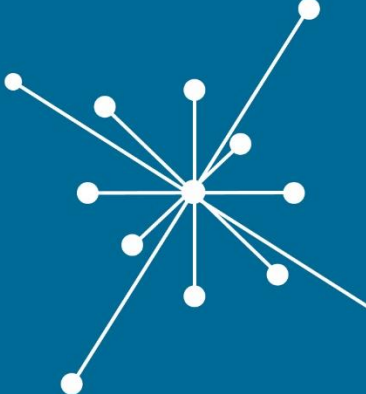
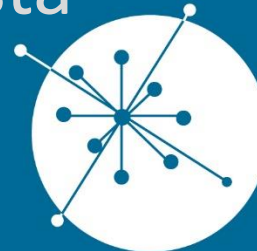




# Produção e qualidade dos raios X - Parte 2

FÍSICA DAS RADIAÇÕES I

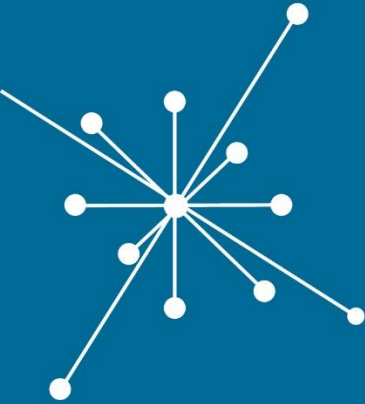
Paulo R. Costa



GRUPO DE  
**DOSIMETRIA  
DAS RADIAÇÕES**  
e FÍSICA MÉDICA

---

IFUSP - Instituto de Física da USP



Então, que propriedades deve ter o material do anodo?



# Tubos de raios X

## — Anodo

- Material

- Máxima eficiência –  $Z$  alto
- Alto ponto de fusão
- Alta condutividade térmica
- Baixa pressão de vapor
- Boas propriedades mecânicas

- Solução

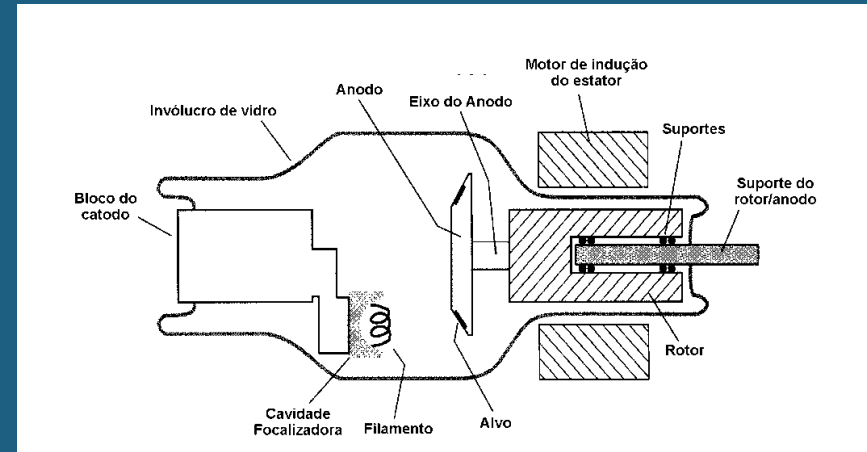
- Tungstênio –  $Z = 74$ 
  - » ponto de fusão em  $3.400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ou ligas metálicas W/Re (90/10) -  $Z = 75$ 
  - » ponto de fusão em  $3.170\text{ }^{\circ}\text{C}$



# Tubos de raios X

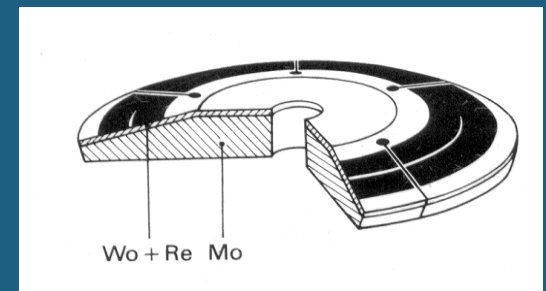
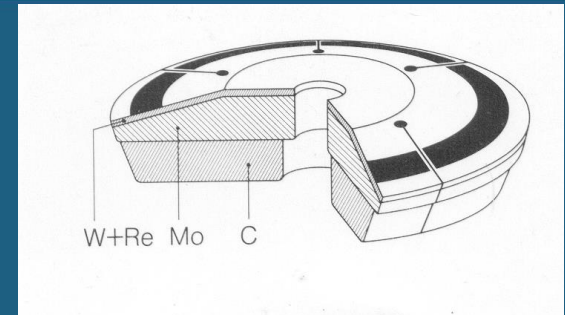
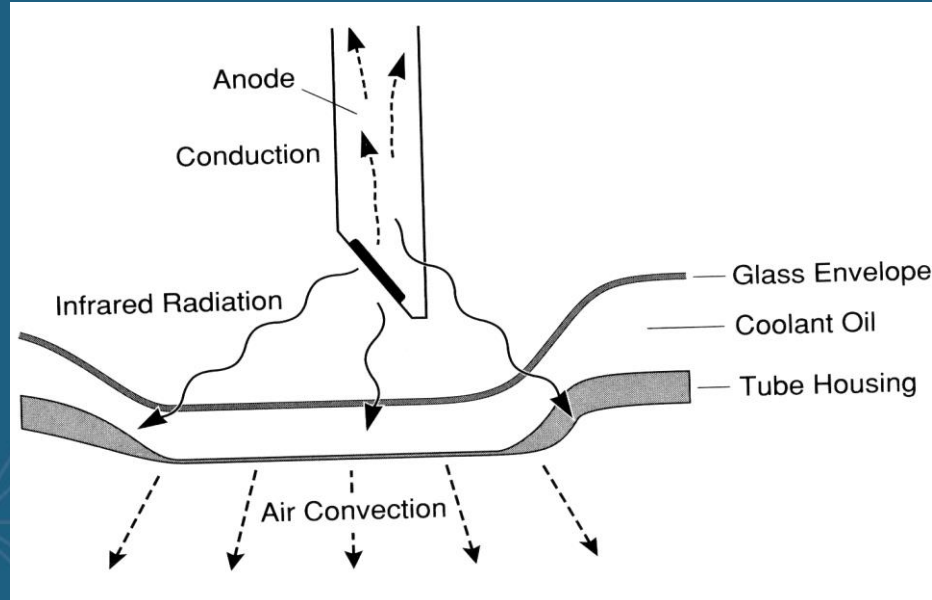
## — Rotação

- Estator
  - indução
  - 3600 – 10800 rpm
  - Vários giros durante uma exposição
- Rolamentos
  - sem lubrificantes líquidos
    - » prata
  - Contato pequeno para transmissão de calor
- Eixo de Mo
  - Baixa condutividade térmica
  - Troca de calor por irradiação
- Estabilidade mecânica



# Tubos de raios X

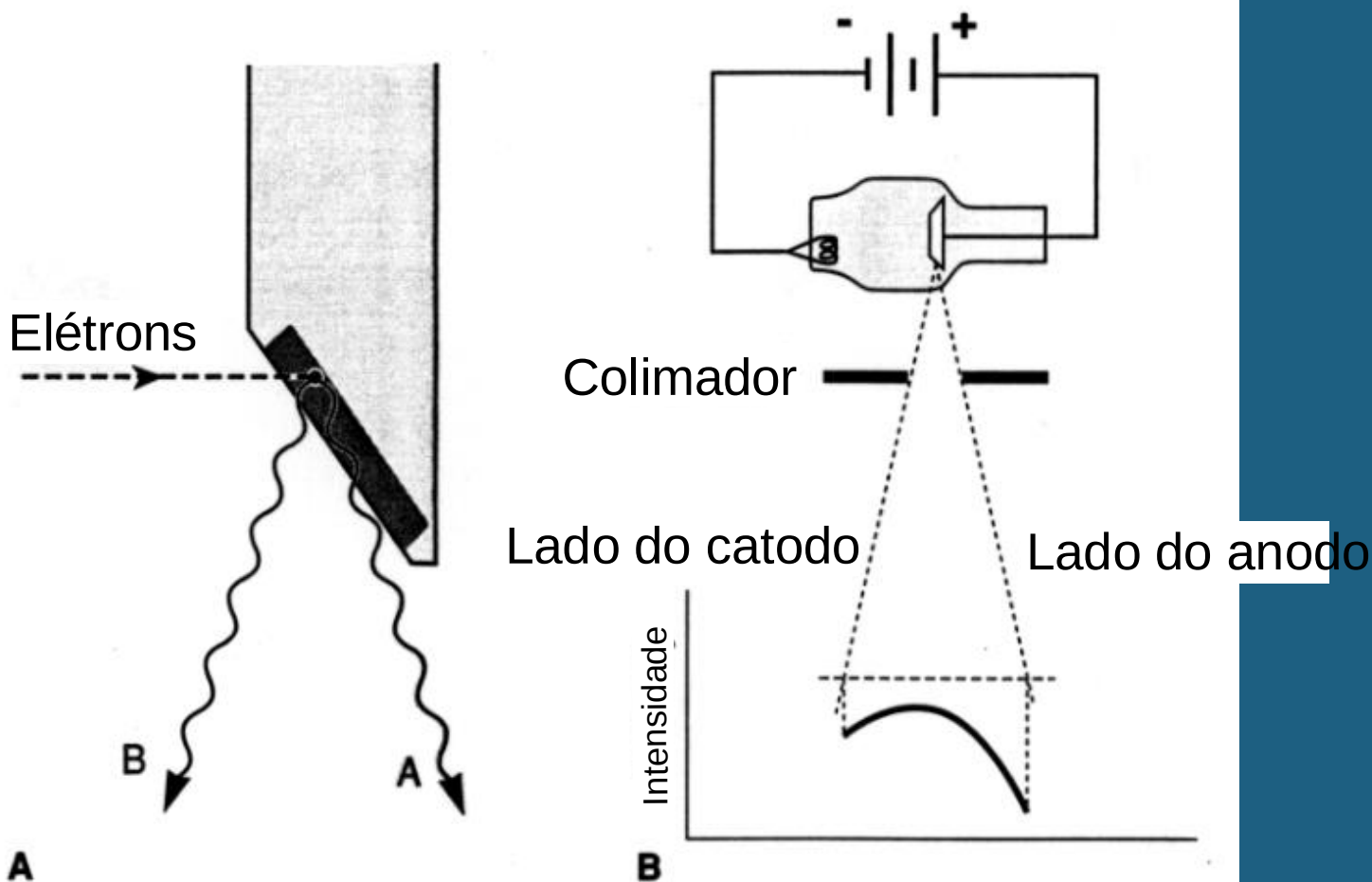
- Dissipação por condução
  - Base de Molibdênio –  $Z = 42$ 
    - » Fusão em  $2.620\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - » Baixa condutividade térmica



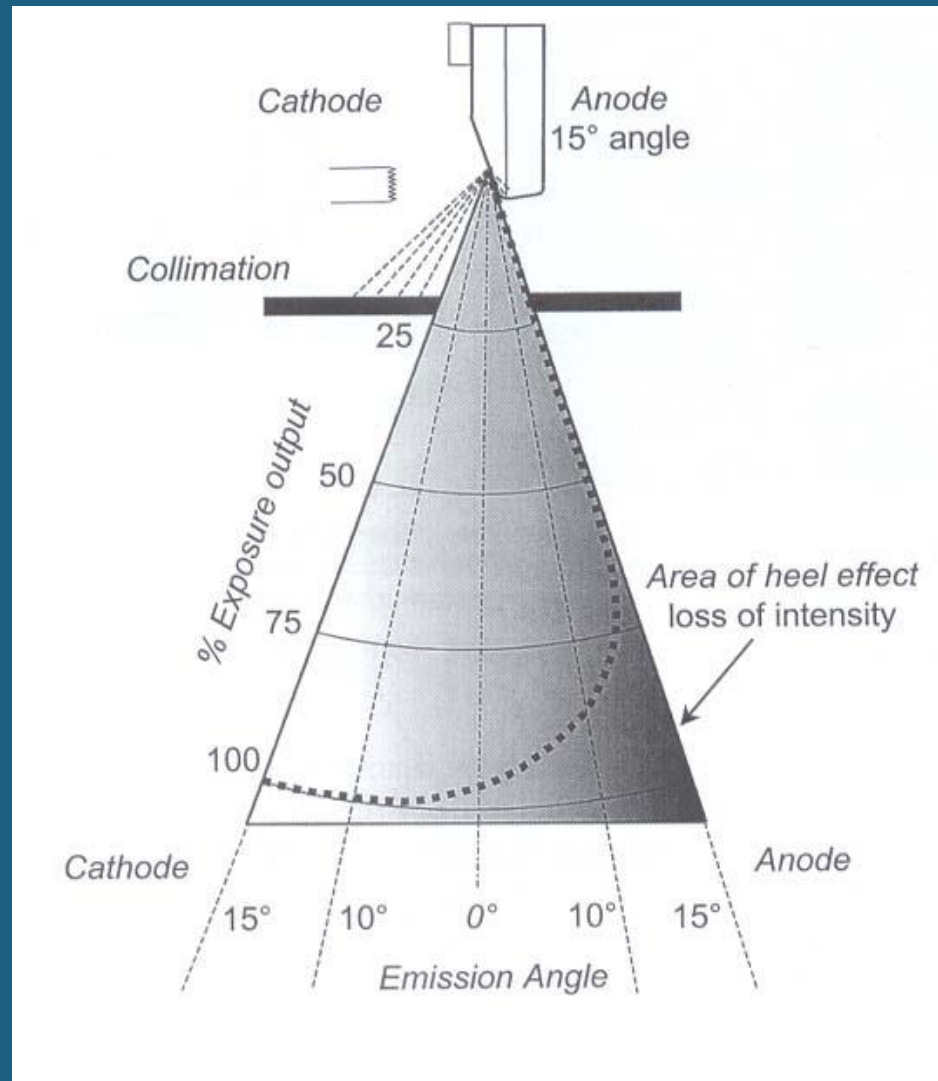
# Tubos de raios X

- Efeito anódico
- Variação da intensidade dos raios X
  - no plano paralelo ao eixo anodo-catodo
  - função do ângulo do anodo (de  $7^\circ$  a  $20^\circ$ )
- Absorção dos fótons emitidos com ângulo pequeno
- O envelhecimento do anodo
  - aumenta o efeito anódico

# Tubos de raios X



# Tubos de raios X



IN-IDE  
END

2.0

MAXIMUM DENSITY

OPTICAL  
DENSITY

1.0

0.5

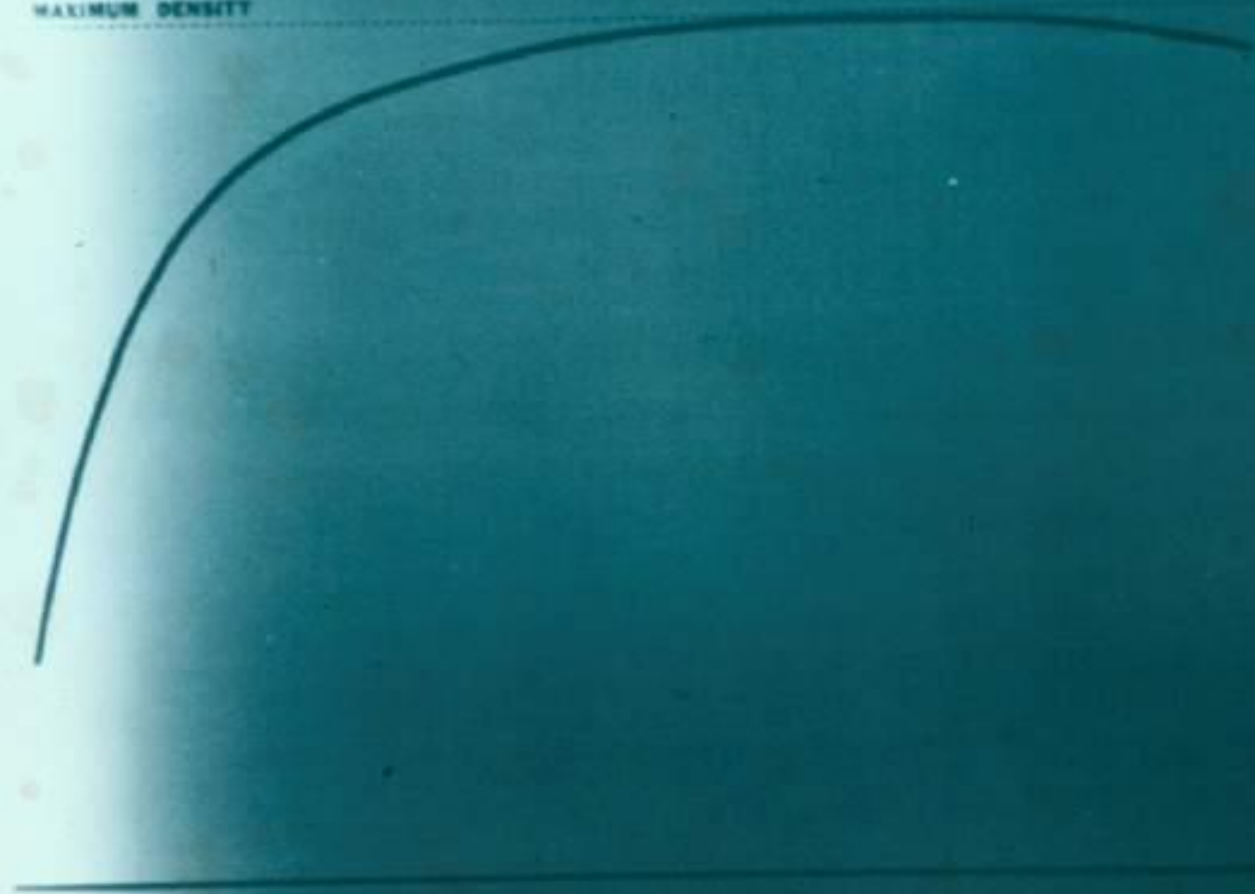
0.2

0.1

0.05

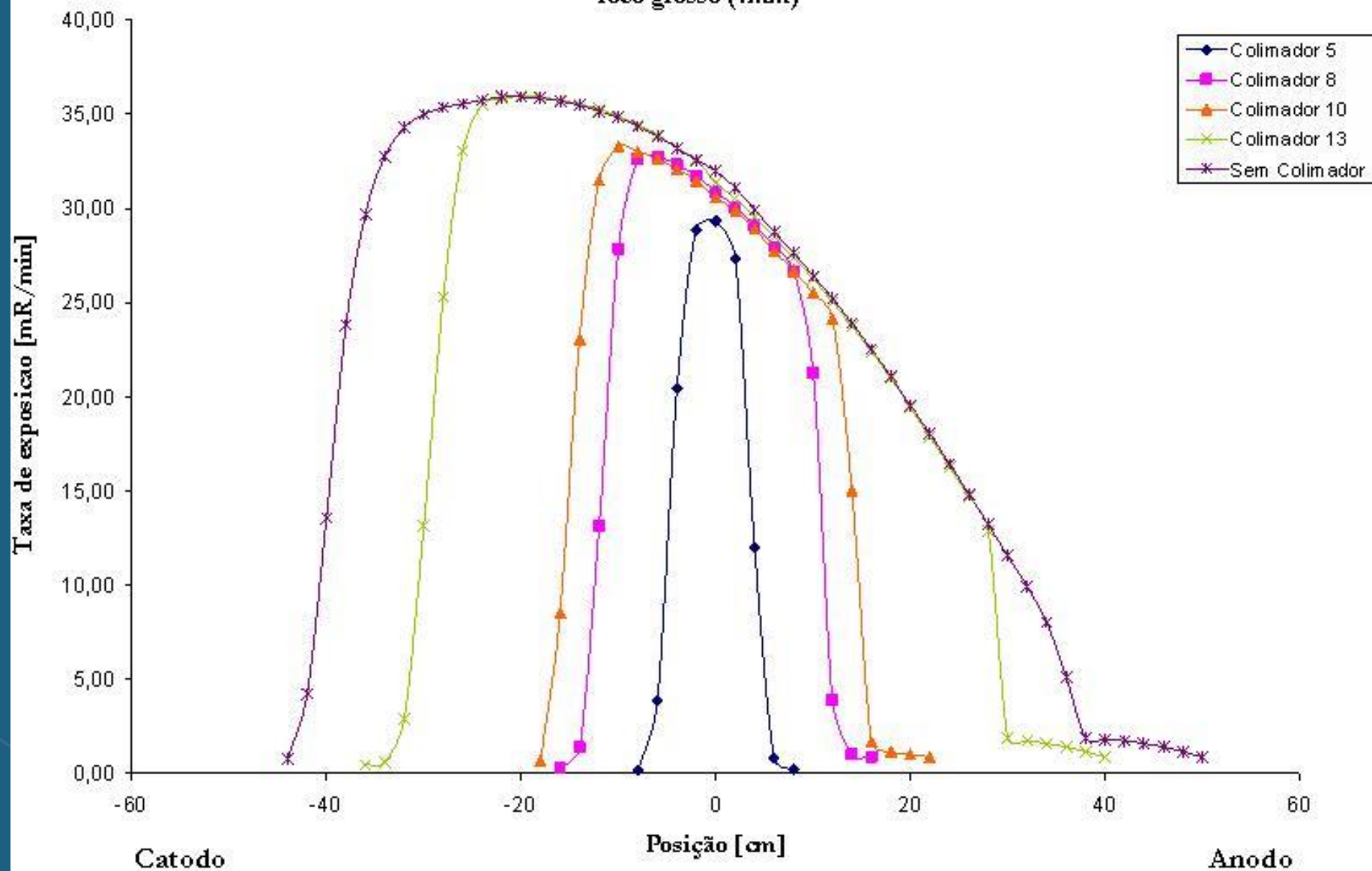
0.02

0.01

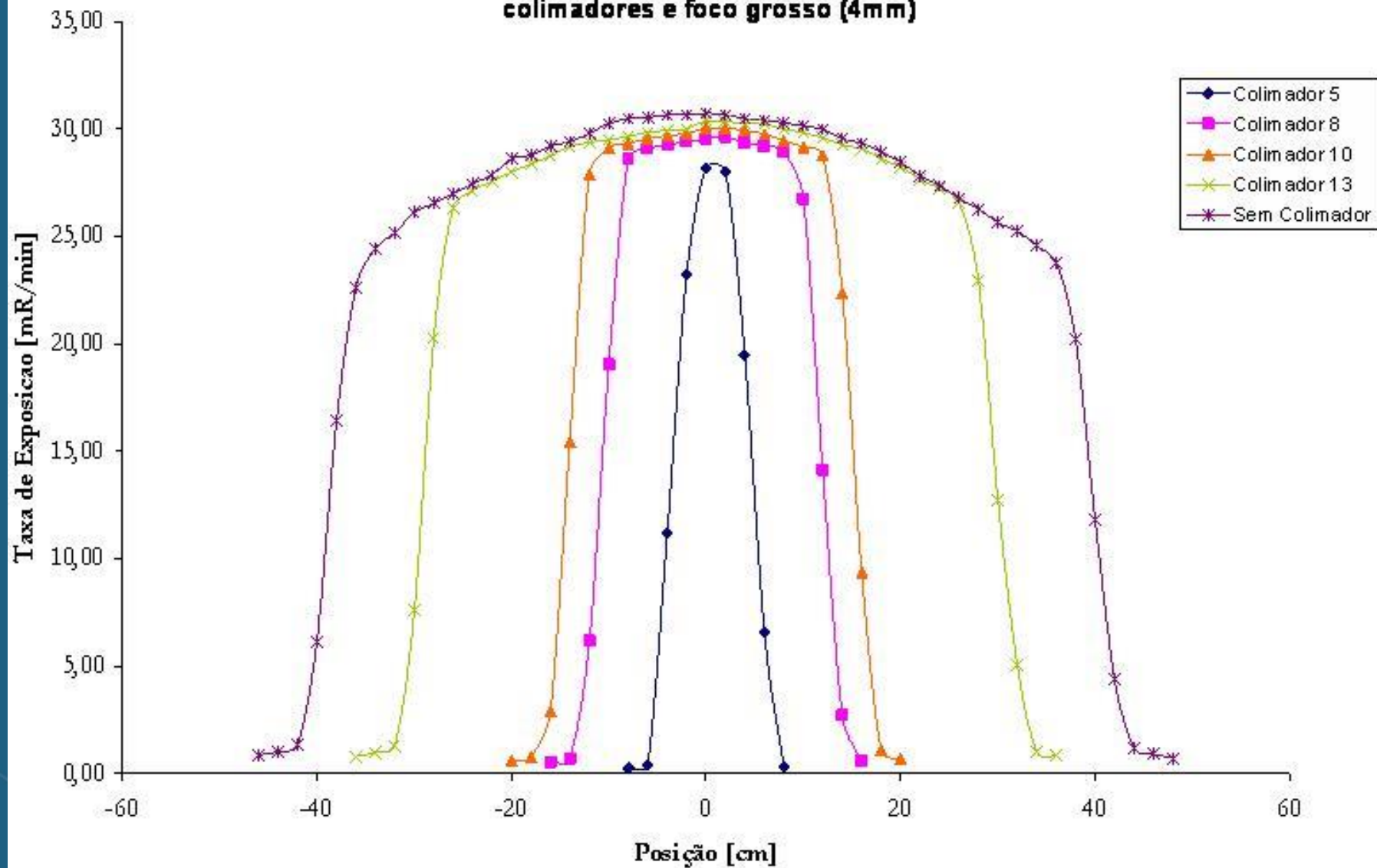


OUTSIDE  
END

Varição paralela ao eixo anodo-catodo do tubo de raios X com diferentes colimadores e foco grosso (4mm)



**Variação Perpendicular ao eixo anodo-catodo do tubo de raios X com diferentes colimadores e foco grosso (4mm)**



# Tubos de raios X

- Pode ser utilizado para compensar diferenças de atenuação de diferentes partes do corpo
- Exemplos:
  - Coluna torácica
  - Mamografia

E como é que a gente usa esse efeito na prática ?

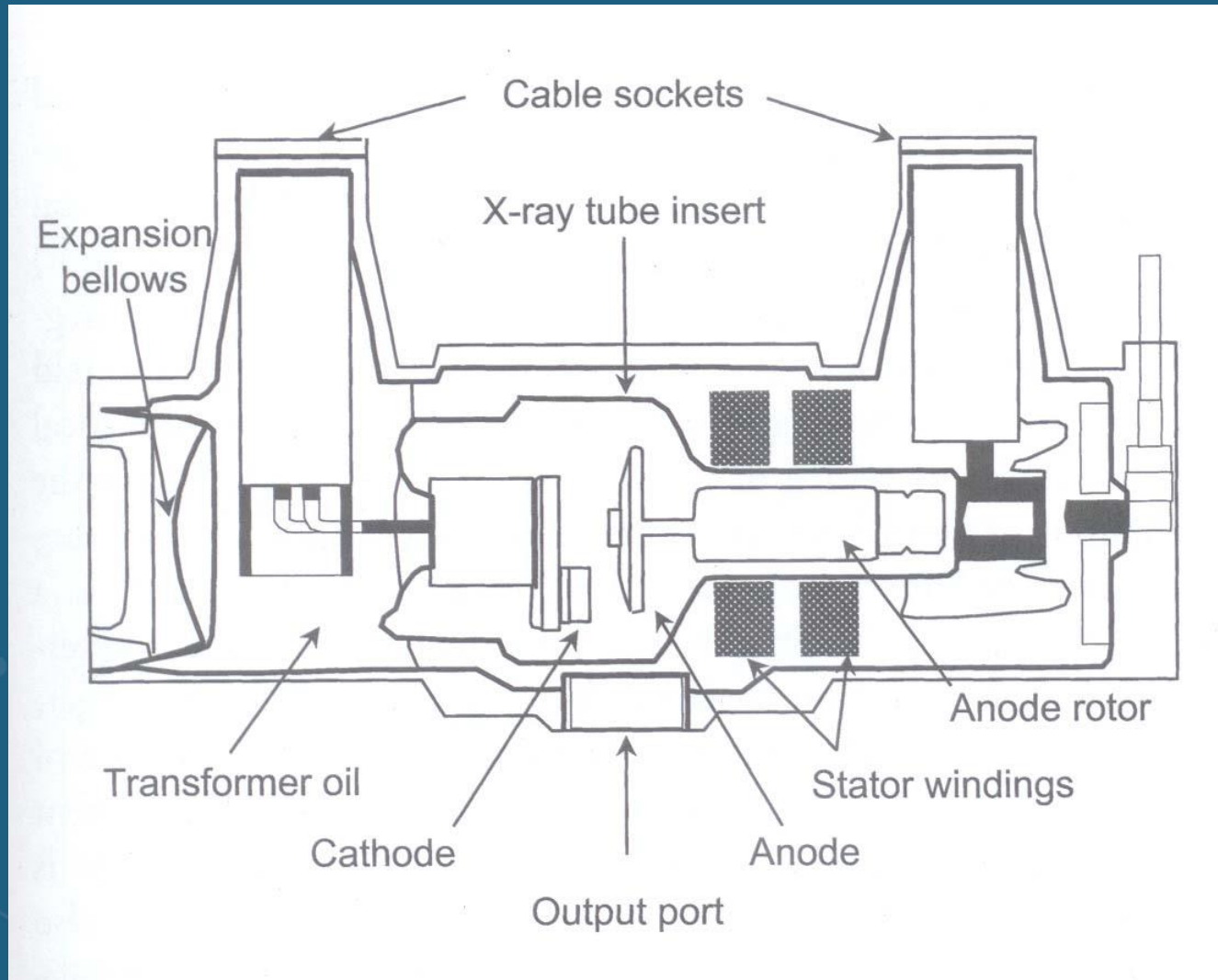




8009-1



# Outros componentes do conjunto emissor de radiação-X



# Fatores que afetam o espectro de raios X

- Qualidade
  - Penetrabilidade
- Quantidade
  - Número de fótons
- Exposição
  - Fluência de energia
    - Qualidade
    - Quantidade

## Fatores

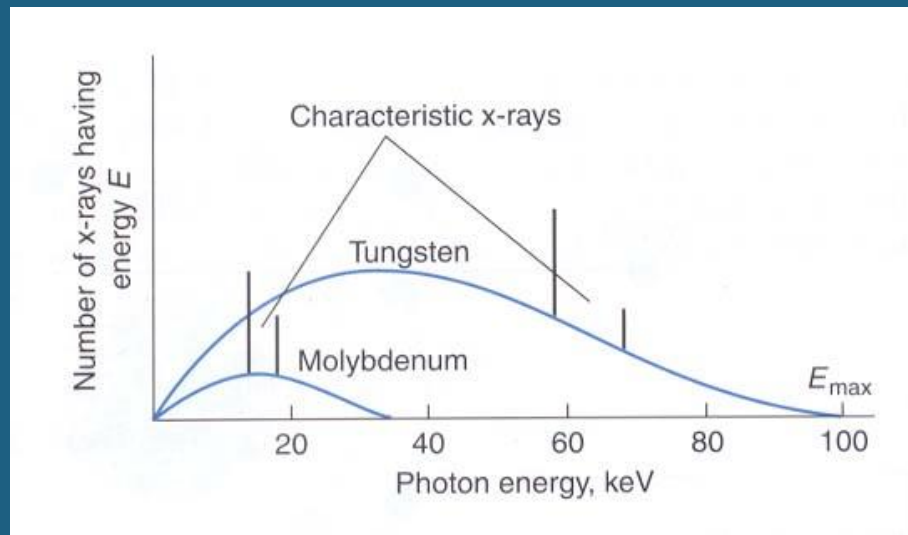
- Material do alvo
- Tensão
- Corrente
- Tempo de exposição
- Filtração
- Forma de onda

# Fatores que afetam o espectro de raios X

- Material do alvo (anodo)
  - Afeta a eficiência do *bremstrahlung*

$$\text{Exposição} \propto Z$$

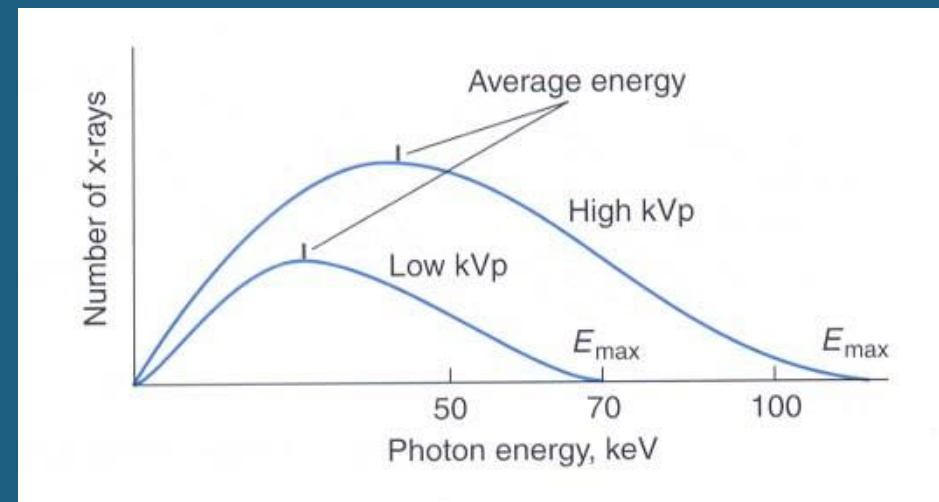
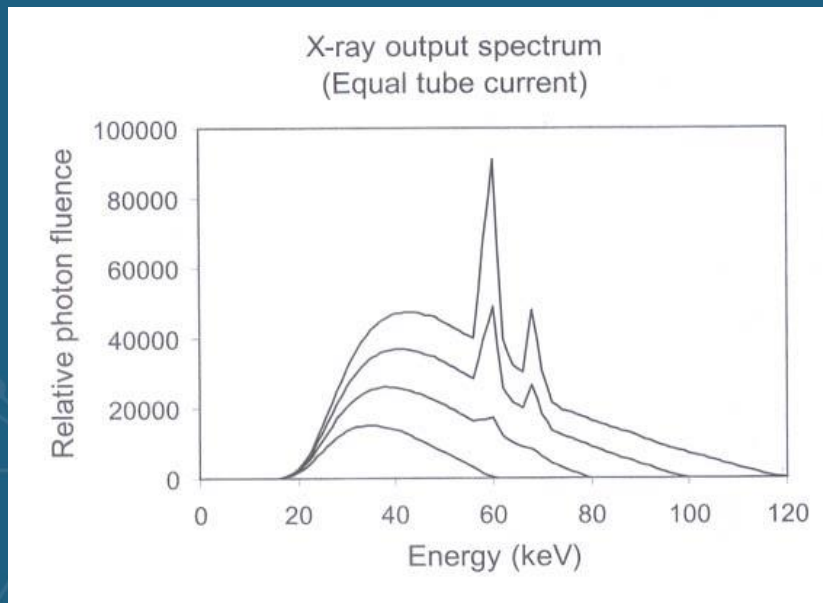
- Energias características dependem do material
- Afeta a qualidade e a quantidade do espectro



# Fatores que afetam o espectro de raios X

- Tensão (kVp)
  - Energia máxima do espectro de *bremsstrahlung*
  - Afeta a qualidade do espectro

$$\text{Exposição} \propto (\text{Tensão})^2$$



# Fatores que afetam o espectro de raios X

- Exemplo: exposição relativa de um feixe gerado com 80kVp com relação a outro gerado com 60 kVp com mesma corrente e tempo de exposição:

$$\left(\frac{80}{60}\right)^2 = 1,78$$

- Aumento na tensão aumenta a eficiência de produção da radiação e a qualidade e quantidade do feixe

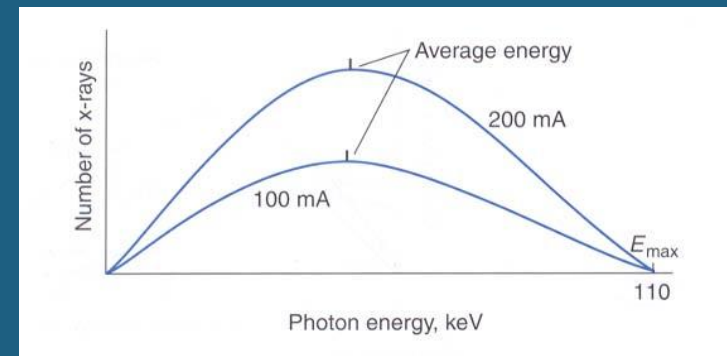
# Fatores que afetam o espectro de raios X

- Corrente anódica (mA)
  - Número de elétrons entre catodo e anodo por unidade de tempo

$\text{Exposição} \propto \text{corrente}$

- Tempo de exposição
  - Duração da produção de raios X

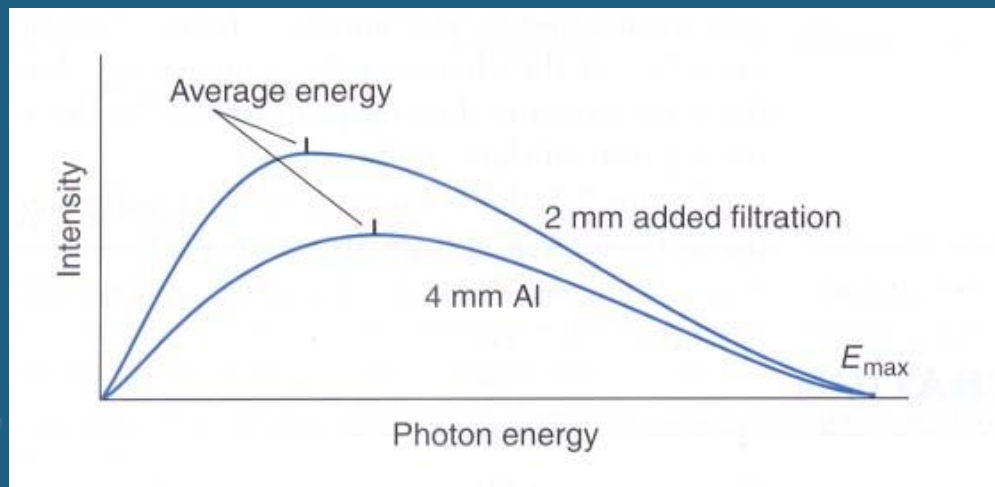
$\text{Exposição} \propto \text{tempo de exposição}$



$\text{Quantidade de fótons} \propto \text{produto corrente - tempo (mAs)}$

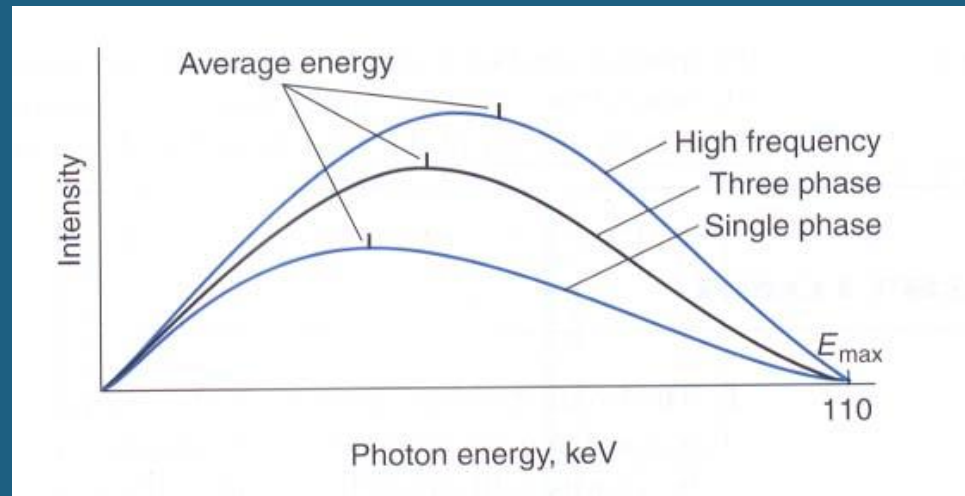
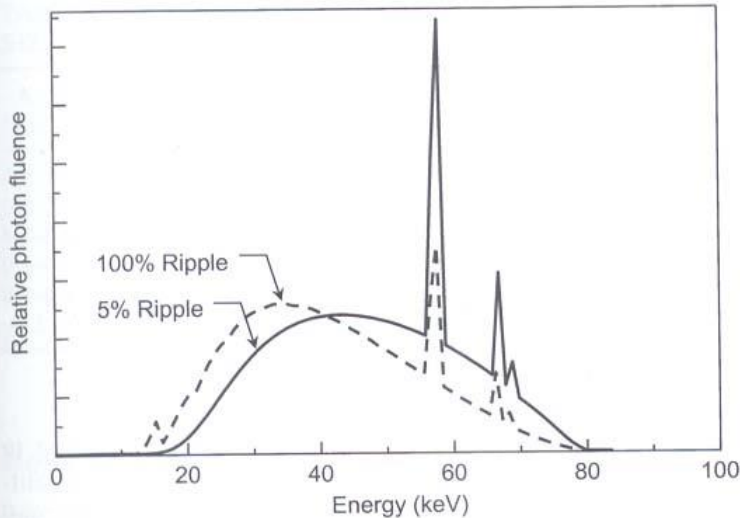
# Fatores que afetam o espectro de raios X

- Filtração
  - Afeta a qualidade e a quantidade do espectro
  - Reduz a quantidade de fótons e desloca a energia média do espectro para valores mais altos (qualidade)



# Fatores que afetam o espectro de raios X

- Forma de onda
  - Afeta a qualidade da radiação emitida
  - Modifica (levemente) a quantidade



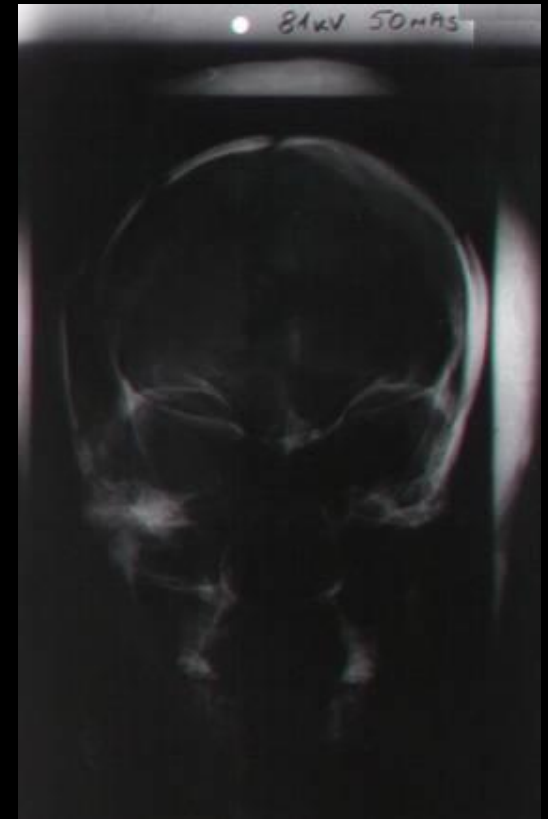
**60 kV - 50 mAs**



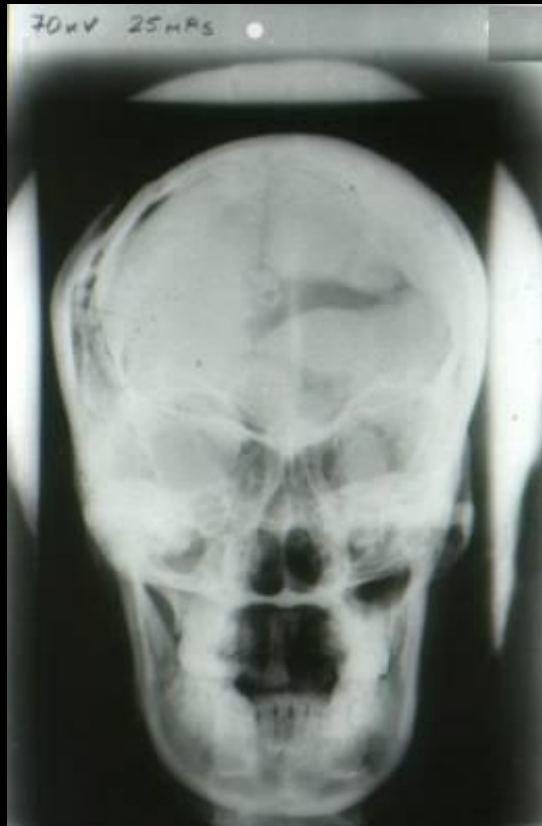
**70 kV - 50 mAs**



**80 kV - 50 mAs**



**70 kV - 25 mAs**



**70 kV - 50 mAs**



**70 kV - 80 mAs**



# Atenuação dos raios X

**Feixe  
monocromático**

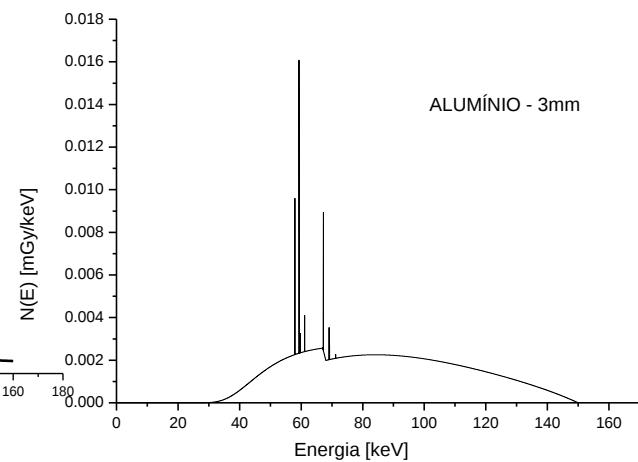
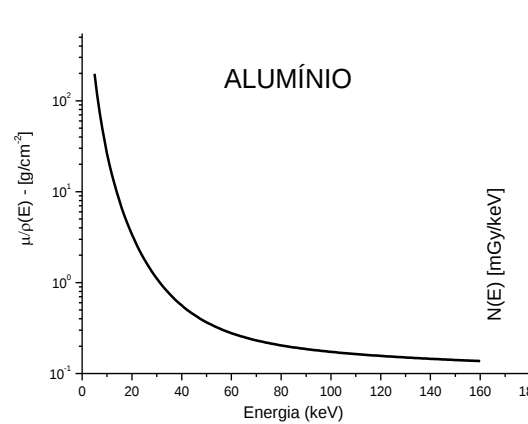
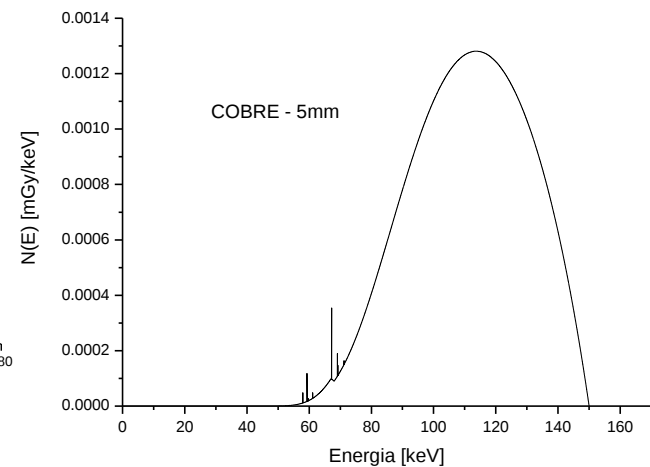
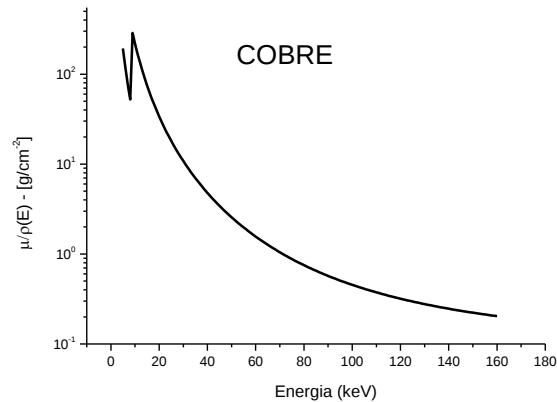
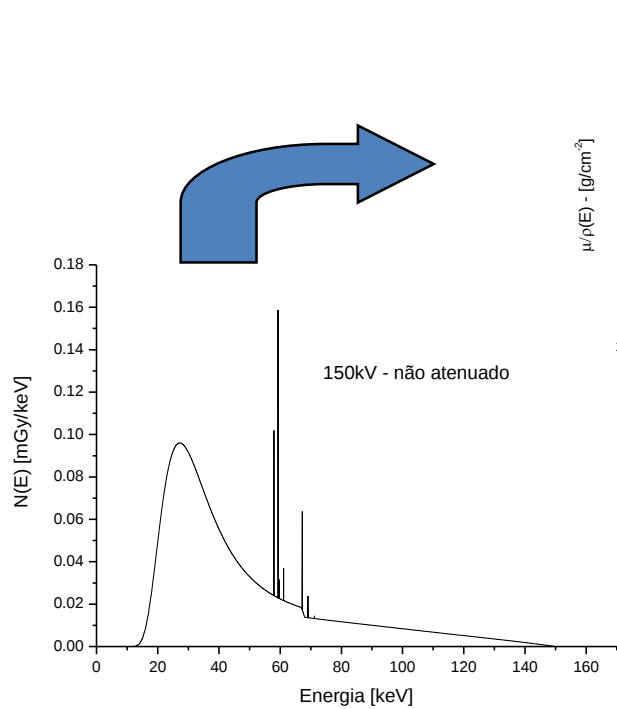
$$I(x) = I_0 e^{-\mu(E).x}$$

$$N(E, x) = N(E, 0) e^{-\mu(E).x}$$

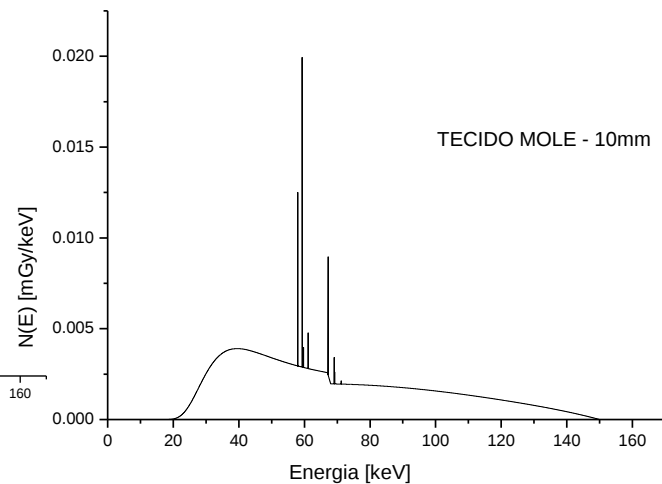
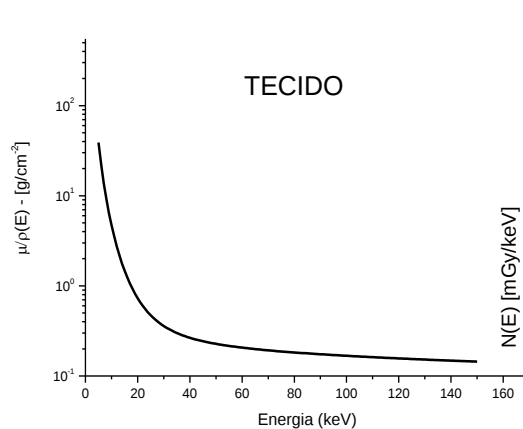
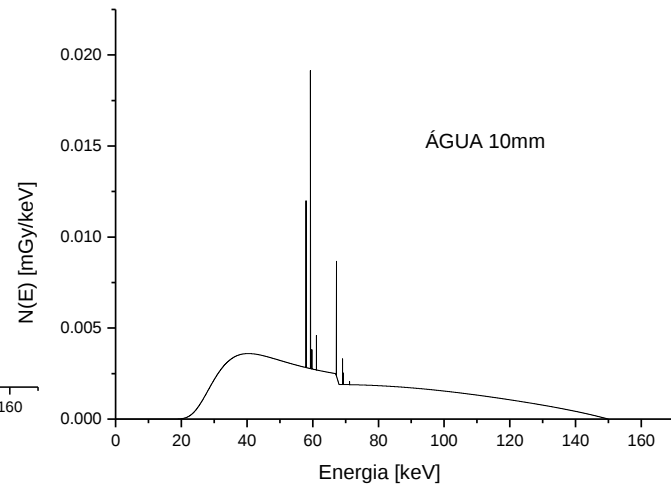
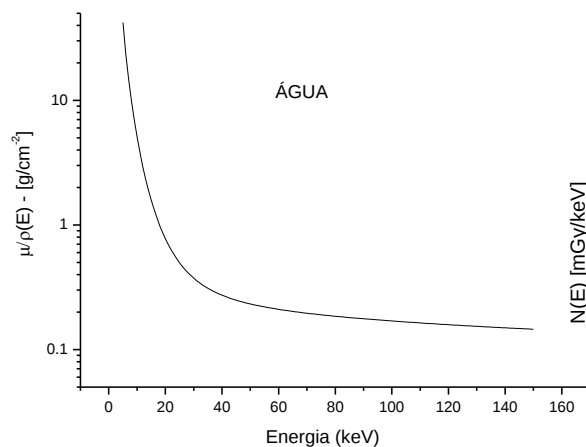
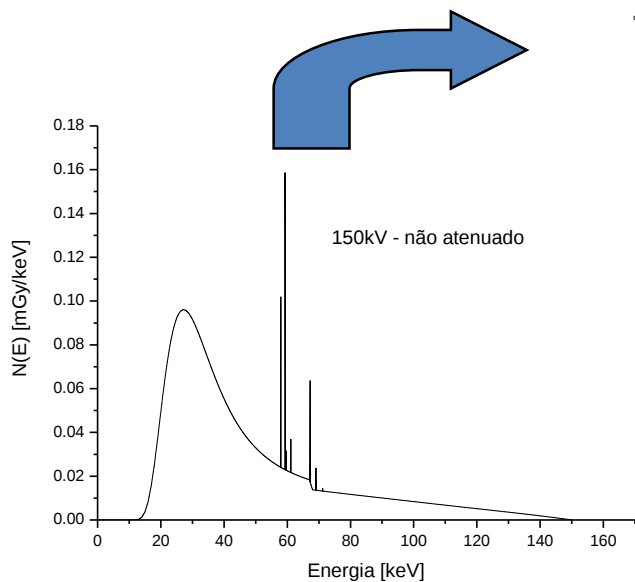
**Feixe  
policromático**

$$I(x) = \int_0^{E_{max}} N(E, 0) e^{-\mu(E).x} dE$$

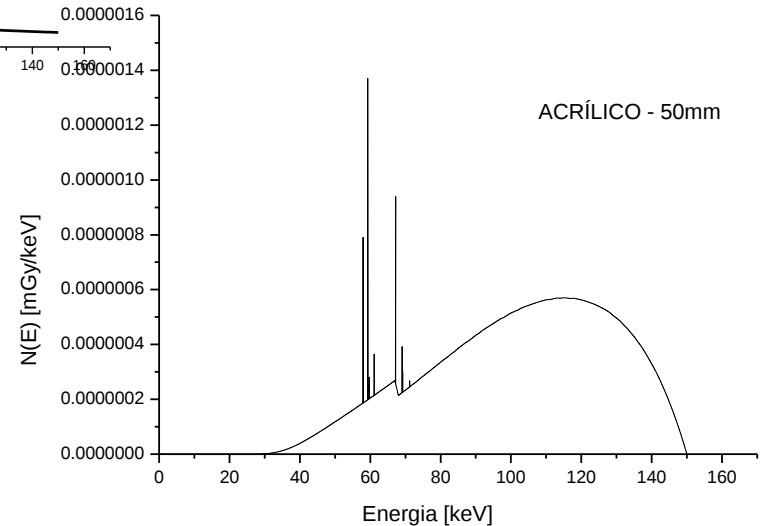
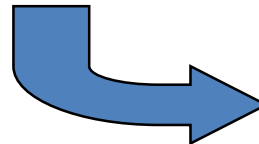
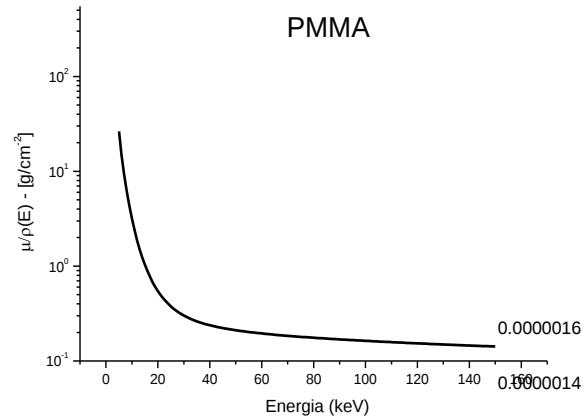
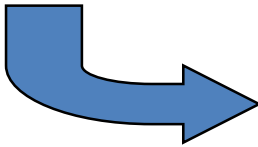
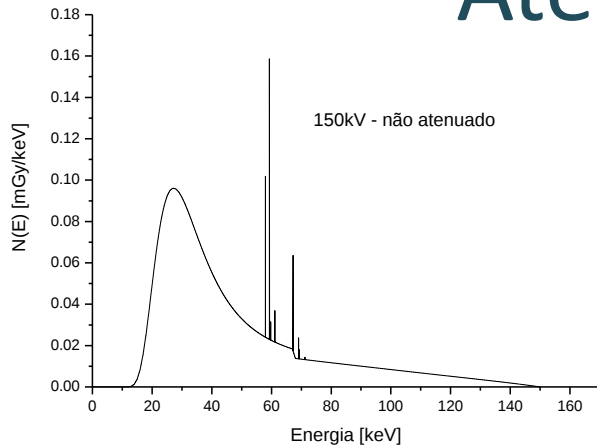
# Atenuação do espectro



# Atenuação do espectro



# Atenuação do espectro



# SpekCalc

Med Phys. 2007 Jun;34(6):2164-74.

Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part I. electron penetration characteristics in x-ray targets.

Poludniowski GG1, Evans PM.

Med Phys. 2007 Jun;34(6):2175-86.

Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in x-ray targets.

Poludniowski GG1.

# Camada semirredutora

$$I(X_{1/2}) = \frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu(E) \cdot X_{1/2}}$$

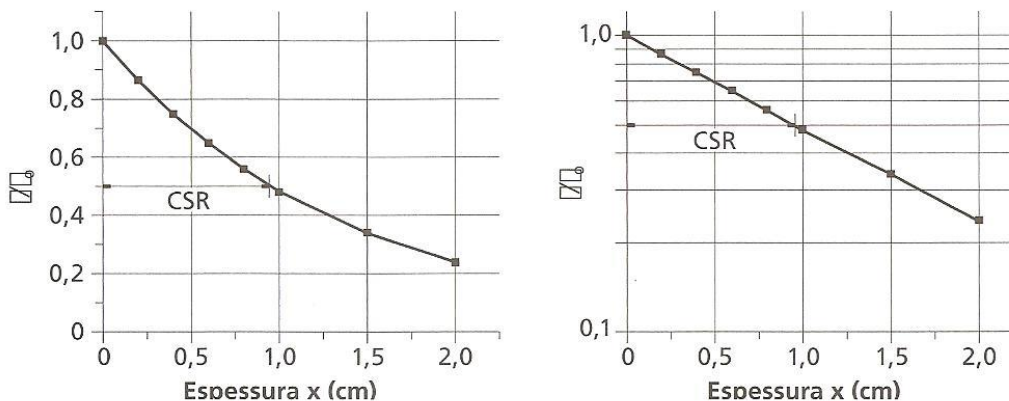
monoenergético

$$X_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu(E)} = \frac{0,692}{\mu(E)}$$

polienergético

$$X_{1/2} = \frac{0,692}{\mu(E_{ef})}$$

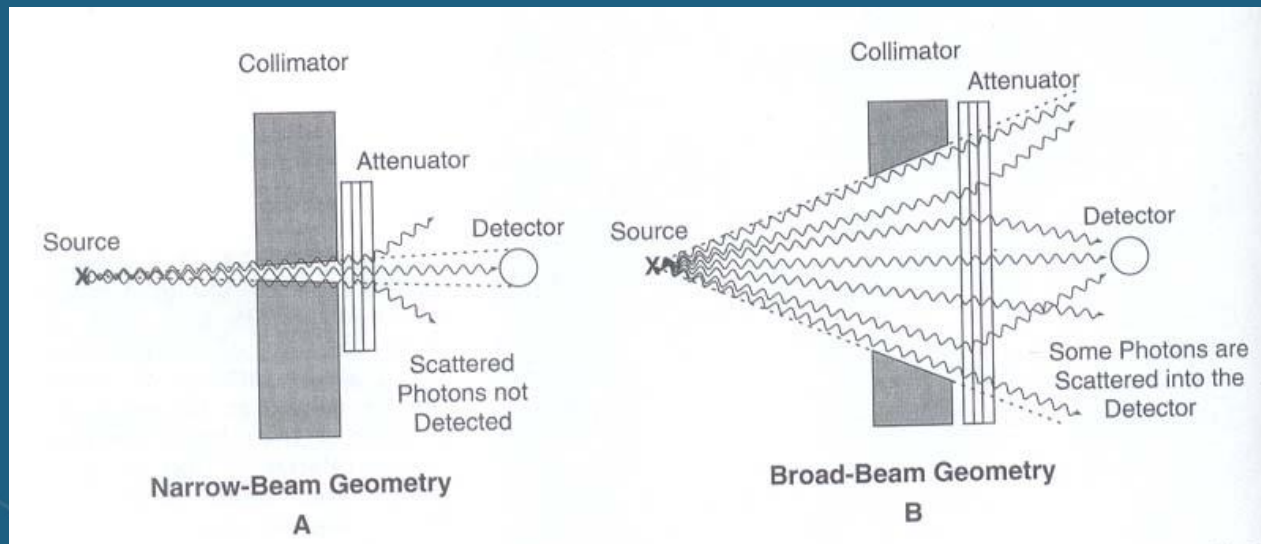
Energia efetiva



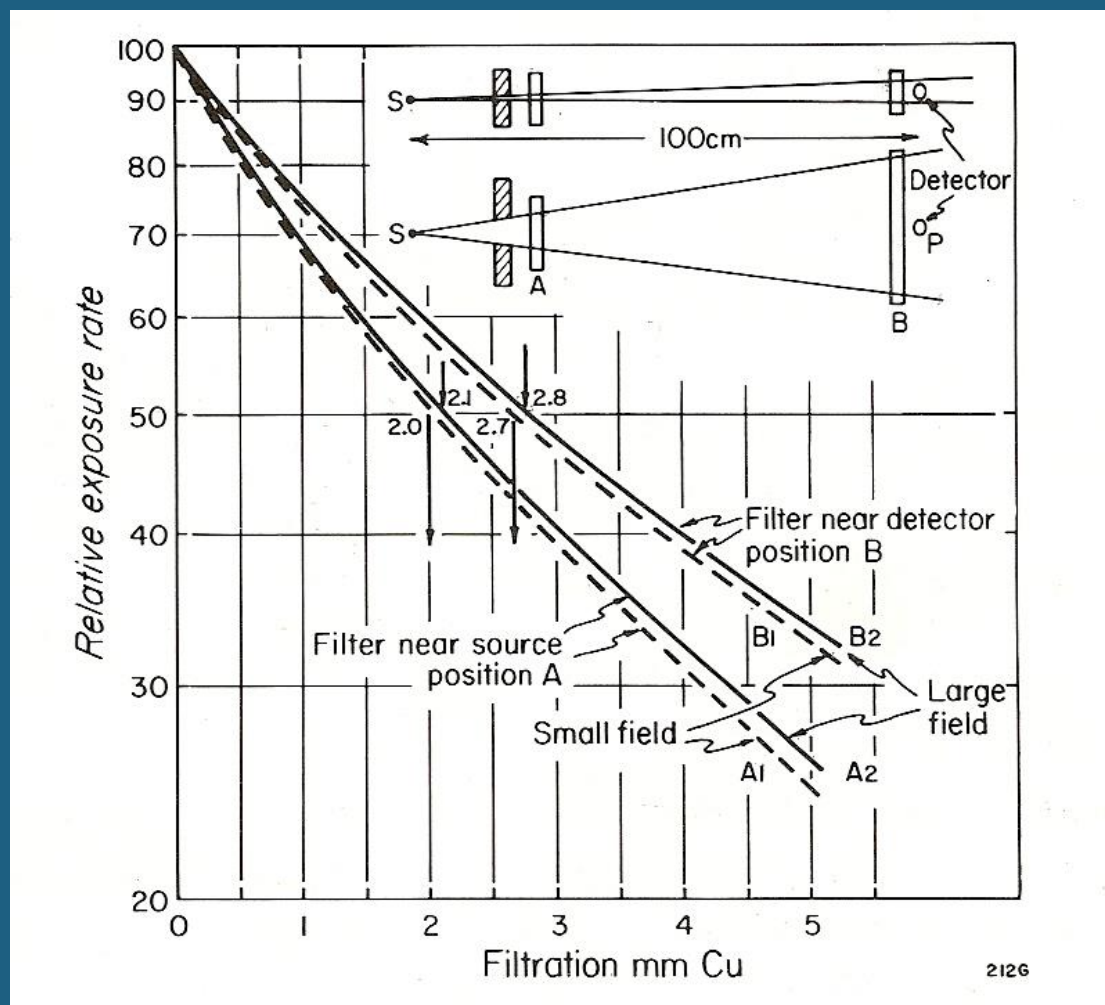
**Fig. 2.8** Decaimento relativo da intensidade de um feixe de raios gama de 1,25 MeV em função da espessura da placa de chumbo. O gráfico da esquerda está com escalas lineares e o da direita é semilogarítmico. A camada semirredutora está indicada

# Camada semirredutora

- Espessura de material necessária para reduzir a intensidade do feixe à metade
  - Medida indireta da qualidade do feixe
  - Medidas realizadas em feixe estreito



# Camada semi-redutora



2126

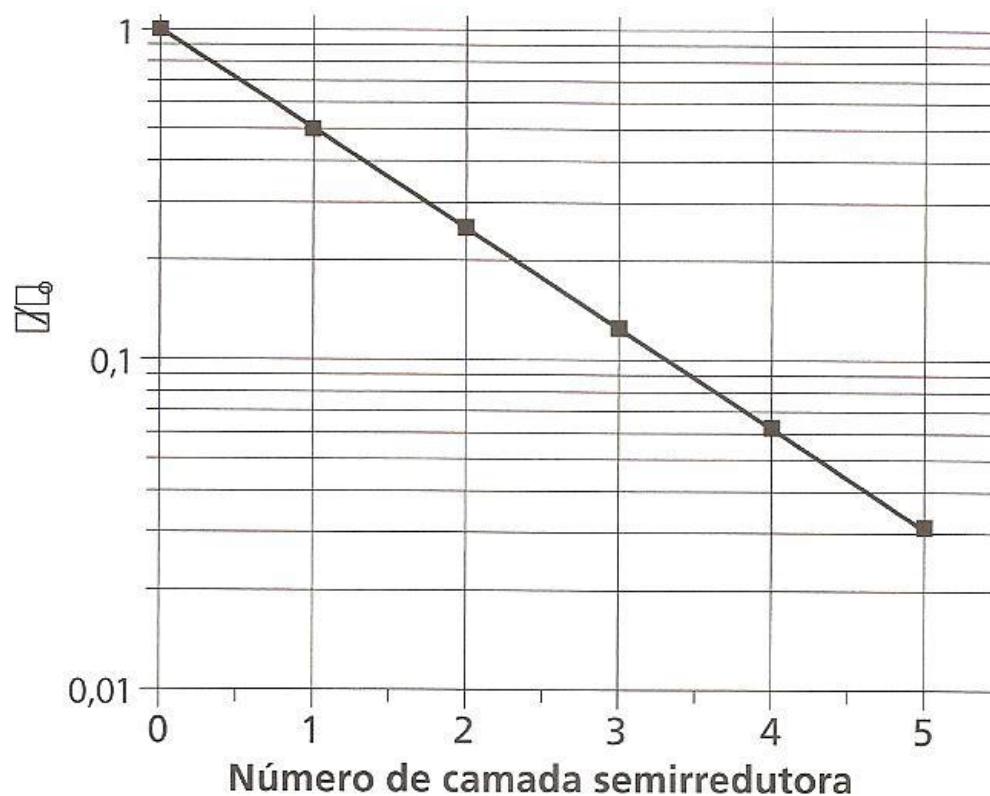
# Camada semi-redutora

- Para fótons monoenergéticos sob condições de feixe estreito
  - Probabilidade de atenuação é a mesma para cada HVL adicionado

$$\text{redução} = \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

$n$  = número de HVL's adicionados

- Exemplo: transmissão através de 5 HVL's de material
  - $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = (\frac{1}{2})^5 = 0,031$  ou 3,1%
  - Ou seja, 97% dos fótons são atenuados



**Fig. 2.9** Decaimento relativo da intensidade de um feixe de fótons monoenergéticos que atravessam um número crescente de camadas semirredutoras de qualquer material

# Camada semi-redutora

- Energia efetiva
  - Em radiologia – feixes polienergéticos
  - HVL – maneira de determinar a qualidade do feixe
  - $E_{ef}$  de um feixe polienergético é a energia que teria um feixe monoenergético com mesmo HVL

$$HVL = \frac{0,693}{\mu(E_{ef})}$$

| HVL (mm Al) | Effective Energy (keV) |
|-------------|------------------------|
| 0.26        | 14                     |
| 0.39        | 16                     |
| 0.55        | 18                     |
| 0.75        | 20                     |
| 0.98        | 22                     |
| 1.25        | 24                     |
| 1.54        | 26                     |
| 1.90        | 28                     |
| 2.27        | 30                     |
| 3.34        | 35                     |
| 4.52        | 40                     |
| 5.76        | 45                     |
| 6.97        | 50                     |
| 9.24        | 60                     |
| 11.15       | 70                     |
| 12.73       | 80                     |
| 14.01       | 90                     |
| 15.06       | 100                    |

Al, aluminum.

**Tab. 2.2** COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR E CSR DE CHUMBO E ALUMÍNIO PARA FÓTONS EMITIDOS PELO  $^{60}\text{Co}$  E  $^{137}\text{Cs}$

| Radioisótopo      | Energia do fóton (MeV) | Material | $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | $X_{1/2}$ (cm) |
|-------------------|------------------------|----------|----------------------------|----------------|
| $^{60}\text{Co}$  | 1,25                   | Pb       | 0,66                       | 1,05           |
| $^{60}\text{Co}$  | 1,25                   | Al       | 0,15                       | 4,62           |
| $^{137}\text{Cs}$ | 0,66                   | Pb       | 1,23                       | 0,59           |
| $^{137}\text{Cs}$ | 0,66                   | Al       | 0,20                       | 3,46           |

**Tab. 2.3** COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR  $\mu$  EM  $\text{CM}^{-1}$  EM FUNÇÃO DA ENERGIA DO FÓTON, PARA ALGUNS MATERIAIS

| Energia   | Meio  |                       |          |          |        |
|-----------|-------|-----------------------|----------|----------|--------|
|           | Água  | Ar                    | Concreto | Alumínio | Chumbo |
| 100 keV   | 0,170 | $1,86 \times 10^{-4}$ | 0,412    | 0,459    | 62,98  |
| 500 keV   | 0,097 | $1,05 \times 10^{-4}$ | 0,211    | 0,228    | 1,83   |
| 1.000 keV | 0,071 | $7,65 \times 10^{-5}$ | 0,154    | 0,166    | 0,81   |
| 1.500 keV | 0,057 | $6,23 \times 10^{-5}$ | 0,125    | 0,135    | 0,59   |

Fonte: National Institute of Standards and Technology

<<http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>>. Acesso em: jan. 2010.

**Tab. 2.4** DENSIDADE (EM  $\text{G}/\text{CM}^3$ ), COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR (EM  $\text{CM}^{-1}$ ) E COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO MÁSSICO (EM  $\text{CM}^2/\text{G}$ ) DA ÁGUA (ESTADO LÍQUIDO), DO GELO (ESTADO SÓLIDO) E DO VAPOR D'ÁGUA (ESTADO GASOSO) PARA FÓTONS COM ENERGIA DE 50 KEV

| Estado físico | Características                   |                            |                                       |
|---------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
|               | $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | $\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | $\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) |
| Água          | 1,000                             | 0,214                      | 0,226                                 |
| Gelo          | 0,917                             | 0,196                      | 0,226                                 |
| Vapor d'água  | $5,98 \times 10^{-4}$             | $1,28 \times 10^{-4}$      | 0,226                                 |

# Camada semi-redutora

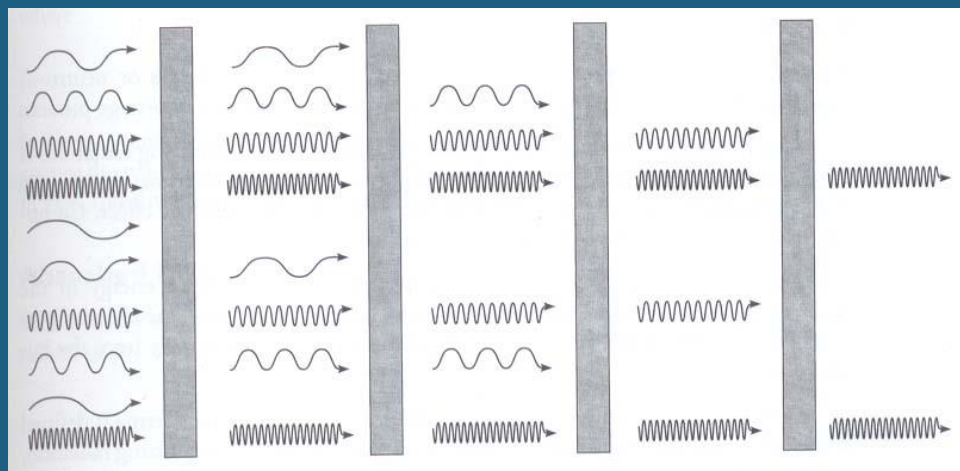
- Endurecimento do feixe
  - Fótons de baixa energia em um feixe polienergético têm maior probabilidade de interação que fótons de alta energia
  - Coeficiente de homogeneidade

$$CH = \frac{1o.HVL}{2oHVL}$$

Energia efetiva e HVL aumentam



Intensidade do feixe diminui



# Sumário

- Tubos de raios X
- Fatores que afetam o espectro de raios X
- Atenuação dos raios X
- Camada semirredutora

