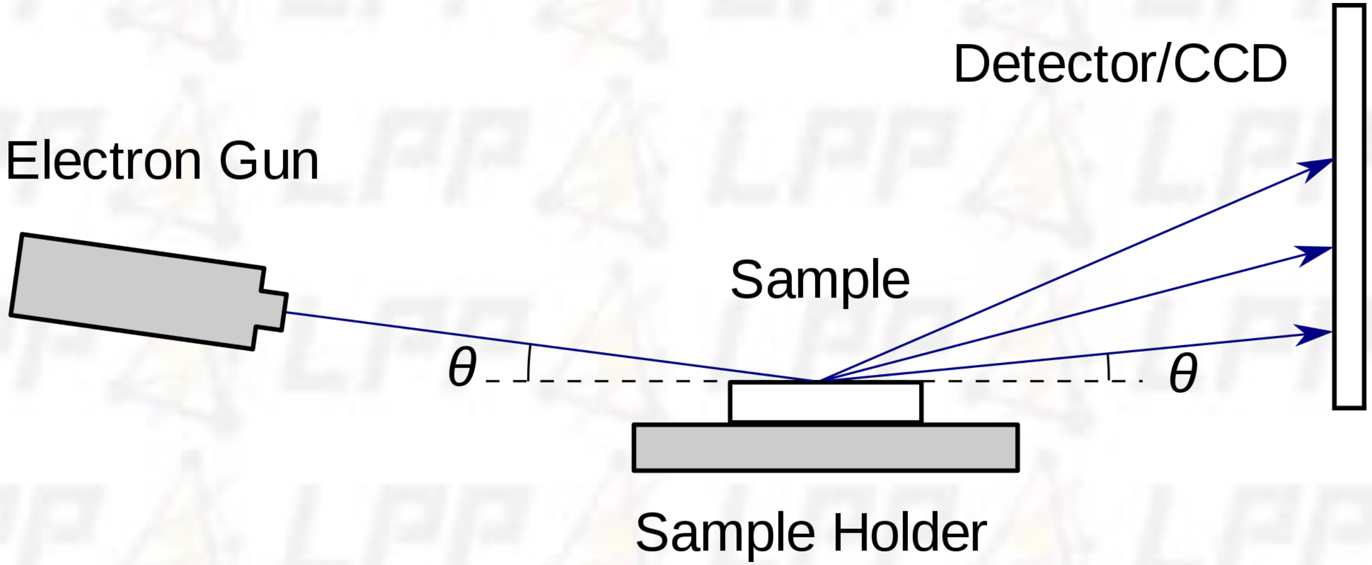


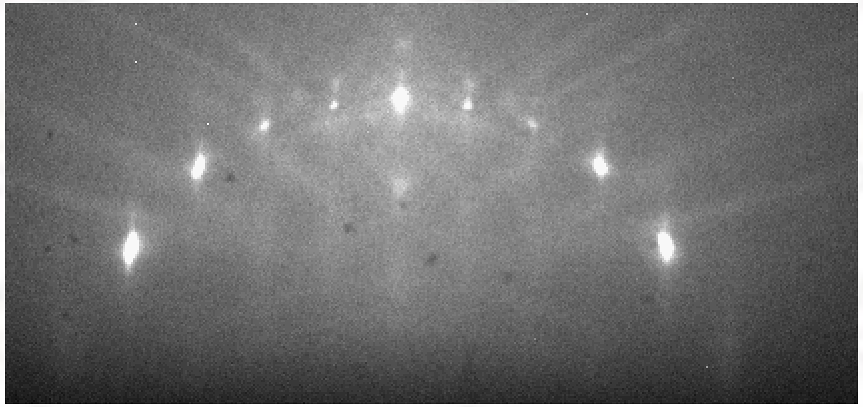
RHEED – Difração de elétrons de alta energia

- **Monitoramento de deposição**

→ Energia de 10 a 100 KeV

→ Informação somente da última camada atômica do filme (incidência rasante)


Detector/CCD
Electron Gun
Sample
θ
θ
Sample Holder



LPP
Laboratório de Plasmas e Processos

INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE AERONÁUTICA

Obrigada!