

USP – Universidade de São Paulo

Física Experimental C - Laboratório

Difração de Raio X

João Kogler

PSI / EP USP

Versão 2023

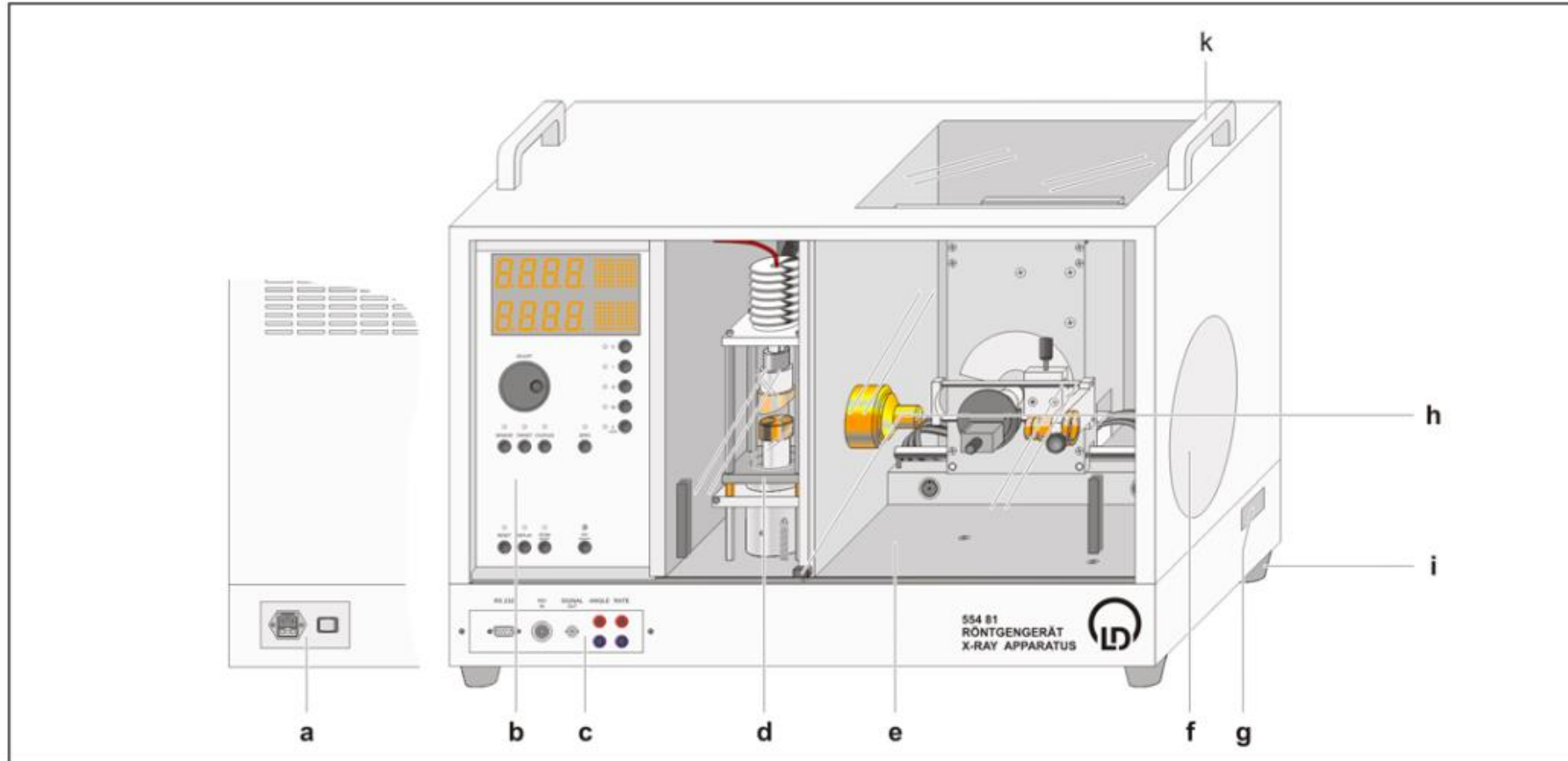
semestral



Etapas

- **Sessão no laboratório (presencial)**
 - Adquirir dados de difração
 - Parte 1
 - experimento de Bragg a 35 kV, 30 kV e 25 kV
 - Parte 2
 - Determinação da constante de Planck
 - Calcular e analisar resultados
 - Elaborar o relatório e entregar (até 2a feira)
 - Formato pdf, através de email para: kogler@usp.br
 - Não há aula EAD desta experiência no sábado.

Difratômetro de Raio X – no Laboratório (presencial)



a Campo de conexão à rede

b Campo de comando

c Campo de conexão

d Câmara do tubo
(com tubo de raios X)

e Câmara de experiências
(aqui com goniômetro)

f Tela fluorescente

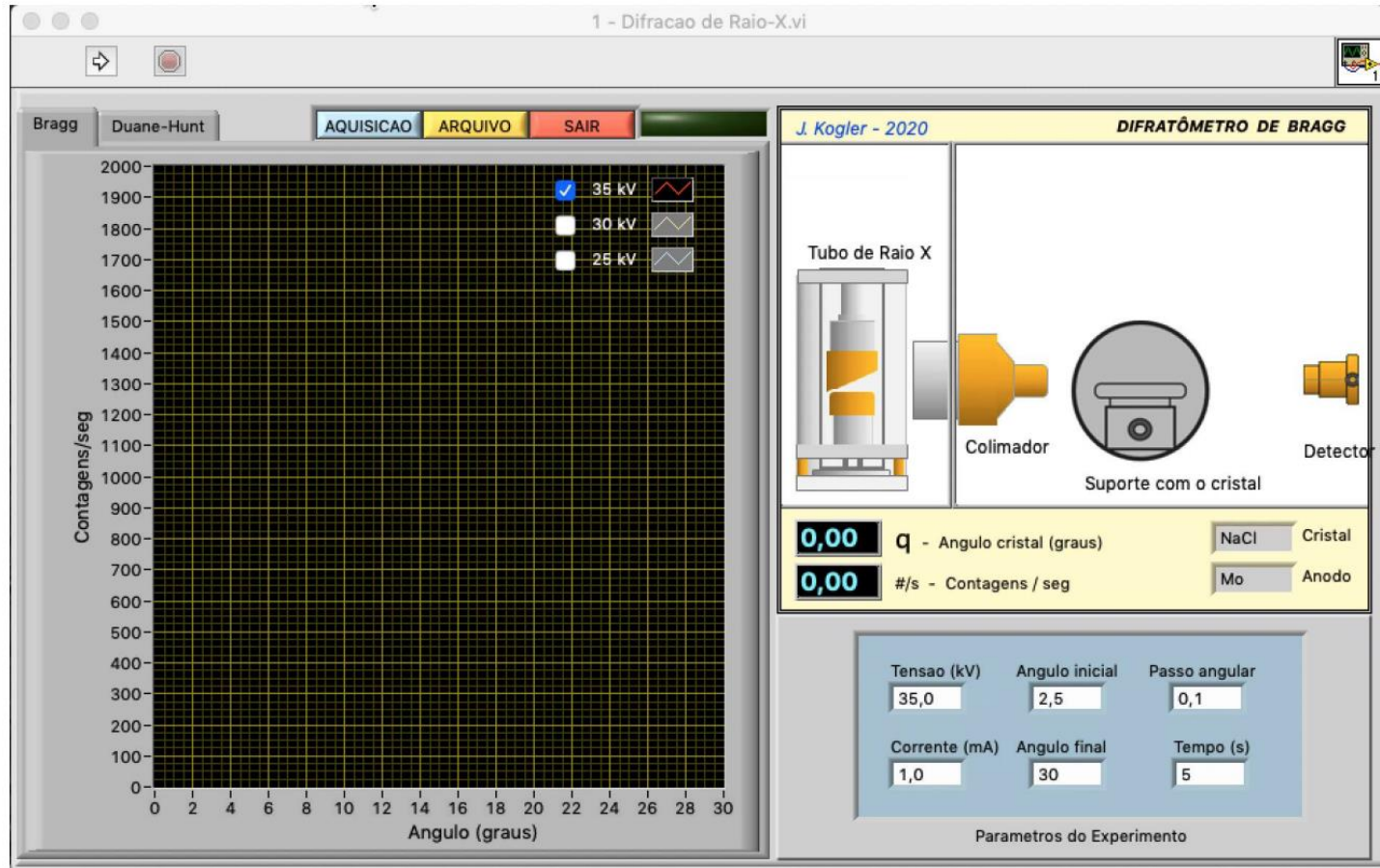
g Canal livre

h Tecla de bloqueio

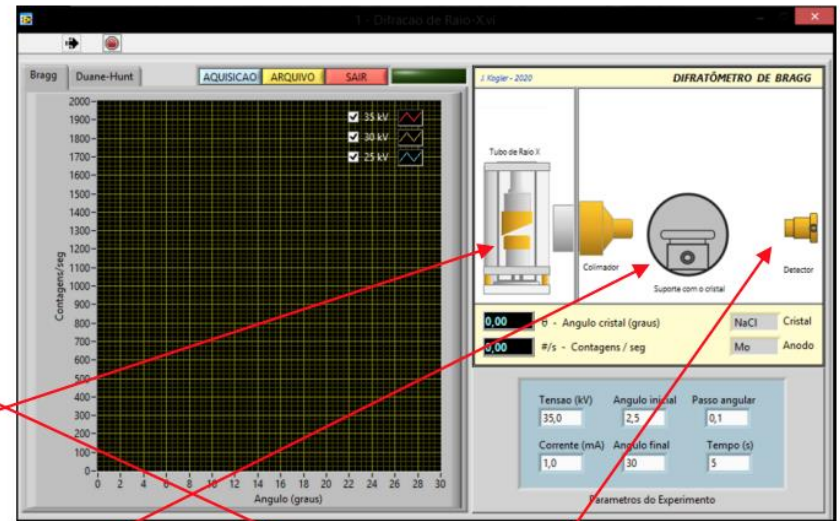
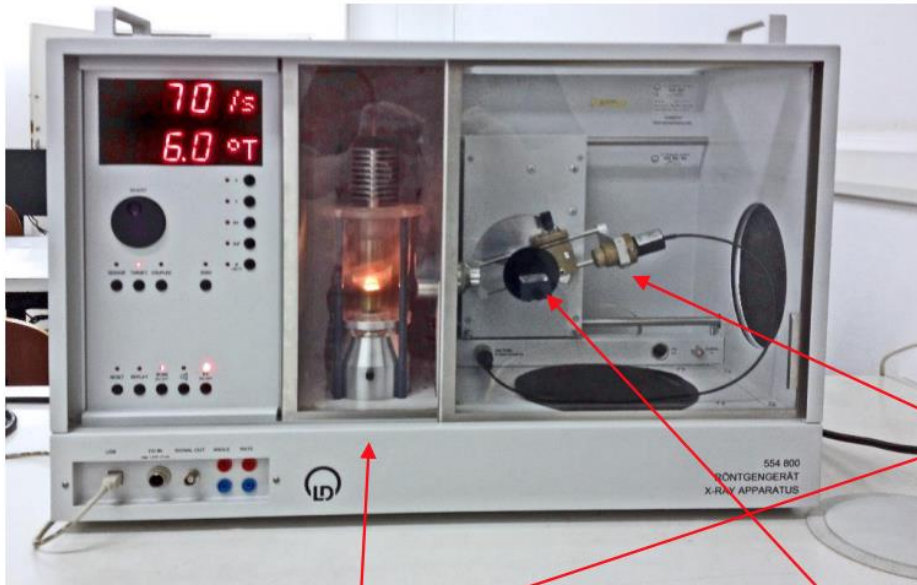
i Pés

k Alças de transporte

Difratômetro de Raio X – Simulador em software (EAD)



Comparação do equipamento físico com o simulador em software



Tubo de raio-x

Cristal e suporte

Goniômetro e detector

Física Experimental C Semestral (4323301)

Física_C Semestral

Início

Regras Gerais

Professores

Cronograma

Bibliografia

Turmas e Grupos

Experimentos ▶▶▶

Franck-Hertz

Difração de Raios X

Difração de Raios X_EAD

Atenuação de Raios Gama

- Presencial/EAD

Efeito Fotoelétrico -

Presencial/EAD

Material para Consulta

Critério de Avaliação

Notas

Relatórios

Dicas p/ Escever o Relatório

Experimentos

1 - Franck-Hertz

1A) [Presencial/EAD](#)

2) Difração de Raios X

2A) [EAD](#)

2B) [Presencial](#)

3) Atenuação de Raios Gama

3A) [EAD](#)

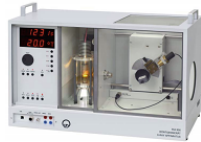
3B) [Presencial](#)

4) Efeito Fotoelétrico

4A) [Presencial/EAD](#)

- Início
- Regras Gerais
- Professores
- Cronograma
- Bibliografia
- Turmas e Grupos
- Experimentos >>>**
 - Franck-Hertz
 - Difração de Raios X >>>**
 - Difração de Raios X_EAD
 - Atenuação de Raios Gama - Presencial/EAD
 - Efeito Fotoelétrico - Presencial/EAD
- Material para Consulta
- Critério de Avaliação
- Notas
- Relatórios
- Dicas p/ Escrever o Relatório

Difração de raios x



Comprovação experimental da lei de Bragg, determinação da distância entre os planos atômicos em

Difração de Raios X - Presencial

Material Introdutório

- A) [Roteiro da Experiência](#)
- B) [Roteiro de Análise](#)
- C) [Modelo de Relatório](#)
- D) [Descrição do Experimento](#)
- E) [Apresentação do Experimento_A \(Difração Raio - X - 2023 - Apresentação\)](#)
- F) [Apresentação do Experimento_B \(Difração Raio - X - 2023 - Teoria\)](#)

Material de Apoio

- F) Material Extraído do Livro [Experiments in Modern Physics](#)

SEGUIR INSTRUÇÕES DESTA MATERIAL PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS E ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO NO LAB

Difração de Raios X - EAD

Preparação do Experimento

- A) Guia de Instalação
- B) Run Time Engine - Windows
- C) Run Time Engine - MacOS
- D) Programas - Windows
- E) Programas - MacOS

Material Introdutório

- * [Guia Geral](#)

Videos

- Video 1 - [Descrição do Experimento](#)
- Video 1 - [Descrição do Experimento \(PDF\)](#)
- Video 2.1 - [Teoria - Parte 1](#)
- Video 2.2 - [Teoria - Parte 2](#)
- Video 2.3 - [Teoria - Parte 3](#)
- Video 2 - [Teoria \(PDF\)](#)
- Video 3.1 - [Difração de Bragg](#)
- Video 3.2 - [Análise de Bragg](#)

os
s >>>

aios X
Raios

Raios

LD
trico -
LD

liação

er o

ex



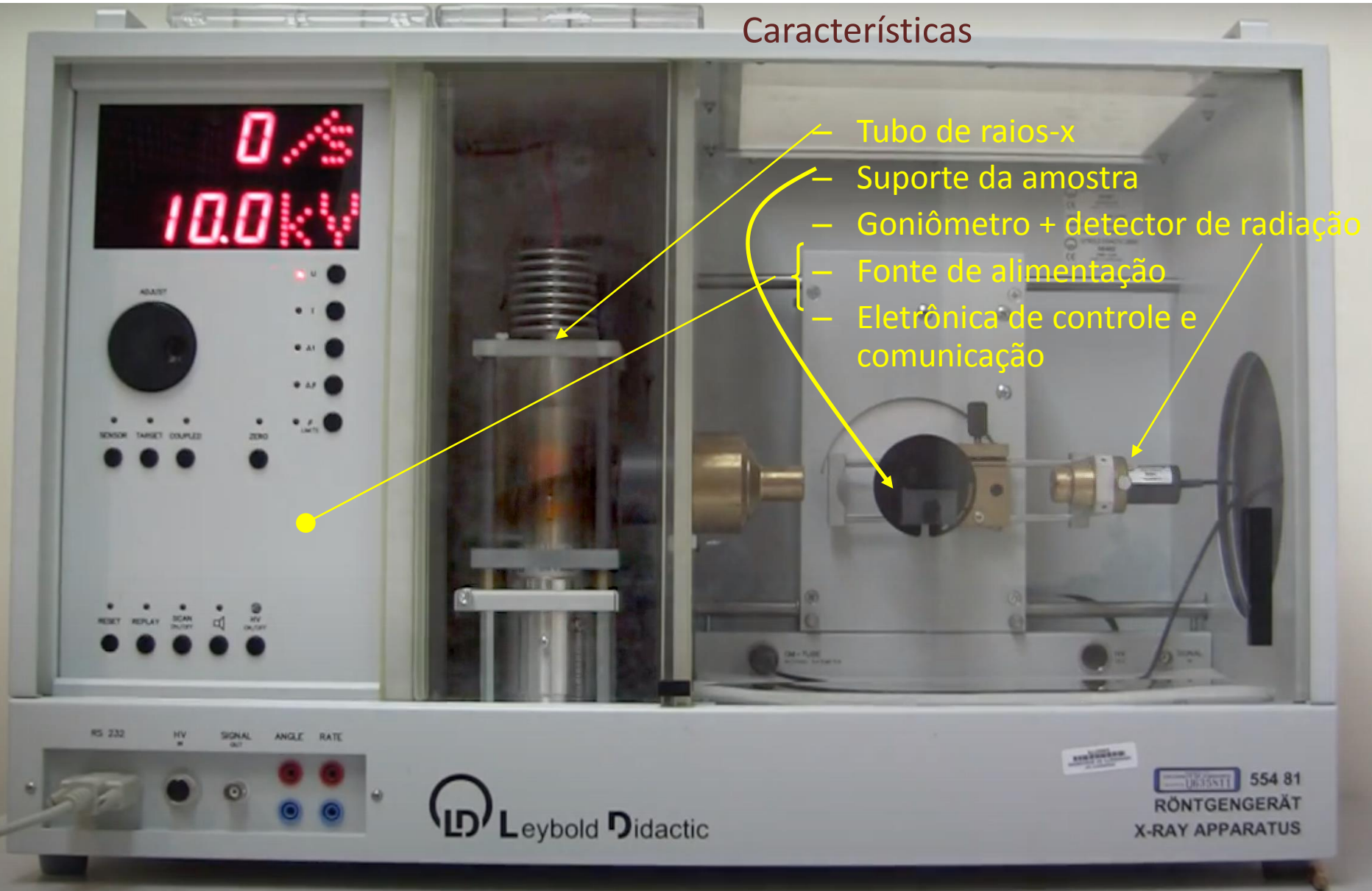
a lei

la

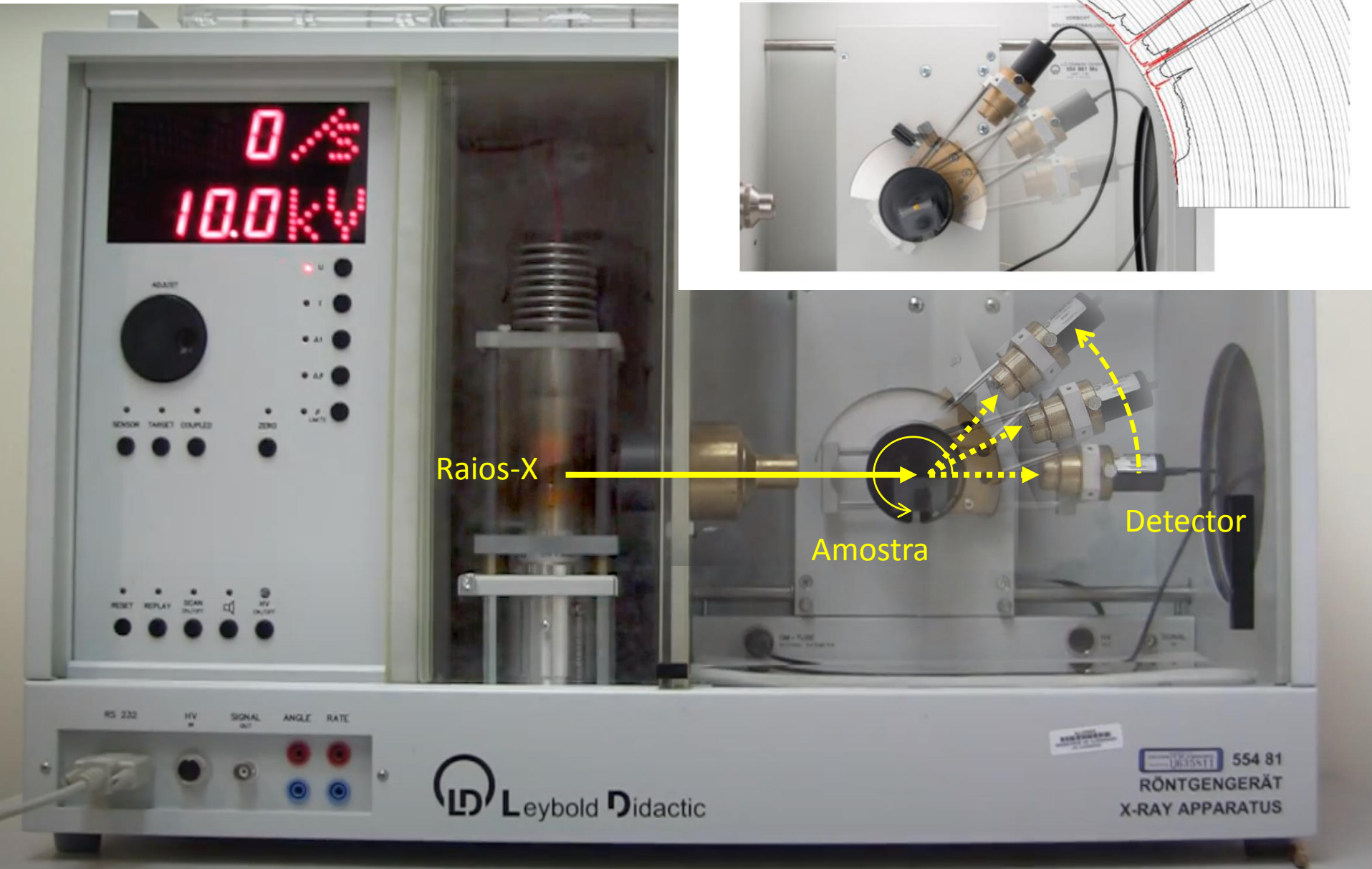
os
sem
oreto

O Difratorômetro de Raio-X

Características



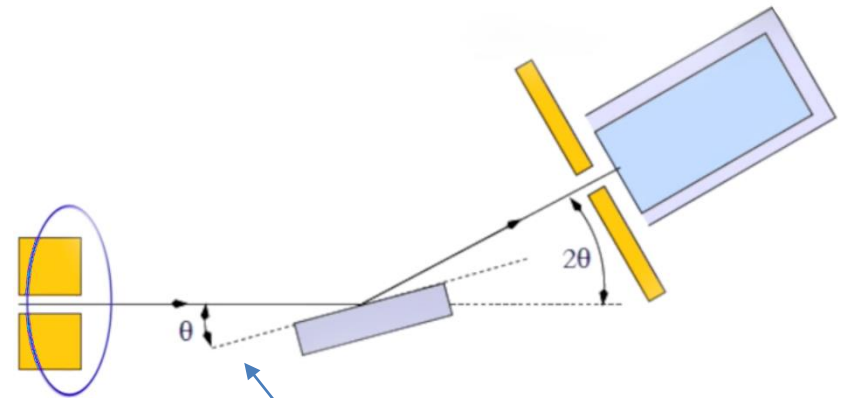
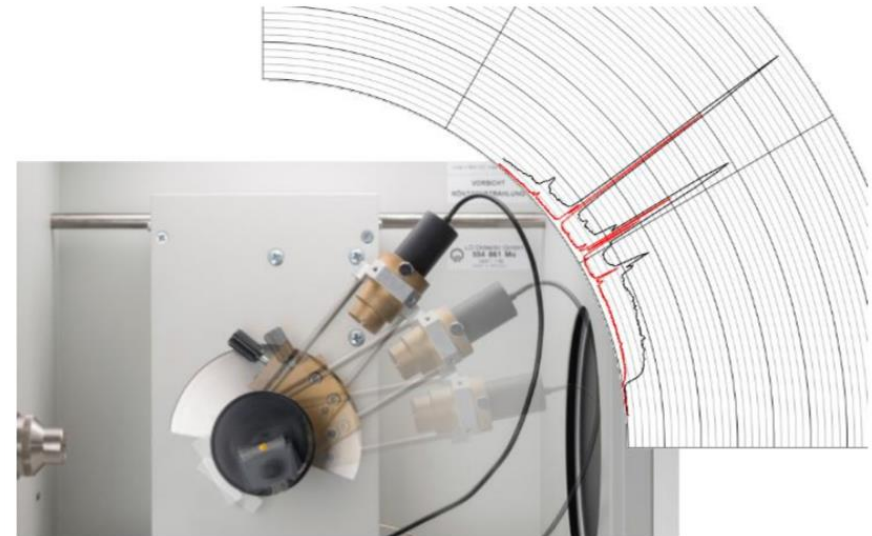
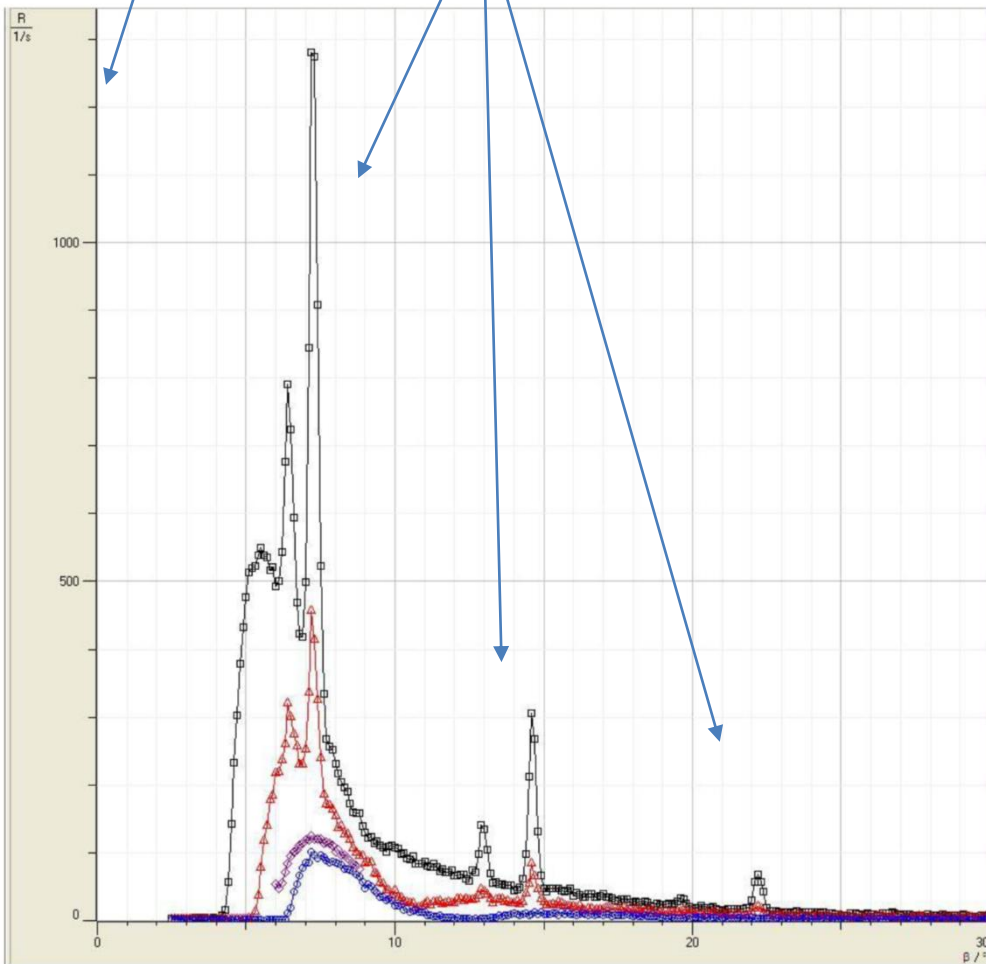
O Difratorômetro de Raio-X



O Difratorômetro de Raio-X

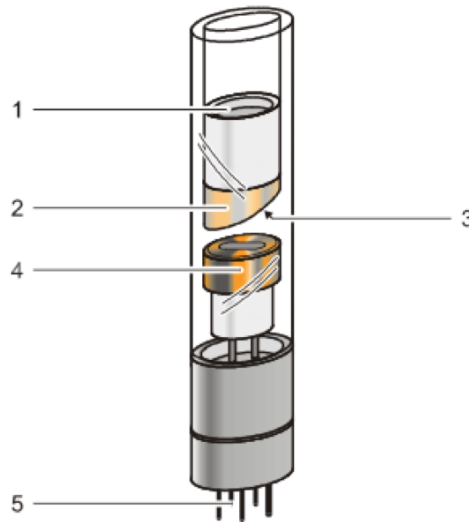
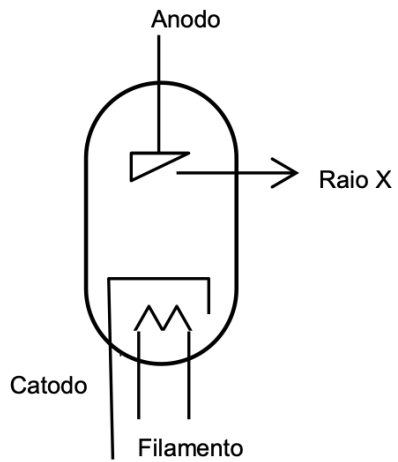
contagens / unidade de tempo

Picos de radiação característica



Ângulo de incidência

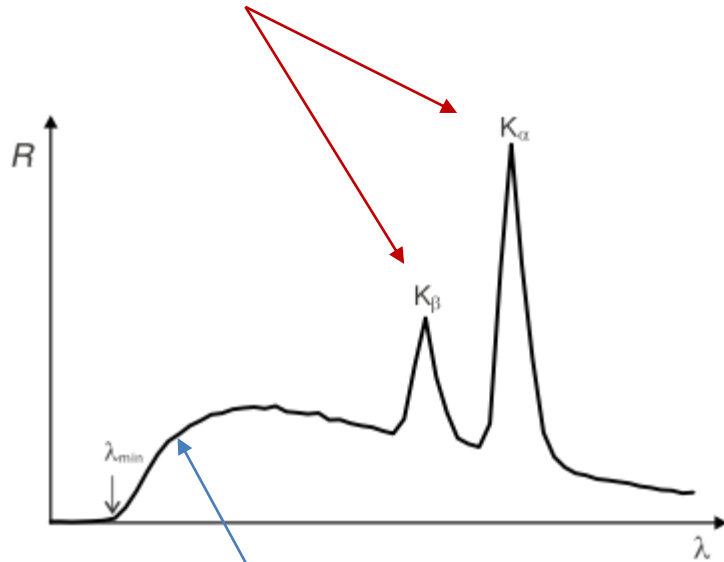
Tubo de raio X



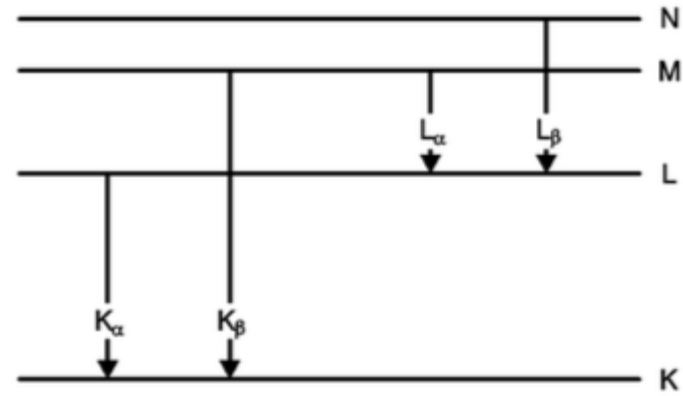
- 1 – Conexão com o dissipador de calor
- 2 – Bloco de cobre de suporte
- 3 – Anodo de Molibdênio
- 4 – Catodo aquecido
- 5 – Pinos de conexão ao soquete

Emissões de raio X

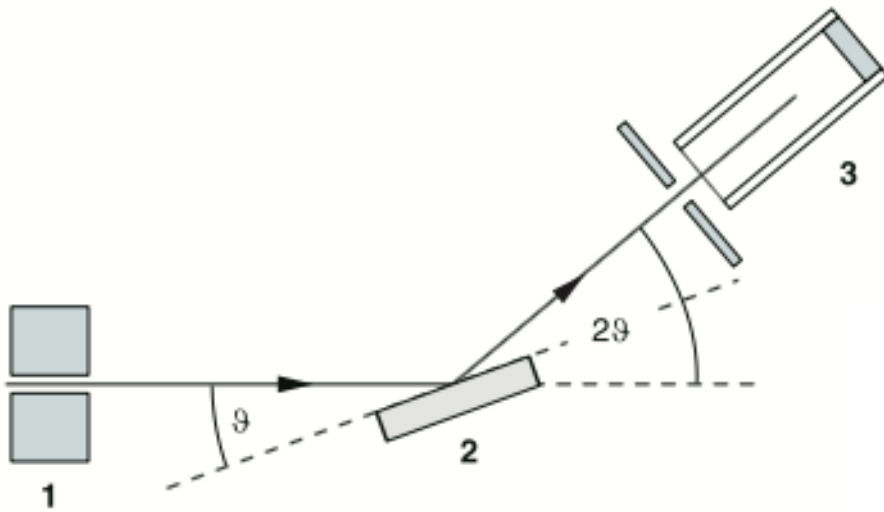
Emissões de pico ('fluorescências')
Radiação de decaimento



Emissão de fundo (background)
'Bremsstrahlung'
(radiação de freamento)



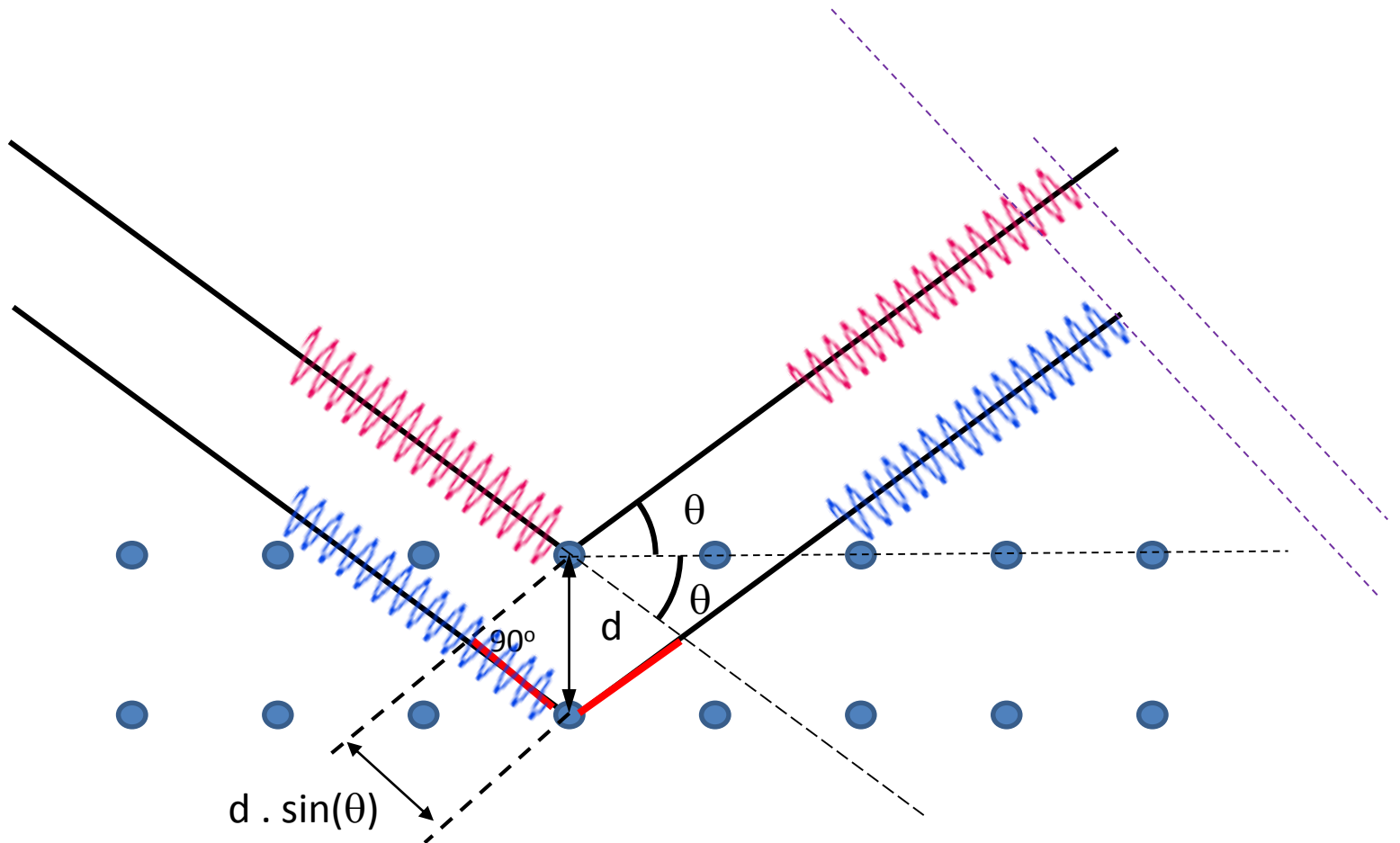
Emissões de pico ('fluorescências')
Radiação de decaimento



1. Fenda colimadora
2. Cristal
3. Detector de radiação ionizante

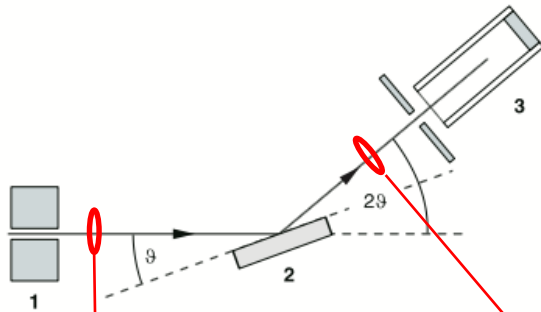


Goniômetro com Detector de Feixe

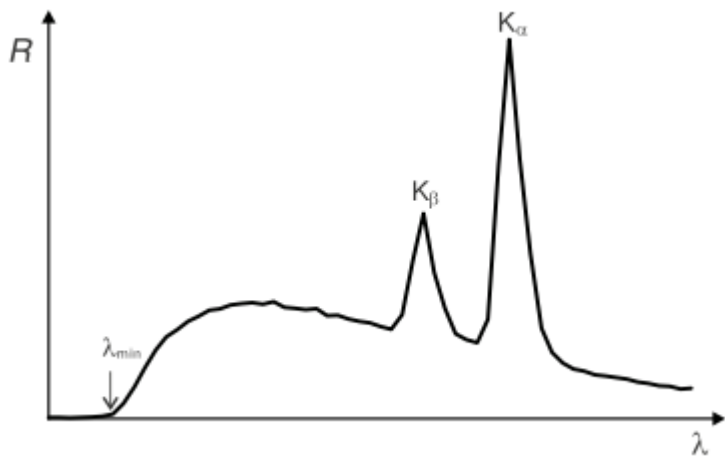


Lei de Bragg $n\lambda = 2 \cdot d \sin(\theta)$

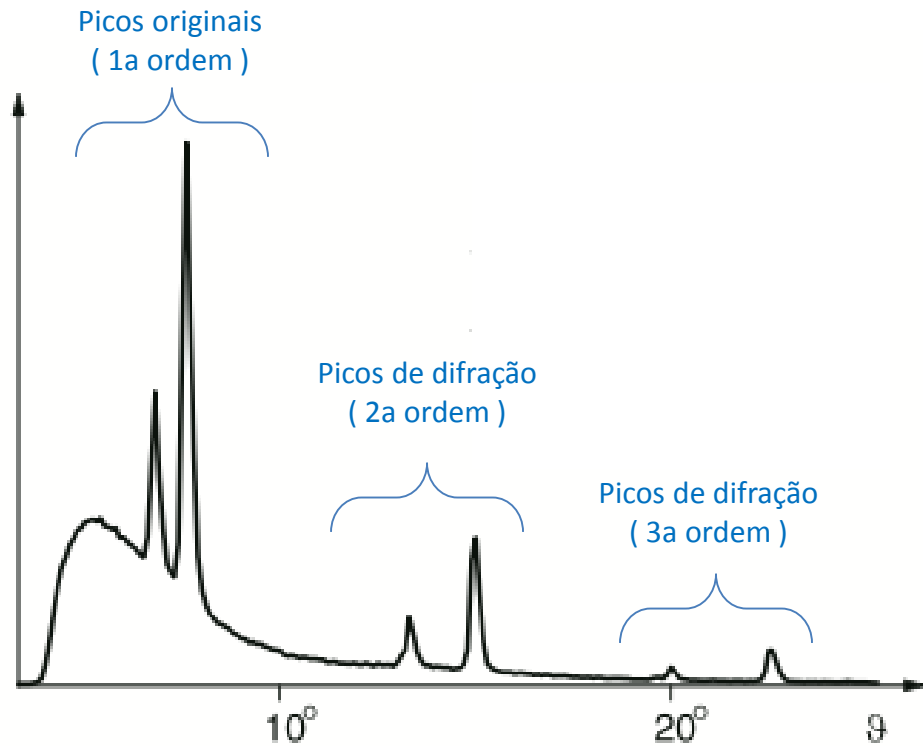
1. Fenda colimadora
2. Cristal
3. Detector de radiação ionizante



Sem a difração



Com a difração



Software *X ray apparatus*

- **Disponível só no lab**

- Procure no desktop do computador o ícone do software **X_ray_app** e clique nele e abra o programa



Aquisição dos dados

Primeiramente, abra o programa X ray apparatus no computador

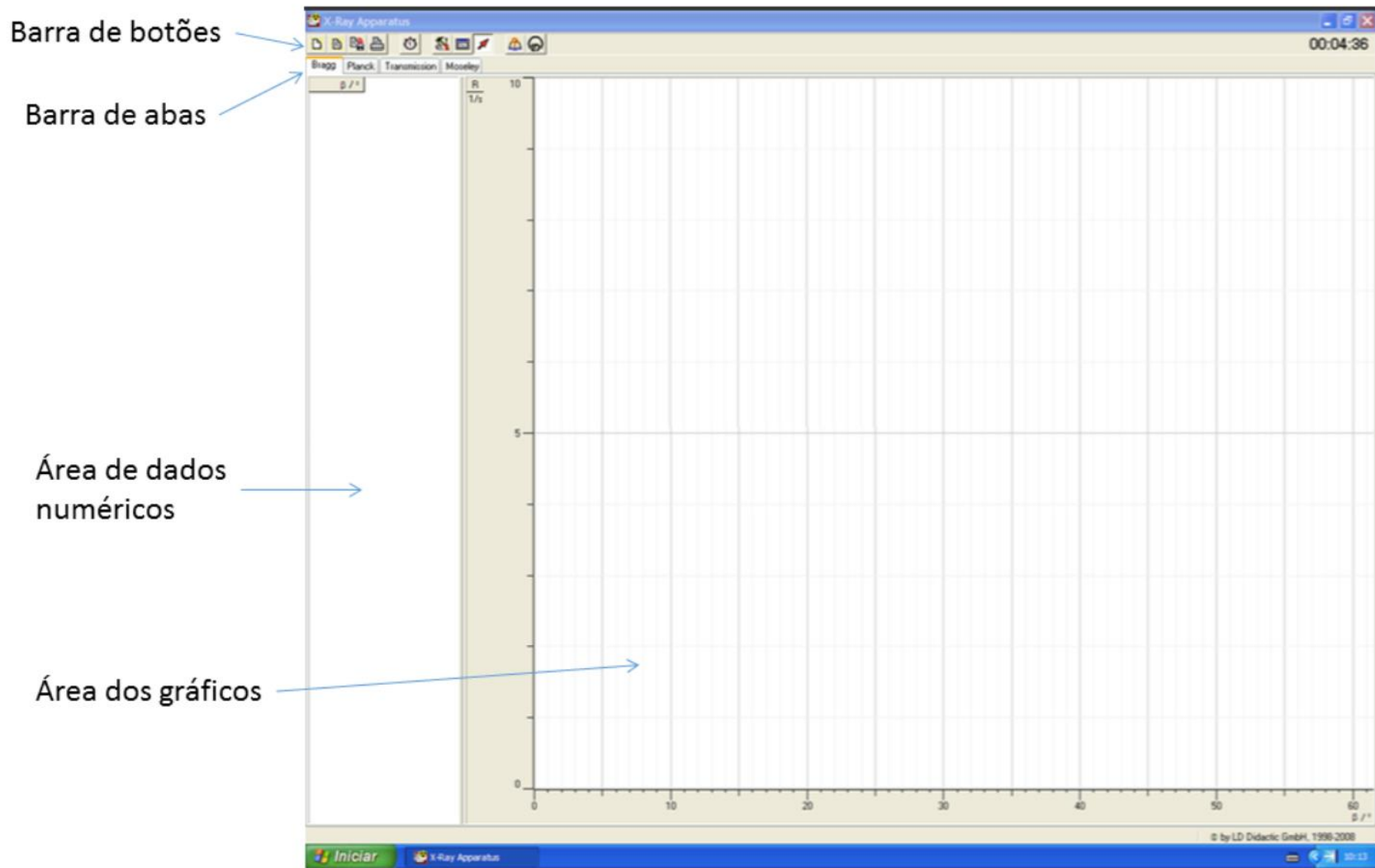
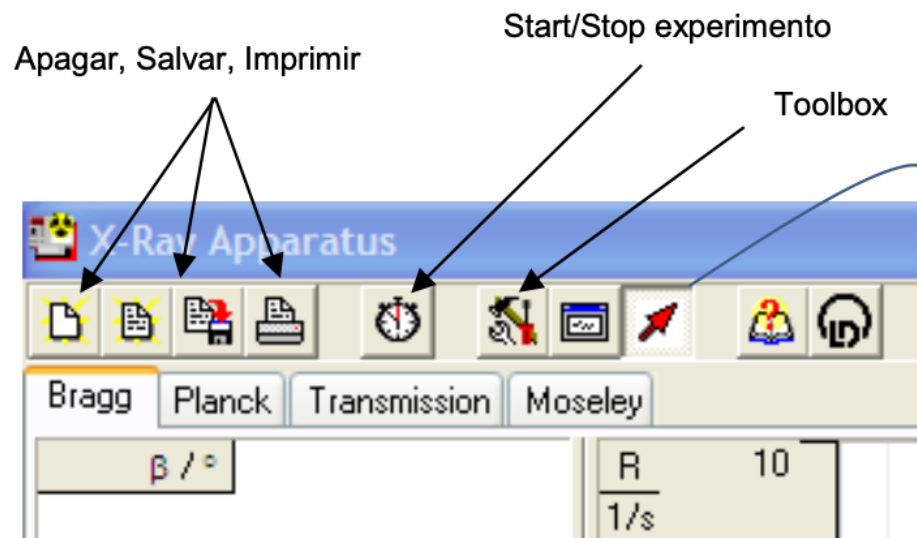
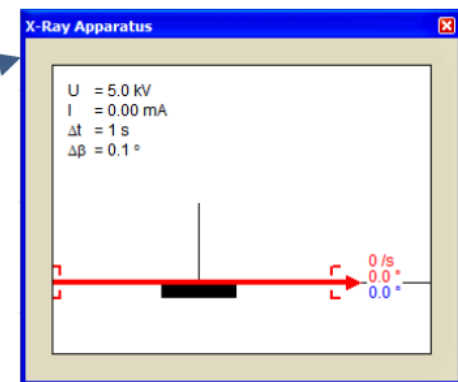


Figura 1 – painel de abertura do programa *X ray apparatus*



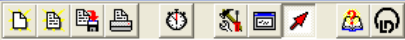
(a)

O botão com a seta abre esta tela

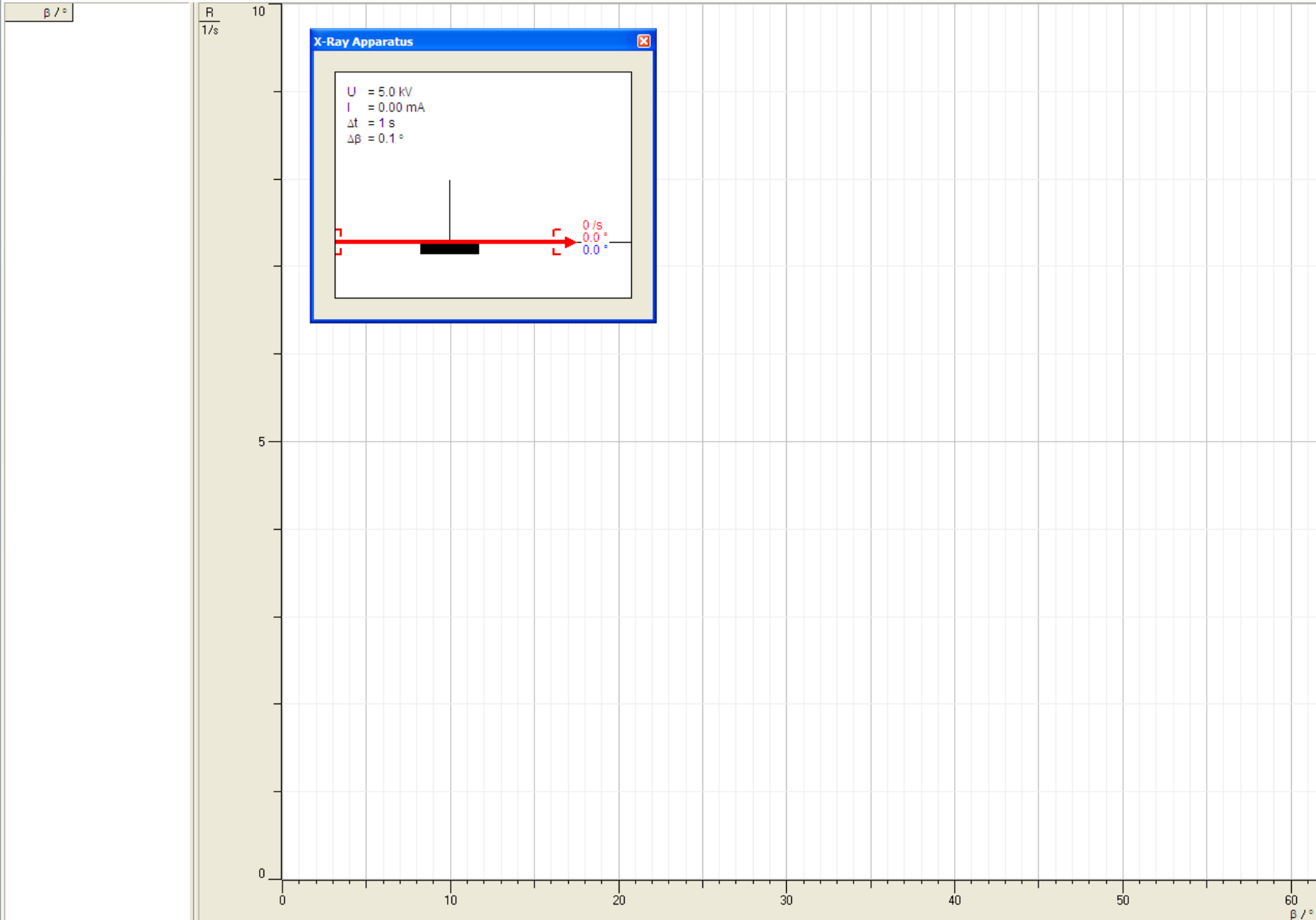


(b)

Figura 2 – Barra de ferramentas do programa *Xray apparatus*



Bragg Planck Transmission Moseley



X-Ray Apparatus



Bragg Planck Transmission Moseley

$\beta / ^\circ$	R
	10
	1/s

X-Ray Apparatus

U = 5.0 kV
I = 0.00 mA
 $\Delta t = 1$ s
 $\Delta\beta = 0.1^\circ$

0/s
0.0°
0.0°

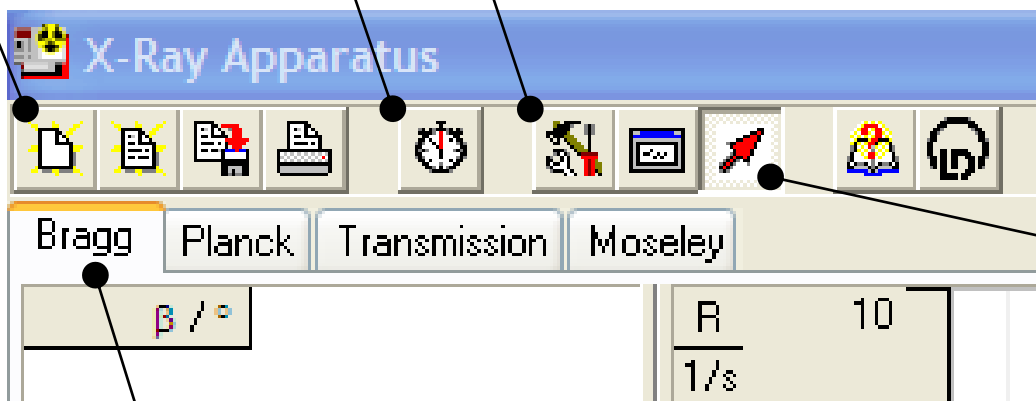
Aquisição dos dados

Parte 1 – Difração de Bragg

Salvar / apagar area de trabalho

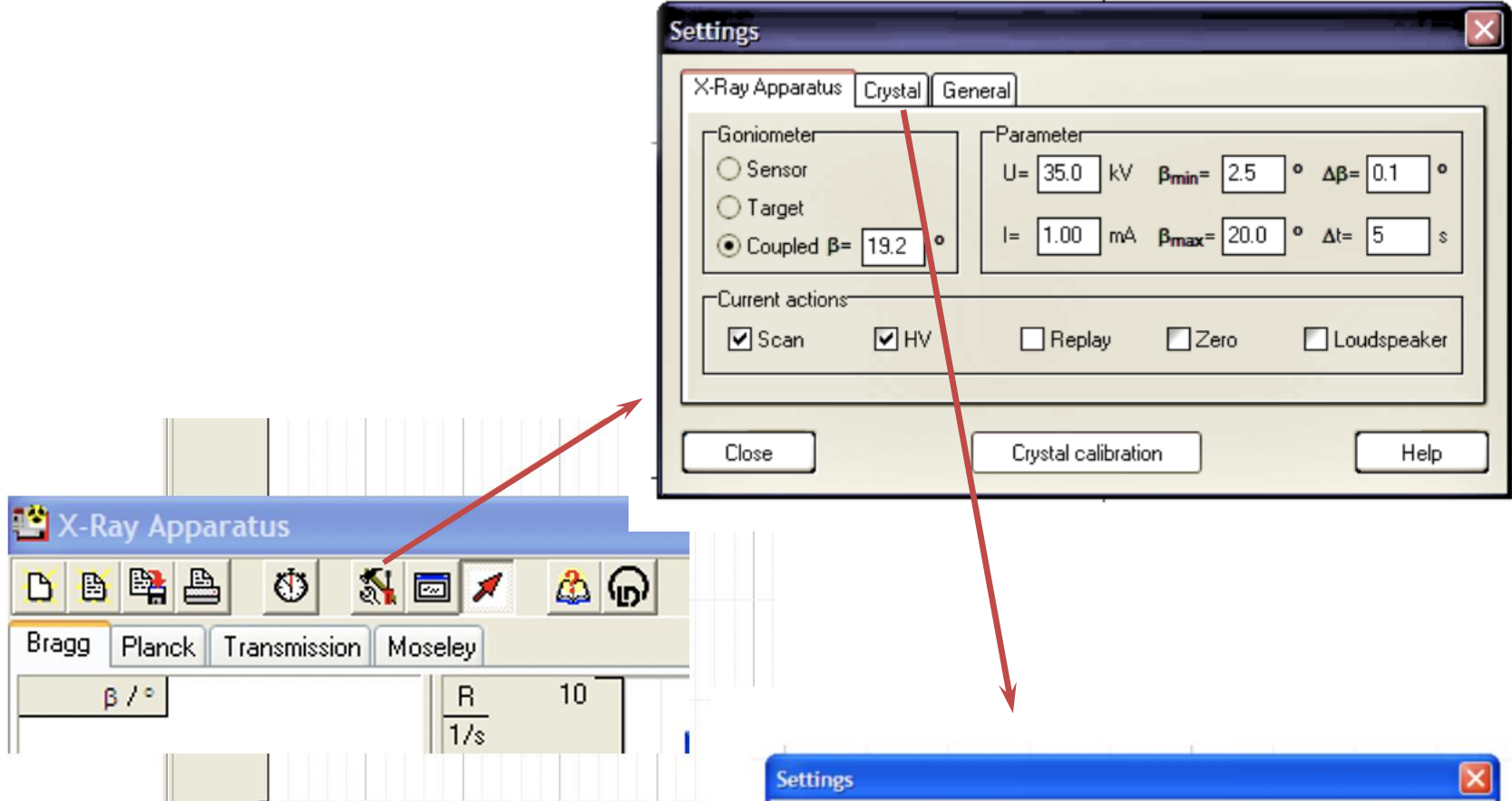
Parar / reiniciar medições

Ajustes dos parâmetros experimentais

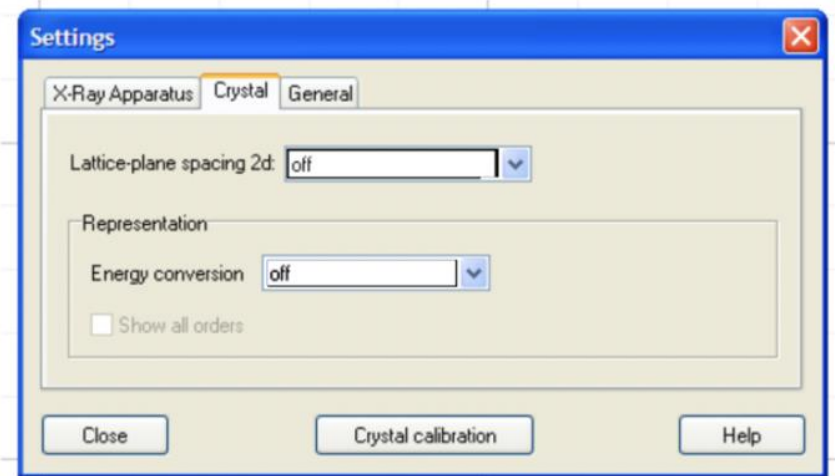


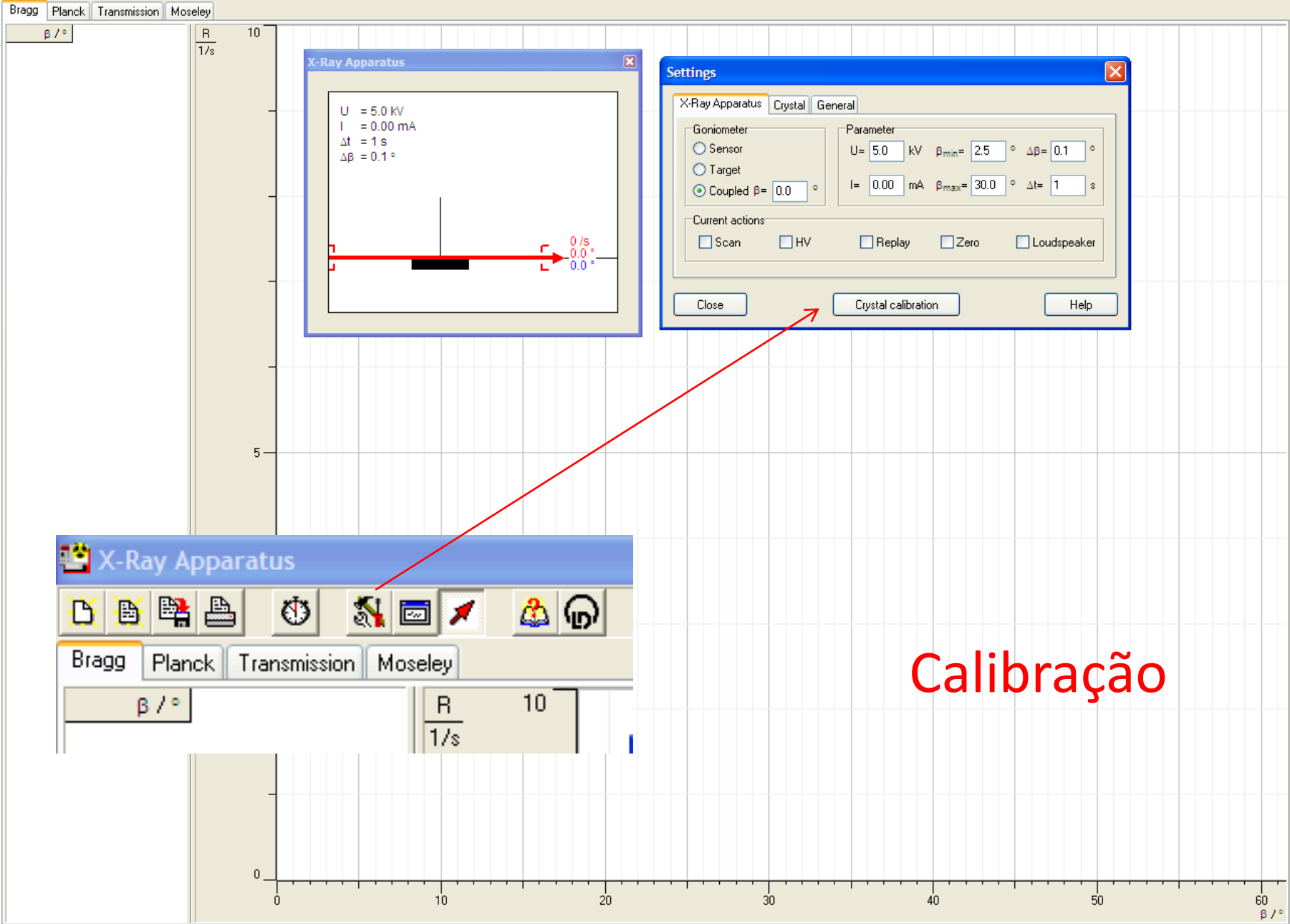
Visualização dos ângulos

1ª parte – difratometria de Bragg p/medir "*d*"



Ajuste do eixo X para experimento de Bragg





X-Ray Apparatus

U = 5.0 kV
I = 0.00 mA
 $\Delta t = 1$ s
 $\Delta \beta = 0.1^\circ$

Settings

X-Ray Apparatus Crystal General

Goniometer
 Sensor
 Target
 Coupled $\beta = 0.0^\circ$

Parameter
U = 5.0 kV $\beta_{min} = 2.5^\circ$ $\Delta \beta = 0.1^\circ$
I = 0.00 mA $\beta_{max} = 30.0^\circ$ $\Delta t = 1$ s

Current actions
 Scan HV Replay Zero Loudspeaker

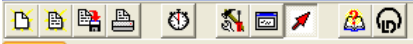
Close Crystal calibration Help

X-Ray Apparatus

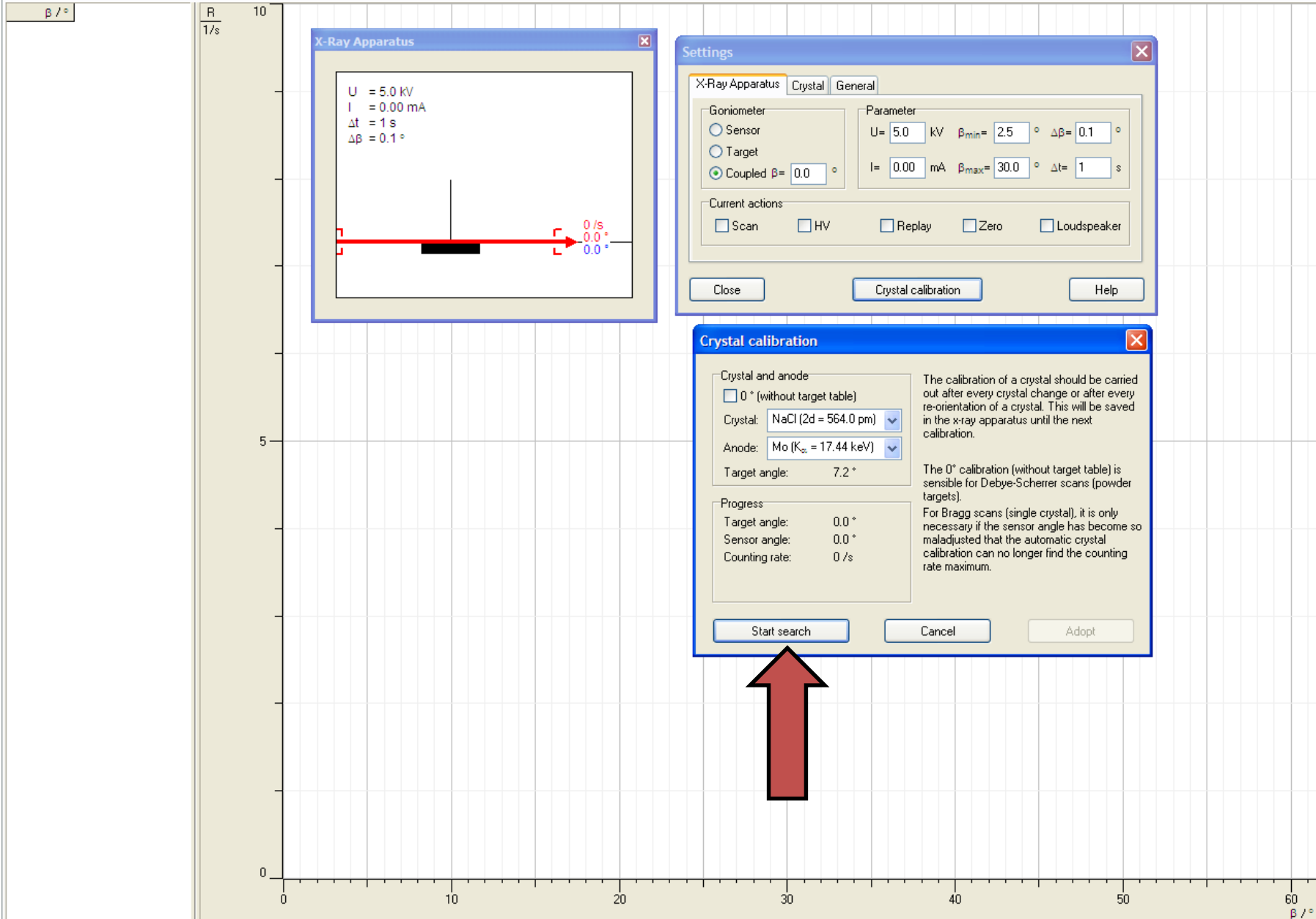
Bragg Planck Transmission Moseley

$\beta / ^\circ$ R 10
1/s

Calibração



Bragg Planck Transmission Moseley



X-Ray Apparatus

U = 5.0 kV
 I = 0.00 mA
 Δt = 1 s
 Δβ = 0.1 °

Settings

X-Ray Apparatus | Crystal | General

Goniometer
 Sensor
 Target
 Coupled β = 0.0 °

Parameter
 U = 5.0 kV β_{min} = 2.5 ° Δβ = 0.1 °
 I = 0.00 mA β_{max} = 30.0 ° Δt = 1 s

Current actions
 Scan HV Replay Zero Loudspeaker

Close Crystal calibration Help

Crystal calibration

0° (without target table)

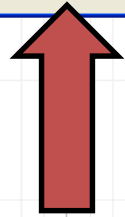
Crystal: NaCl (2d = 564.0 pm)
 Anode: Mo (K_α = 17.44 keV)
 Target angle: 7.2 °

Progress
 Target angle: 0.0 °
 Sensor angle: 0.0 °
 Counting rate: 0 /s

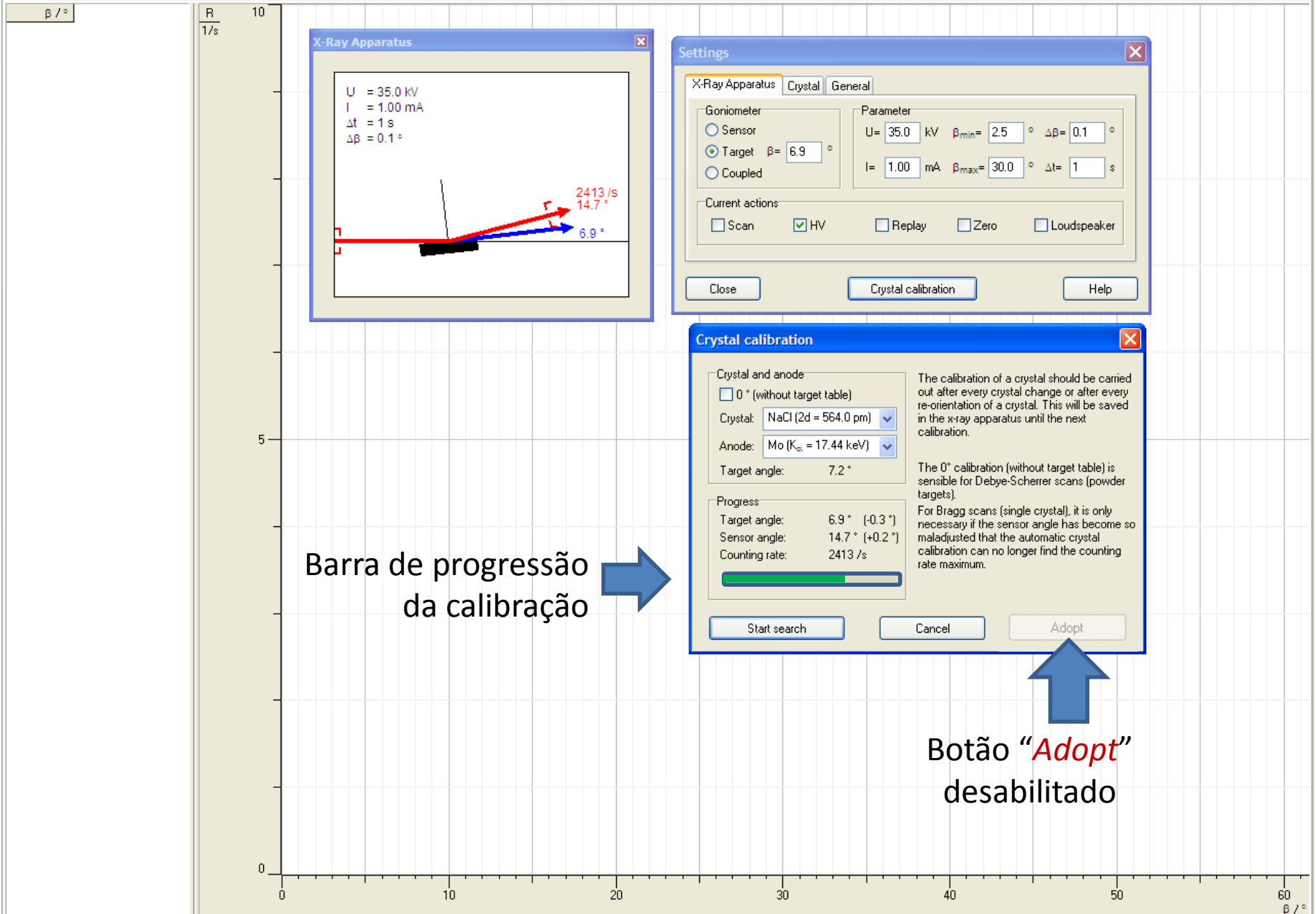
The calibration of a crystal should be carried out after every crystal change or after every re-orientation of a crystal. This will be saved in the x-ray apparatus until the next calibration.

The 0° calibration (without target table) is sensible for Debye-Scherrer scans (powder targets). For Bragg scans (single crystal), it is only necessary if the sensor angle has become so maladjusted that the automatic crystal calibration can no longer find the counting rate maximum.

Start search Cancel Adopt



Bragg Planck Transmission Moseley



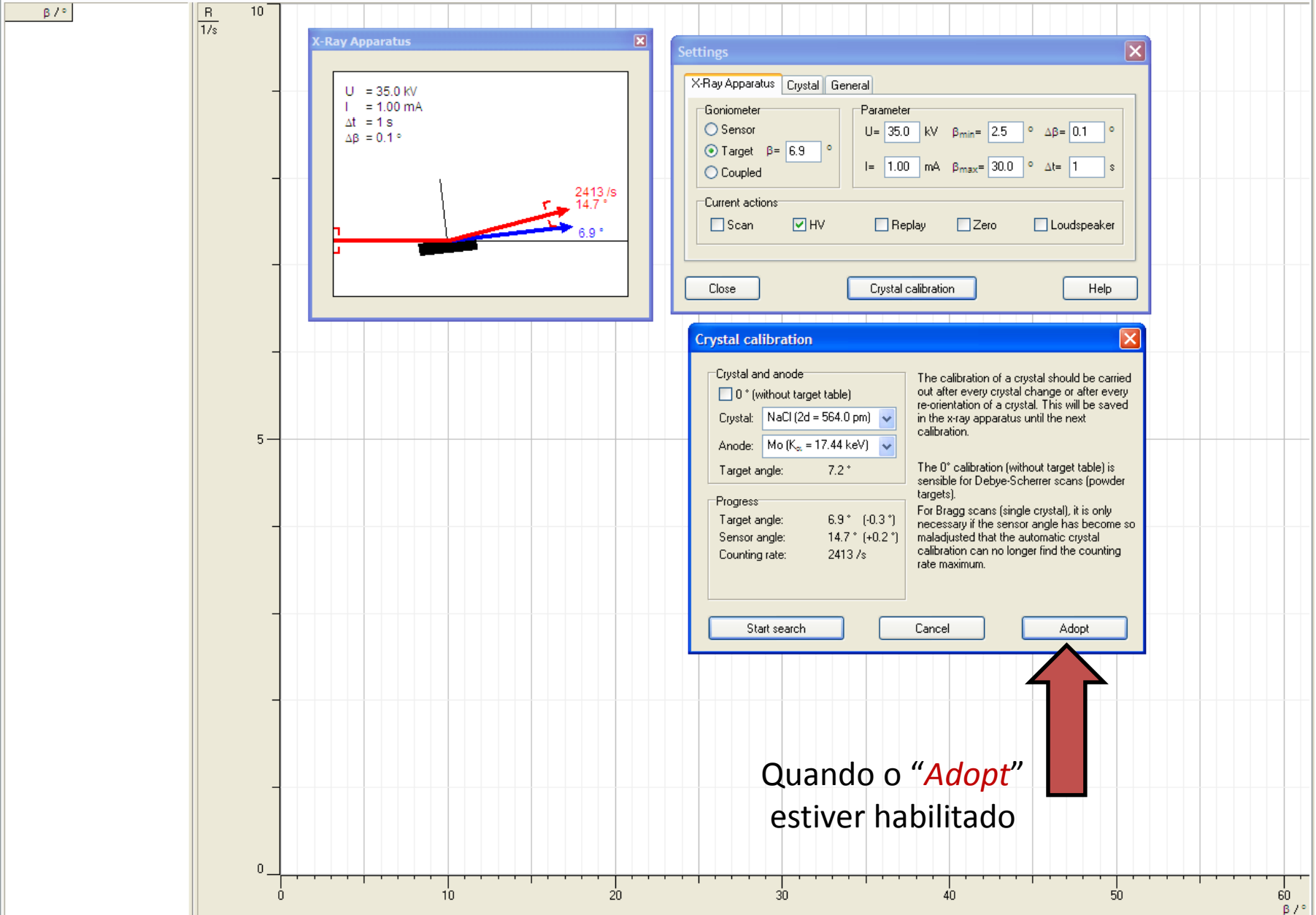
Barra de progressão
da calibração



Botão "Adopt"
desabilitado



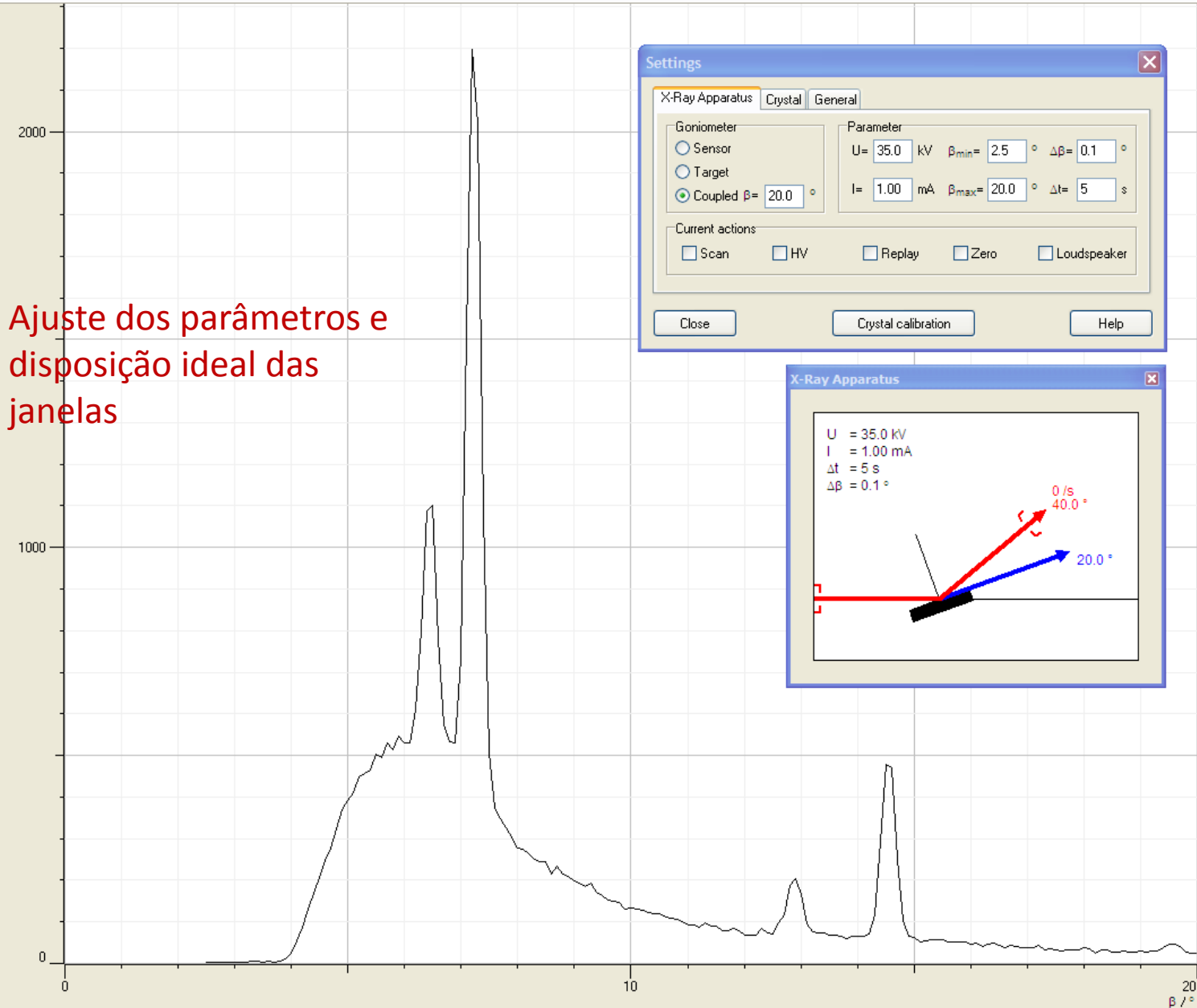
Bragg Planck Transmission Moseley



Quando o "Adopt" estiver habilitado

Bragg Planck Transmission Moseley

$\beta / ^\circ$	$R_0 / 1/s$
15.3	56.4
15.4	56.0
15.5	56.6
15.6	52.4
15.7	52.8
15.8	51.2
15.9	51.0
16.0	45.2
16.1	48.6
16.2	40.2
16.3	45.0
16.4	49.0
16.5	44.2
16.6	39.2
16.7	44.4
16.8	40.4
16.9	38.4
17.0	38.8
17.1	37.6
17.2	43.4
17.3	33.0
17.4	34.0
17.5	32.8
17.6	29.6
17.7	33.0
17.8	32.6
17.9	31.6
18.0	37.4
18.1	35.0
18.2	25.4
18.3	32.0
18.4	33.2
18.5	26.8
18.6	27.0
18.7	28.6
18.8	27.4
18.9	27.4
19.0	29.0
19.1	26.6
19.2	30.0
19.3	30.0
19.4	38.2
19.5	47.0
19.6	47.2
19.7	40.4
19.8	28.2
19.9	24.6
20.0	24.8



Ajuste dos parâmetros e disposição ideal das janelas

Settings

X-Ray Apparatus Crystal General

Goniometer

Sensor

Target

Coupled $\beta = 20.0^\circ$

Parameter

U = 35.0 kV $\beta_{min} = 2.5^\circ$ $\Delta\beta = 0.1^\circ$

I = 1.00 mA $\beta_{max} = 20.0^\circ$ $\Delta t = 5$ s

Current actions:

Scan HV Replay Zero Loudspeaker

Close Crystal calibration Help

X-Ray Apparatus

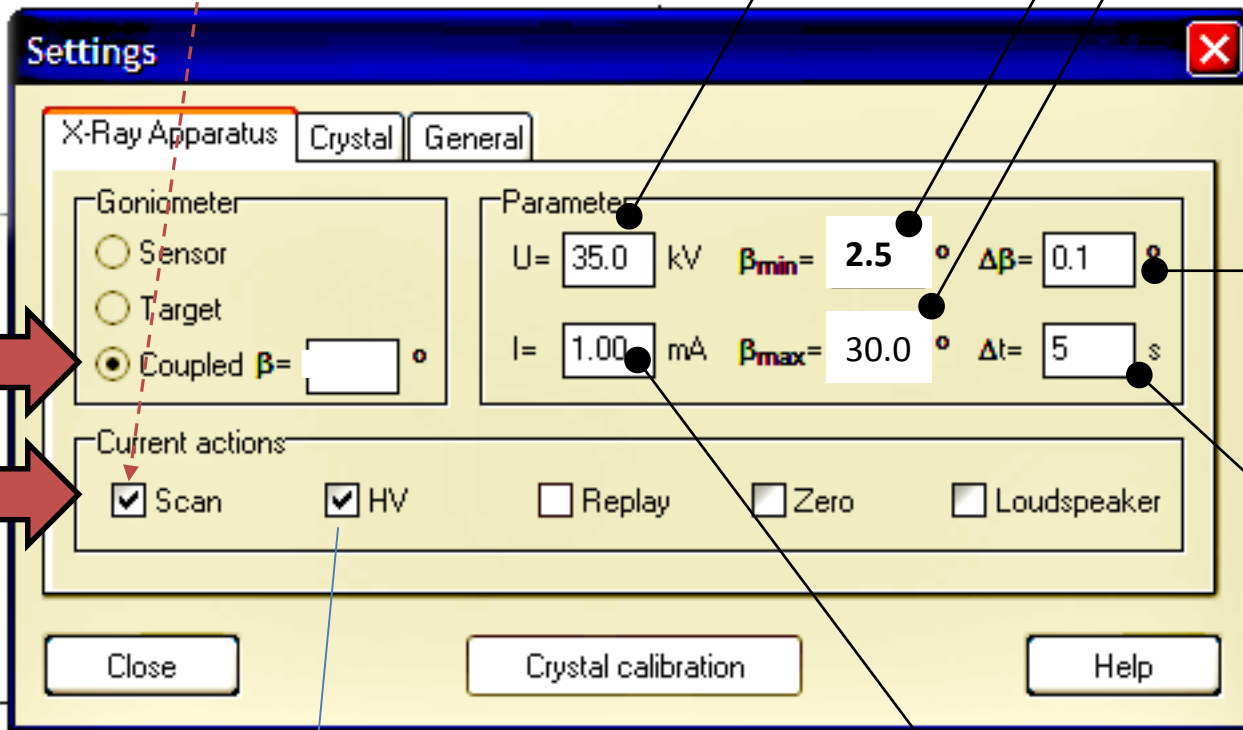
U = 35.0 kV
I = 1.00 mA
 $\Delta t = 5$ s
 $\Delta\beta = 0.1^\circ$

Atenção: a ação "scan" só deve ser ativada **após** ter entrado todos parâmetros

35 kV

2.5°

30.0°



ignorar

iniciar

Passo Angular
 $\Delta\beta = 0.1^\circ$

Tempo de Contagem

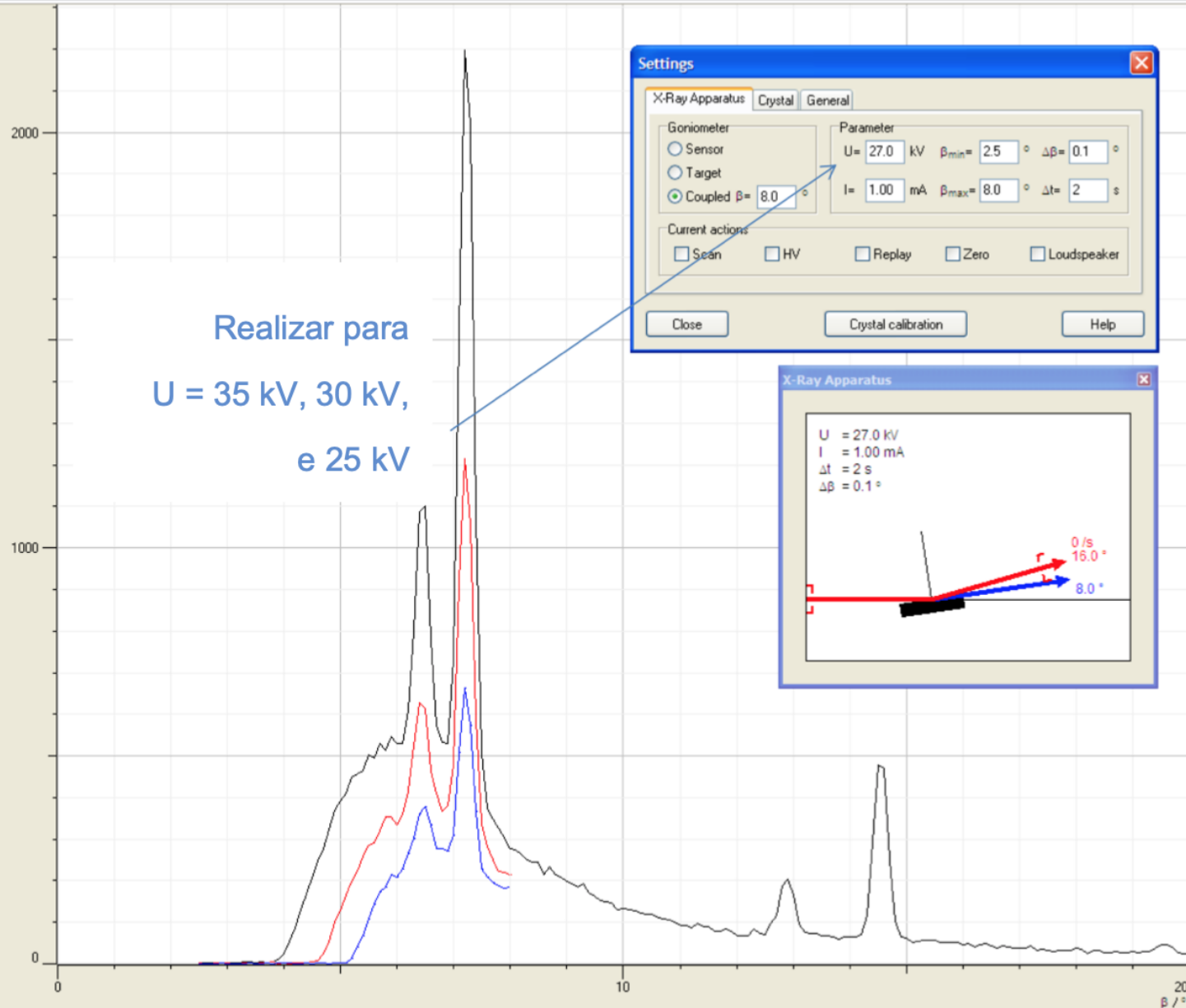
Após iniciar, o equipamento ativa essa indicação

1 mA



Bragg Planck Transmission Moseley

$\beta / ^\circ$	$R_D / 1/s$	R
2.5	2.8	1/s
2.6	2.8	
2.7	2.8	
2.8	3.0	
2.9	3.2	
3.0	1.8	
3.1	2.8	
3.2	3.6	
3.3	5.6	
3.4	4.4	
3.5	4.0	
3.6	6.0	
3.7	4.0	
3.8	6.6	
3.9	10.2	
4.0	24.4	
4.1	55.2	
4.2	85.8	
4.3	131.4	
4.4	168.4	
4.5	205.4	
4.6	247.8	
4.7	278.0	
4.8	324.8	
4.9	369.4	
5.0	391.6	
5.1	410.6	
5.2	449.0	
5.3	457.2	
5.4	465.4	
5.5	502.8	
5.6	495.2	
5.7	529.6	
5.8	514.8	
5.9	546.0	
6.0	531.6	
6.1	529.4	
6.2	608.2	
6.3	798.6	
6.4	1086.4	
6.5	1100.0	
6.6	779.4	
6.7	574.4	
6.8	533.8	
6.9	529.4	
7.0	734.4	
7.1	1514.0	
7.2	2100.0	



Realizar para
 $U = 35 \text{ kV}, 30 \text{ kV},$
 e 25 kV

Settings

X-Ray Apparatus Crystal General

Goniometer
 Sensor
 Target
 Coupled $\beta = 8.0^\circ$

Parameter
 $U = 27.0 \text{ kV}$ $\beta_{max} = 2.5^\circ$ $\Delta\beta = 0.1^\circ$
 $I = 1.00 \text{ mA}$ $\beta_{max} = 8.0^\circ$ $\Delta t = 2 \text{ s}$

Current actions
 Scan HV Replay Zero Loudspeaker

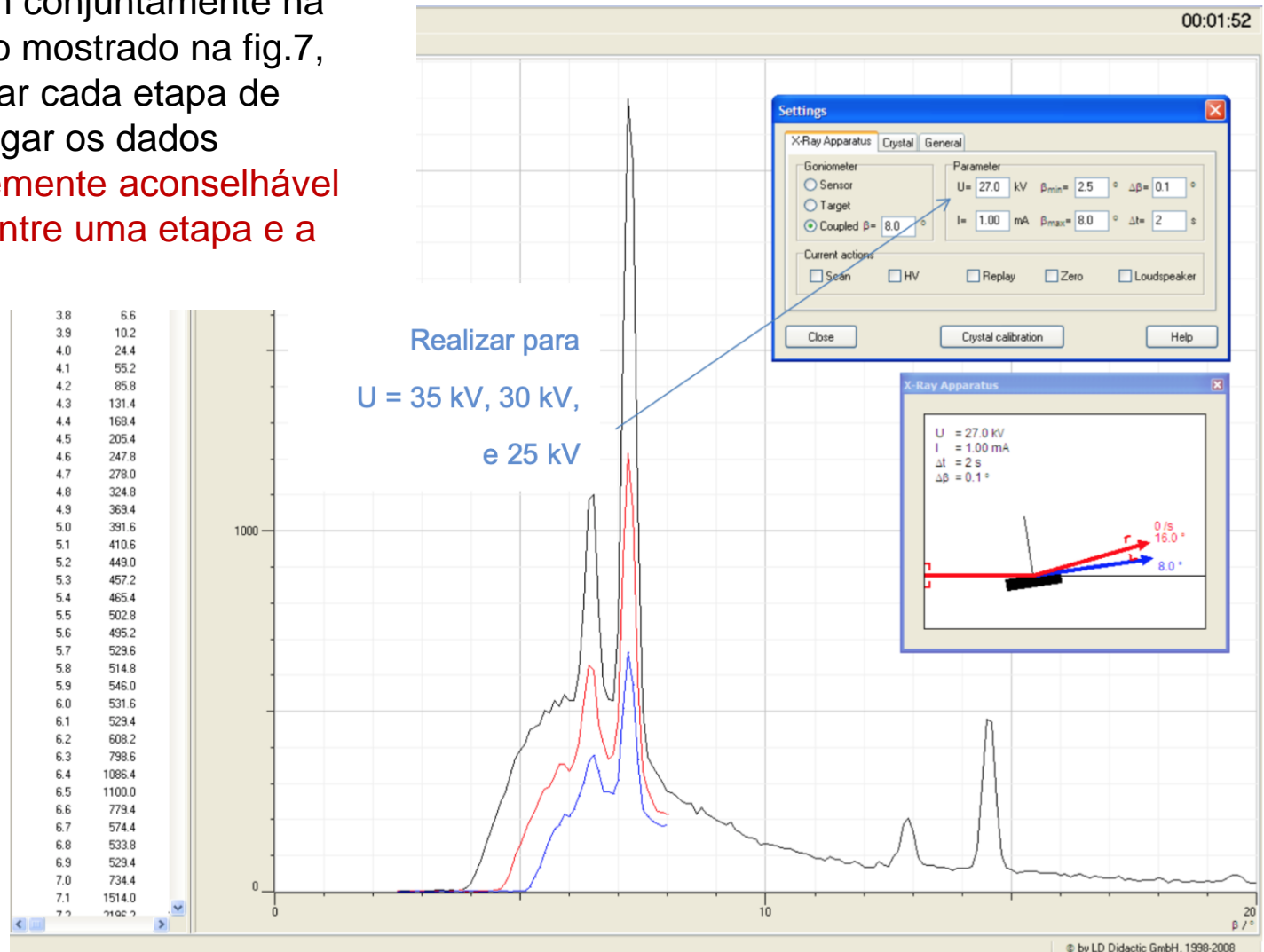
Close Crystal calibration Help

X-Ray Apparatus

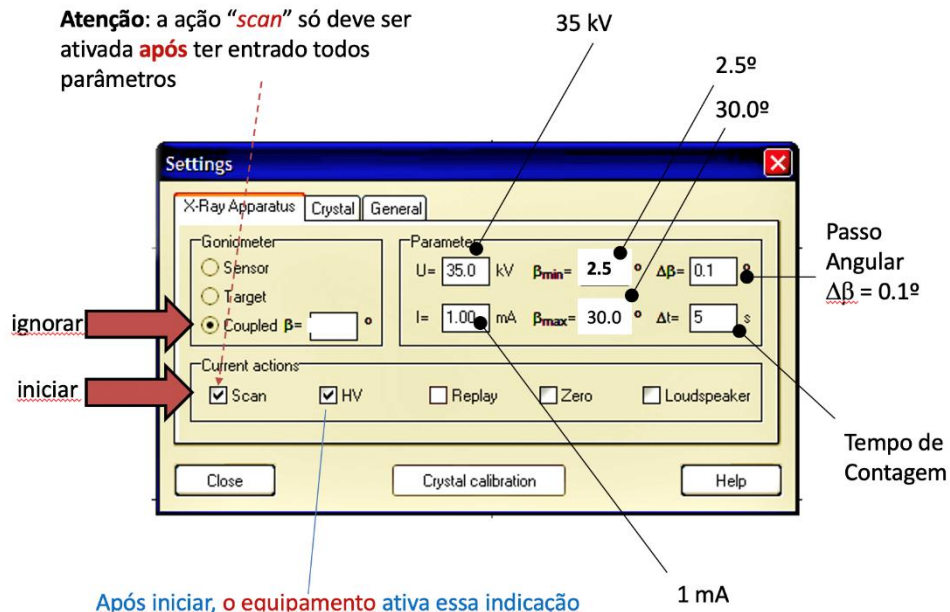
$U = 27.0 \text{ kV}$
 $I = 1.00 \text{ mA}$
 $\Delta t = 2 \text{ s}$
 $\Delta\beta = 0.1^\circ$

$0/s$
 16.0°
 8.0°

A figura apresenta os gráficos que resultarão das 3 etapas de medida, cada uma correspondendo a um valor de tensão aceleradora U . Para que os três gráficos apareçam conjuntamente na mesma tela, como mostrado na fig.7, você deve executar cada etapa de medição sem apagar os dados anteriores. **É fortemente aconselhável salvar os dados entre uma etapa e a seguinte.**



Atenção: a ação "scan" só deve ser ativada **após** ter entrado todos parâmetros



A duração aproximada da tomada de dados do primeiro experimento é de **90 minutos** (3 sessões de 30 minutos, uma para cada valor de U).

Cada linha da tabela I constitui uma etapa. Note que apenas os valores da 1ª coluna mais à esquerda é que mudam a cada etapa – são os valores da tensão a ser aplicada ao tubo de raio-X. Os valores das demais colunas se repetem nas 3 etapas.

TABELA I

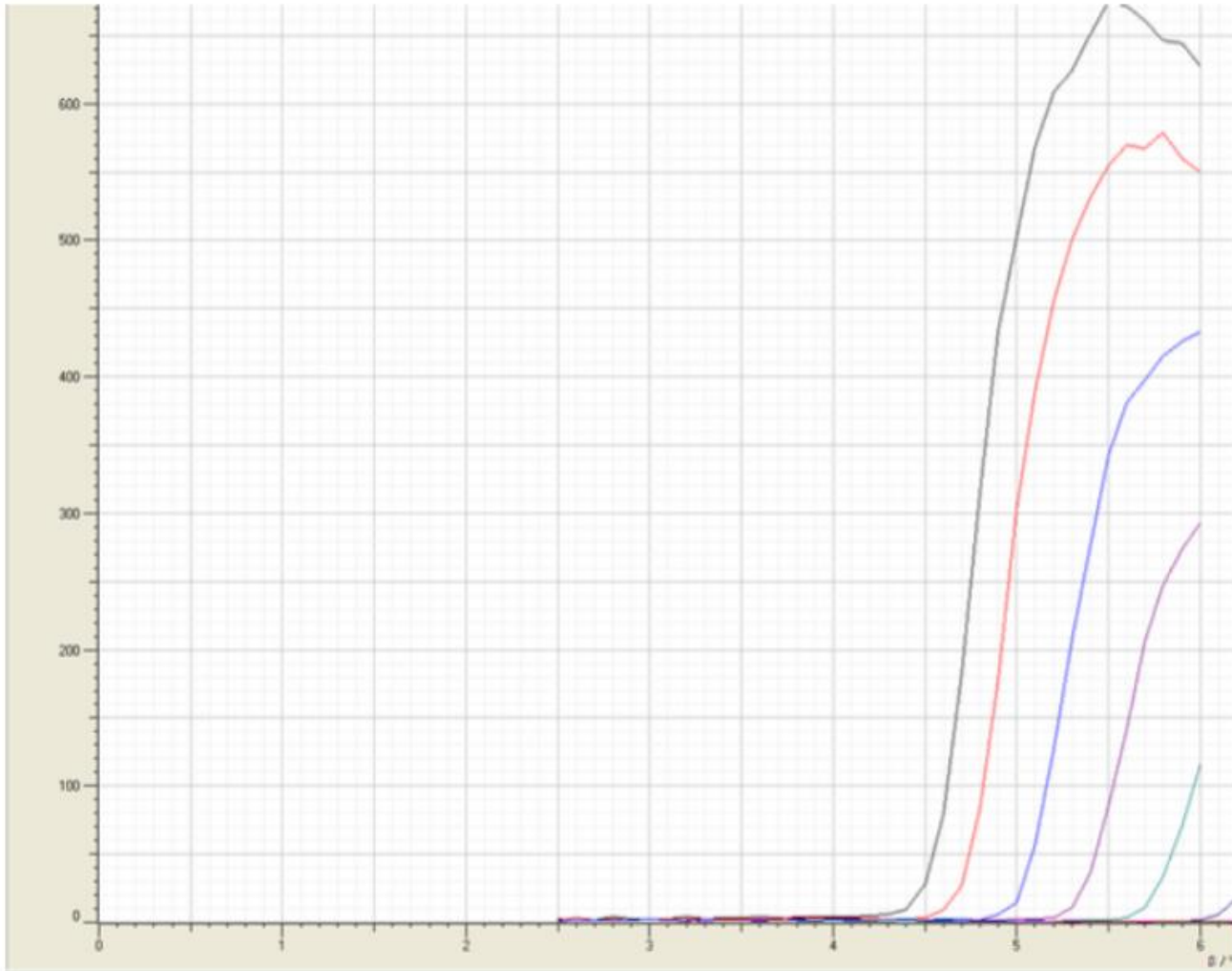
Tensão U (kV)	Corrente I (mA)	β_{\min} (graus)	β_{\max} (graus)	$\Delta\beta$ (graus)	Δt (seg)
35	1	2,5	30	0,1	5
30	1	2,5	30	0,1	5
25	1	2,5	30	0,1	5

São 3 etapas:
35 kV
30 kV
25 kV

É fortemente aconselhável salvar os dados entre uma etapa e a seguinte.

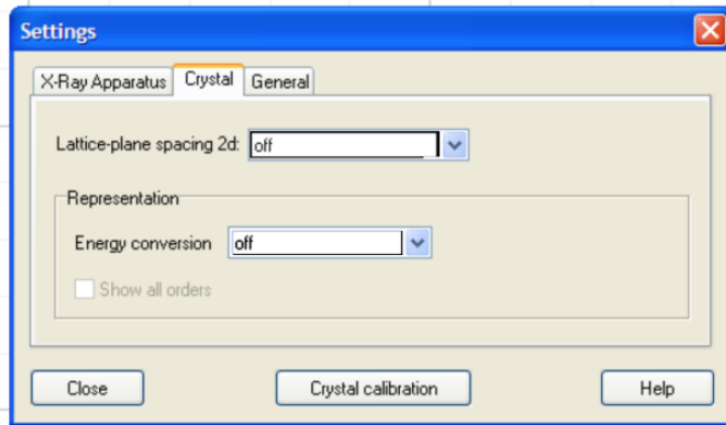
Aquisição dos dados

Parte 2 – Determinação da constante de Planck pelo experimento de Duane-Hunt

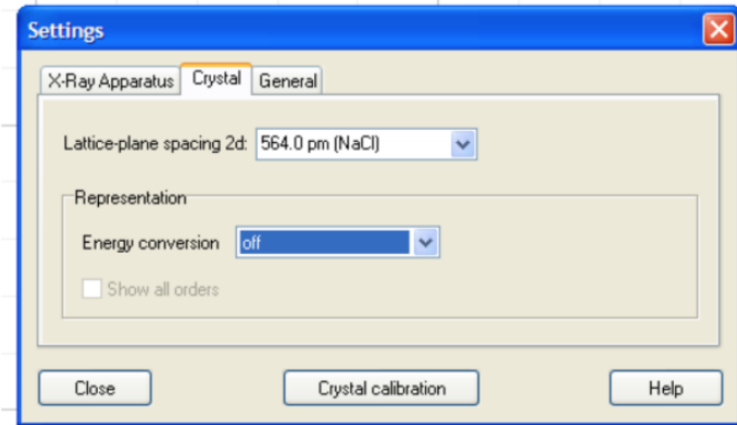


Curvas de espectro de Bremsstrahlung

Cuidado ! Eixo das abscissas em $n\lambda$

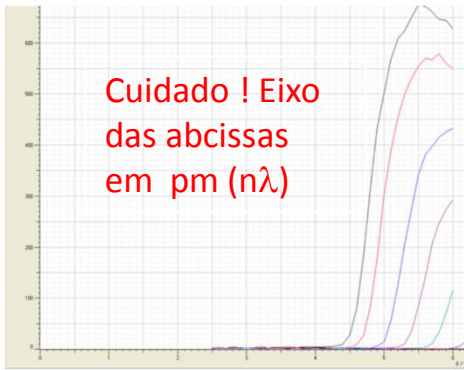


(a)

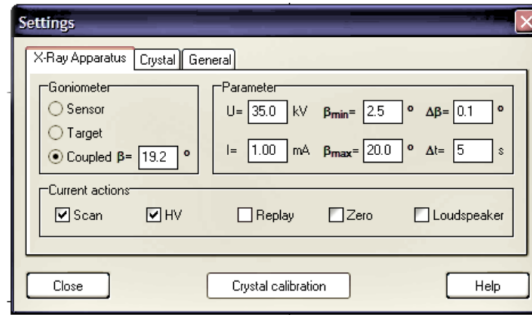


(b)

Configurações do painel *Settings* para cada experimento. (a) Configuração usada no primeiro experimento (difração de Bragg). As duas caixas devem ficar em off. (b) Configuração usada no segundo experimento (determinação de h). Informar o valor de d na caixa de cima e a outra deixar em off.



Curvas de espectro de Bremsstrahlung



Não esqueça de limpar a área de gráficos na janela do programa antes de começar a fazer as aquisições.

TABELA II

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{\Delta t}{\text{s}}$	$\frac{\beta_{\text{min}}}{\text{grd}}$	$\frac{\beta_{\text{max}}}{\text{grd}}$	$\frac{\Delta\beta}{\text{grd}}$
22	1.00	30	5.2	6.2	0.1
24	1.00	30	5.0	6.2	0.1
26	1.00	20	4.5	6.2	0.1
28	1.00	20	3.8	6.0	0.1
30	1.00	10	3.2	6.0	0.1
32	1.00	10	2.5	6.0	0.1
34	1.00	10	2.5	6.0	0.1
35	1.00	10	2.5	6.0	0.1

Quando terminar de realizar as medidas correspondentes a cada linha da tabela II, **salve os dados** (**CUIDADO!** : salve em um arquivo diferente daquele que salvou os dados do experimento de Bragg).

Sugestão: realize o experimento seguindo a tabela de baixo para cima

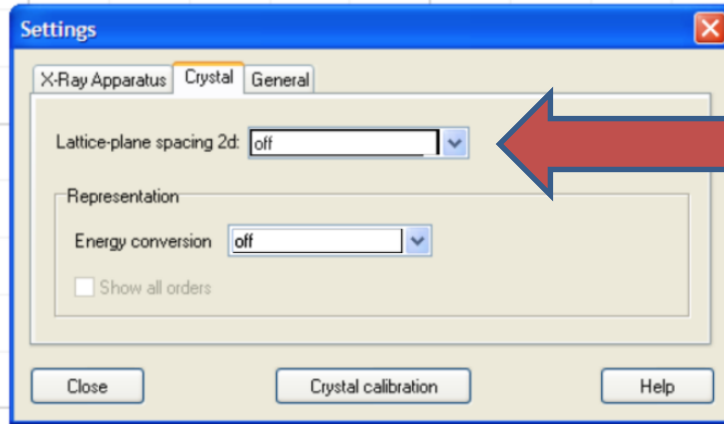
Análise dos dados

Feita com auxílio do programa
X ray apparatus

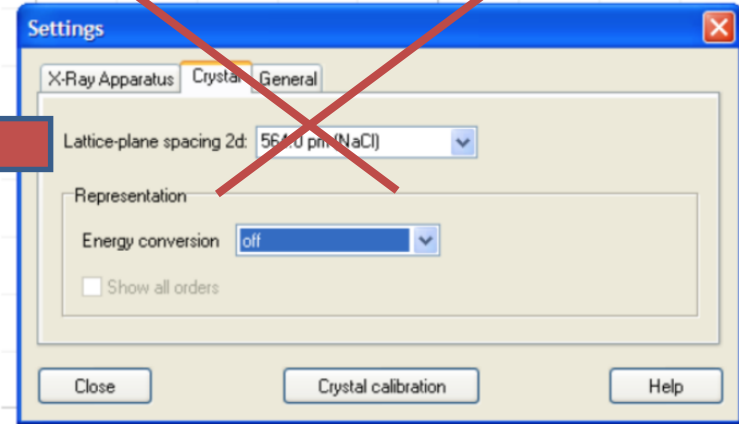
Parte 1 - Análise da difração de Bragg

1. Determinar os centros dos picos
2. Determinar as incertezas dos centros
3. Calcular os valores da distância interatômica d

Voltar à configuração para Bragg



(a)

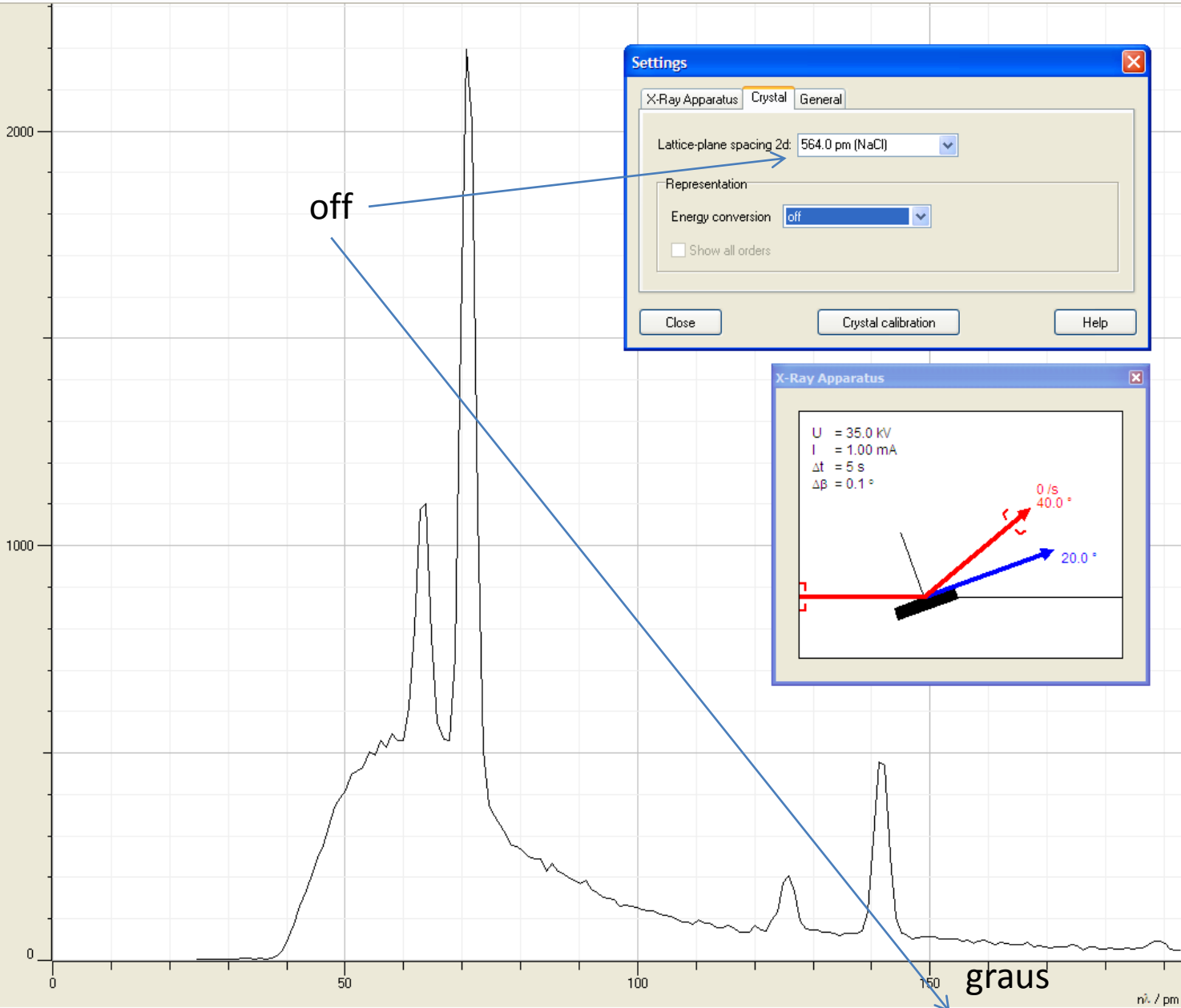


(b)

Configurações do painel *Settings* para cada experimento. (a) Configuração usada no primeiro experimento (difração de Bragg). As duas caixas devem ficar em off. (b) Configuração usada no segundo experimento (determinação de h). Informar o valor de d na caixa de cima e a outra deixar em off.

Bragg Planck Transmission Moseley

n_i / pm	R_0 / 1/s
24.6	2.8
25.6	2.8
26.6	2.8
27.6	3.0
28.5	3.2
29.5	1.8
30.5	2.8
31.5	3.6
32.5	5.6
33.4	4.4
34.4	4.0
35.4	6.0
36.4	4.0
37.4	6.6
38.4	10.2
39.3	24.4
40.3	55.2
41.3	85.8
42.3	131.4
43.3	168.4
44.3	205.4
45.2	247.8
46.2	278.0
47.2	324.8
48.2	369.4
49.2	391.6
50.1	410.6
51.1	449.0
52.1	457.2
53.1	465.4
54.1	502.8
55.0	495.2
56.0	529.6
57.0	514.8
58.0	546.0
59.0	531.6
59.9	529.4
60.9	608.2
61.9	798.6
62.9	1086.4
63.8	1100.0
64.8	779.4
65.8	574.4
66.8	533.8
67.8	529.4
68.7	734.4
69.7	1514.0
70.7	2196.2
71.7	2016.0



off

Settings

X-Ray Apparatus Crystal General

Lattice-plane spacing 2d: 564.0 pm (NaCl)

Representation

Energy conversion: off

Show all orders

Close Crystal calibration Help

X-Ray Apparatus

U = 35.0 kV
 I = 1.00 mA
 Δt = 5 s
 Δβ = 0.1 °

0/s 40.0 °
20.0 °

graus

Bragg Planck Transmission Moseley

$\beta / ^\circ$	$R_0 / 1/s$	R 1/s
15.3	56.4	
15.4	56.0	

Properties

Delete Column

Select Character Size

Display Coordinates

Alt+C

Select Line Width

Show Values

✓ Show Connecting Lines

Select Rulers

✓ Show Grid

Logarithmic Representation

Zoom

Alt+Z

Zoom Off

Alt+O

Set Marker

Calculate Peak Center

Draw K-edge

Calculate Best-fit Straight Line

Calculate Straight Line through Origin

Calculate Integral

Delete Last Evaluation

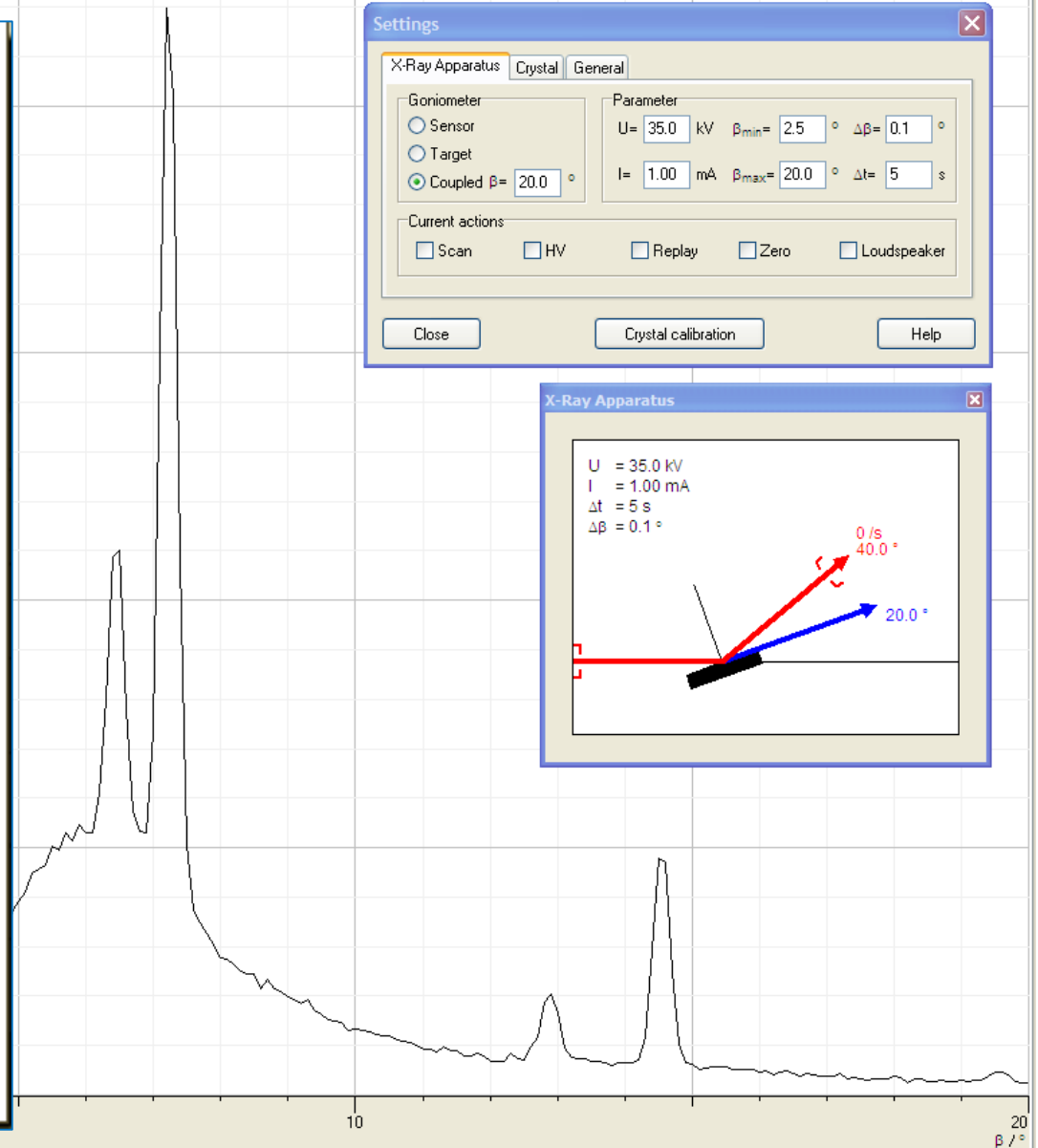
Alt+Rück

Delete All Evaluations

Copy Table

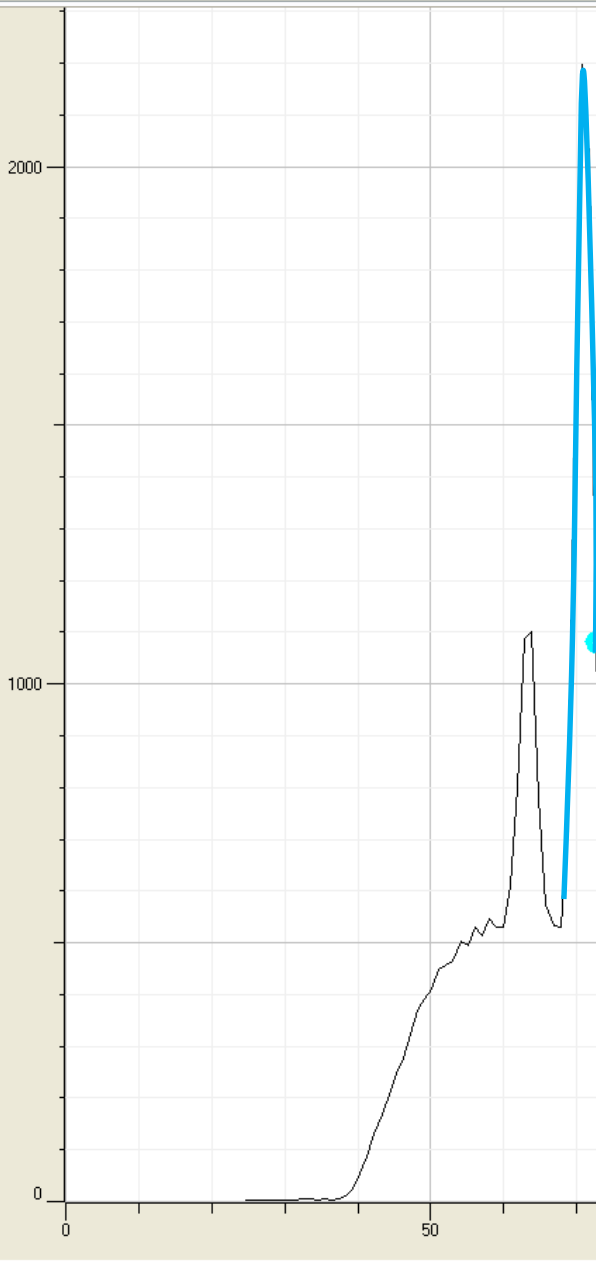
Copy Diagram

Copy Window



Bragg Planck Transmission Moseley

ni. / pm	R ₀ / 1/s
26.6	2.8
27.6	3.0
28.5	3.2
29.5	1.8
30.5	2.8
31.5	3.6
32.5	5.6
33.4	4.4
34.4	4.0
35.4	6.0
36.4	4.0
37.4	6.6
38.4	10.2
39.3	24.4
40.3	55.2
41.3	85.8
42.3	131.4
43.3	168.4
44.3	205.4
45.2	247.8
46.2	278.0
47.2	324.8
48.2	369.4
49.2	391.6
50.1	410.6
51.1	449.0
52.1	457.2
53.1	465.4
54.1	502.8
55.0	495.2
56.0	529.6
57.0	514.8
58.0	546.0
59.0	531.6
59.9	529.4
60.9	608.2
61.9	798.6
62.9	1086.4
63.8	1100.0
64.8	779.4
65.8	574.4
66.8	533.8
67.8	529.4
68.7	734.4
69.7	1514.0
70.7	2196.2
71.7	2016.8
72.6	1081.2
73.6	584.6



Settings

X-Ray Apparatus **Crystal** General

Lattice-plane spacing 2d: 564.0 pm (NaCl)

Representation

Energy conversion: off

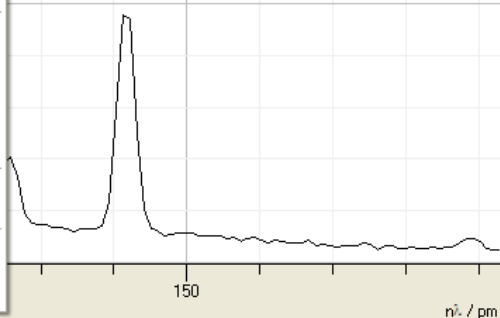
Show all orders

Close Crystal calibration Help

X-Ray Apparatus

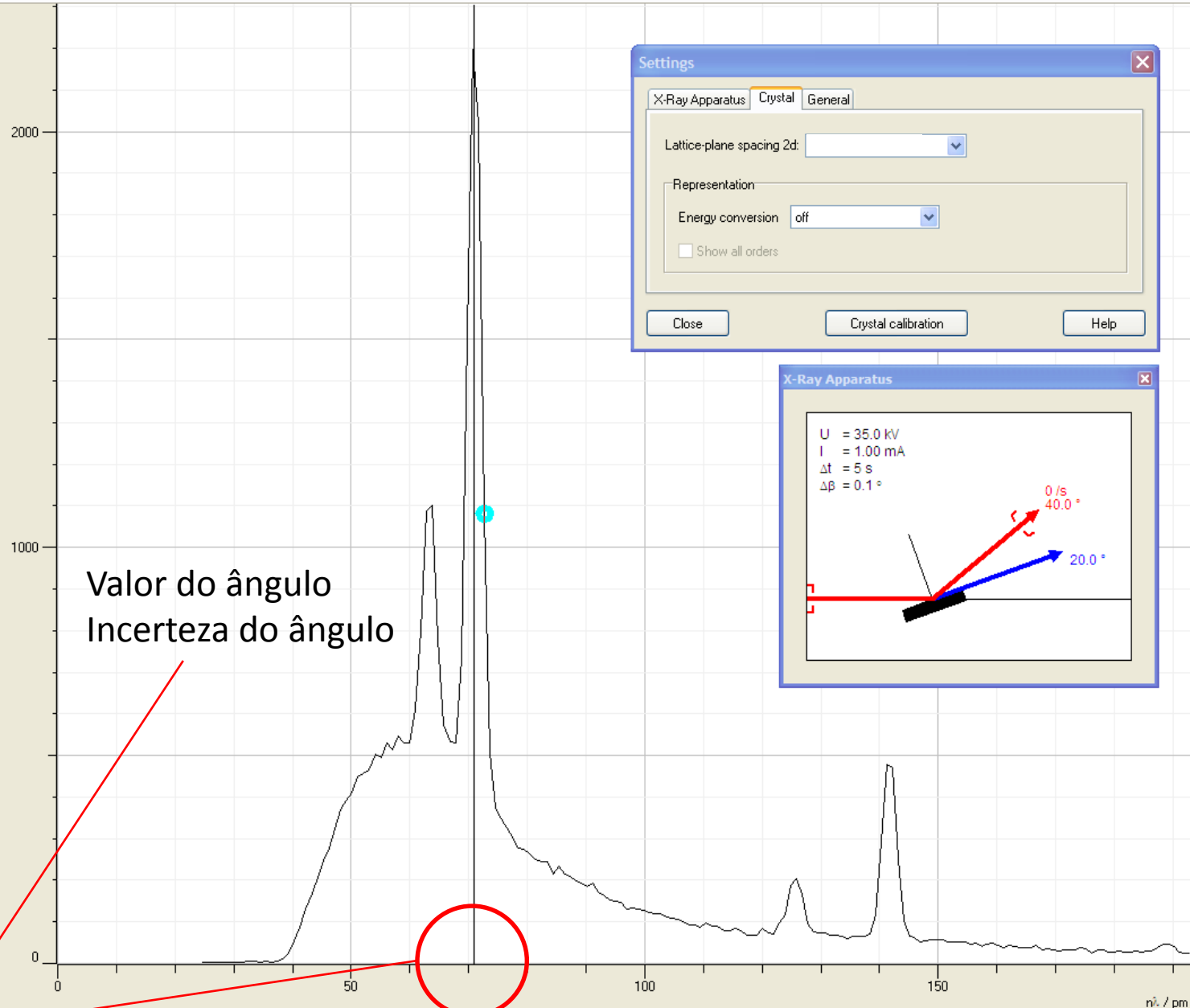
U = 35.0 kV
I = 1.00 mA
Δt = 5 s
Δβ = 0.1 °

- Properties
- Delete Column
- Select Character Size
- Display Coordinates Alt+C
- Select Line Width
- Show Values
- Show Connecting Lines
- Select Rulers
- Show Grid
- Logarithmic Representation
- Zoom Alt+Z
- Zoom Off Alt+O
- Set Marker
- Calculate Peak Center
- Draw K-edge
- Calculate Best-fit Straight Line
- Calculate Straight Line through Origin
- Calculate Integral
- Delete Last Evaluation Alt+Rück
- Delete All Evaluations
- Copy Table
- Copy Diagram
- Copy Window



Bragg Planck Transmission Moseley

n_i / pm	R_0 / 1/s
26.6	2.8
27.6	3.0
28.5	3.2
29.5	1.8
30.5	2.8
31.5	3.6
32.5	5.6
33.4	4.4
34.4	4.0
35.4	6.0
36.4	4.0
37.4	6.6
38.4	10.2
39.3	24.4
40.3	55.2
41.3	85.8
42.3	131.4
43.3	168.4
44.3	205.4
45.2	247.8
46.2	278.0
47.2	324.8
48.2	369.4
49.2	391.6
50.1	410.6
51.1	449.0
52.1	457.2
53.1	465.4
54.1	502.8
55.0	495.2
56.0	529.6
57.0	514.8
58.0	546.0
59.0	531.6
59.9	529.4
60.9	608.2
61.9	798.6
62.9	1086.4
63.8	1100.0
64.8	779.4
65.8	574.4
66.8	533.8
67.8	529.4
68.7	734.4
69.7	1514.0
70.7	2196.2
71.7	2016.8
72.6	1081.2
73.6	594.0



Valor do ângulo
Incerteza do ângulo

Settings

X-Ray Apparatus **Crystal** General

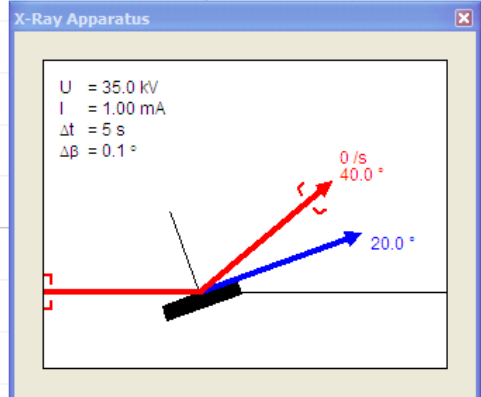
Lattice-plane spacing 2d:

Representation

Energy conversion

Show all orders

Close Crystal calibration Help



$n_i = 70.93$ pm, $\sigma = 1.01$ pm

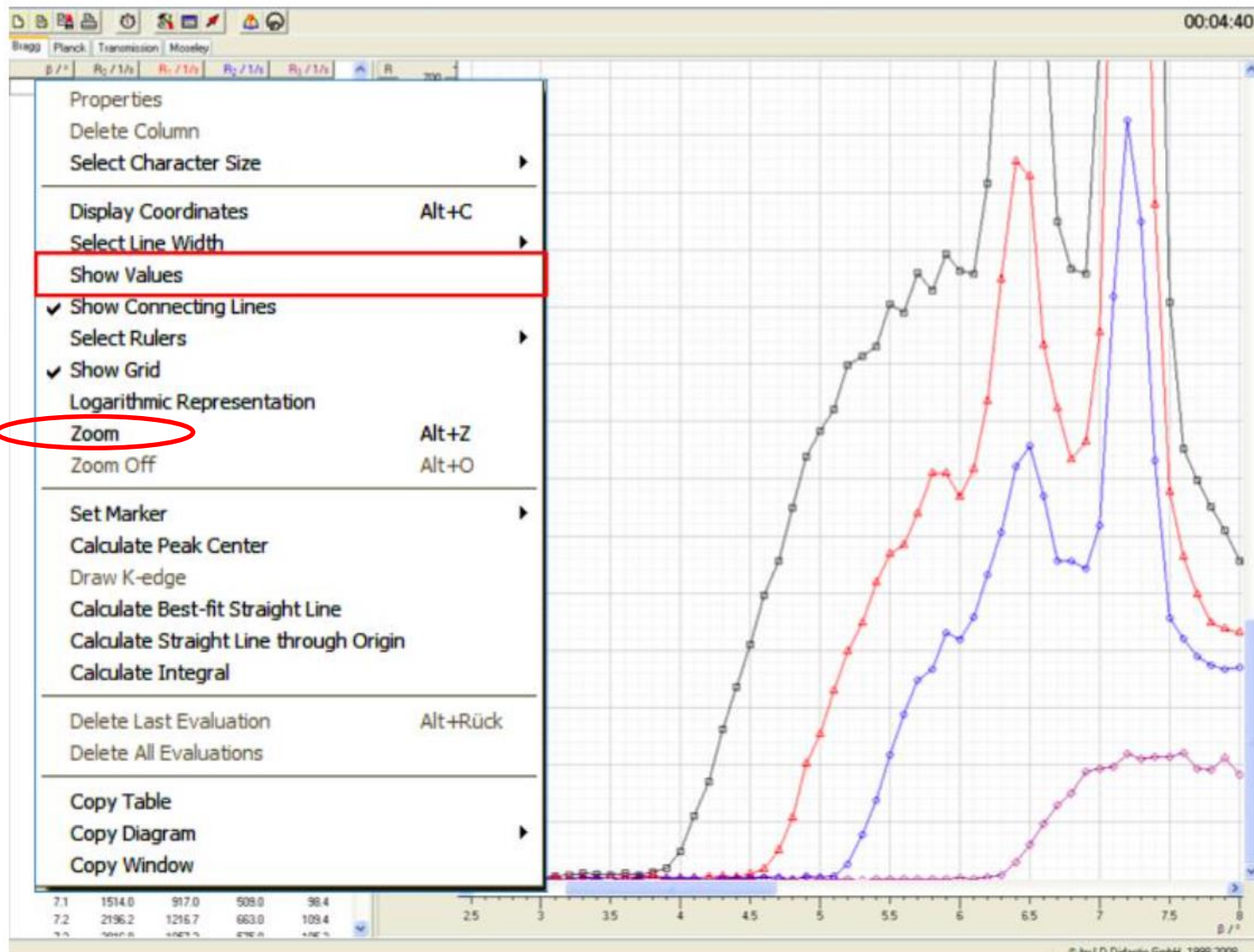
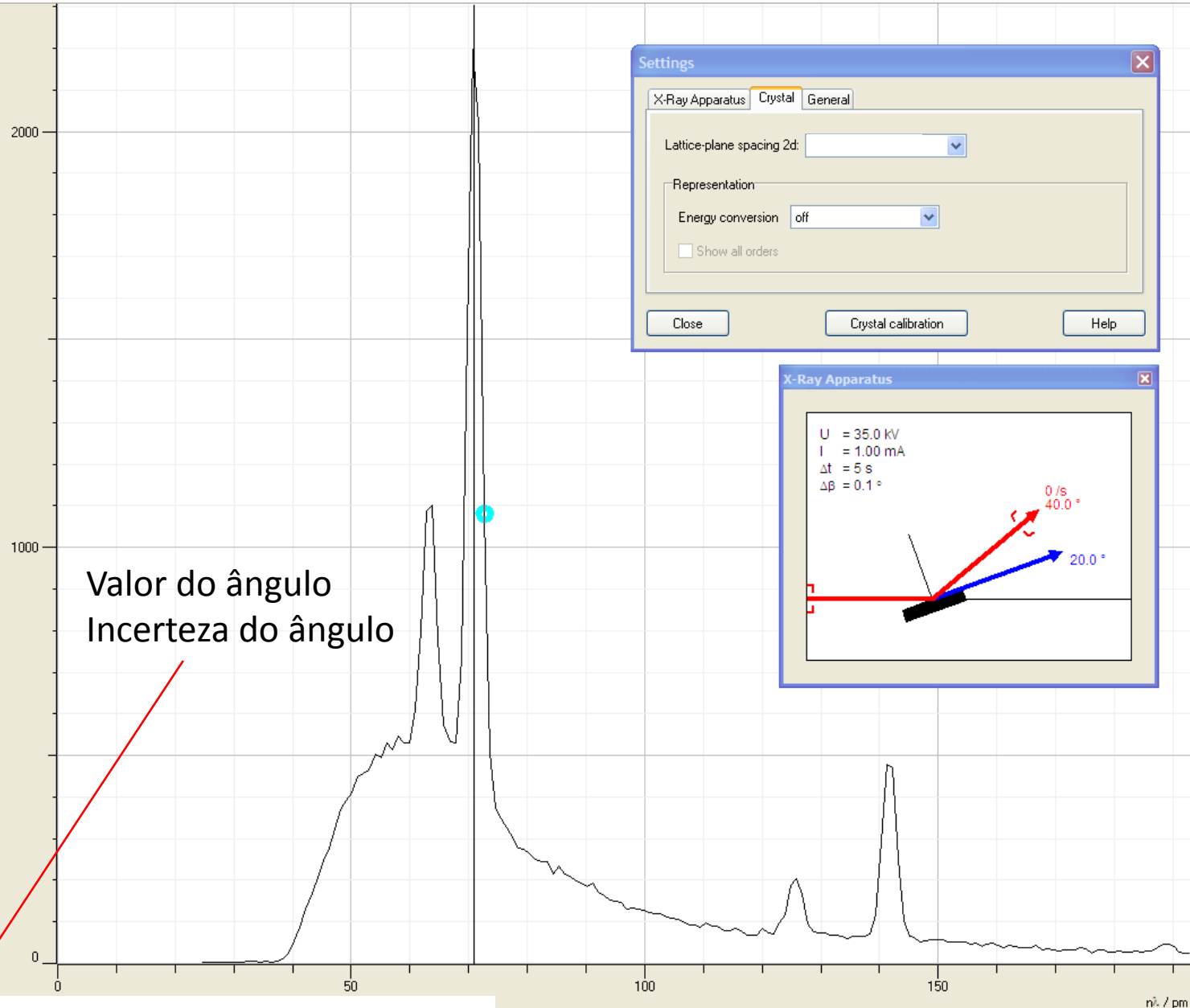


Figura 6 – Exibindo os pontos medidos

Bragg Planck Transmission Moseley

n_i / pm	R_0 / 1/s
26.6	2.8
27.6	3.0
28.5	3.2
29.5	1.8
30.5	2.8
31.5	3.6
32.5	5.6
33.4	4.4
34.4	4.0
35.4	6.0
36.4	4.0
37.4	6.6
38.4	10.2
39.3	24.4
40.3	55.2
41.3	85.8
42.3	131.4
43.3	168.4
44.3	205.4
45.2	247.8
46.2	278.0
47.2	324.8
48.2	369.4
49.2	391.6
50.1	410.6
51.1	449.0
52.1	457.2
53.1	465.4
54.1	502.8
55.0	495.2
56.0	529.6
57.0	514.8
58.0	546.0
59.0	531.6
59.9	529.4
60.9	608.2
61.9	798.6
62.9	1086.4
63.8	1100.0
64.8	779.4
65.8	574.4
66.8	533.8
67.8	529.4
68.7	734.4
69.7	1514.0
70.7	2196.2
71.7	2016.8
72.6	1081.2
73.6	594.6



Valor do ângulo
Incerteza do ângulo

Settings

X-Ray Apparatus **Crystal** General

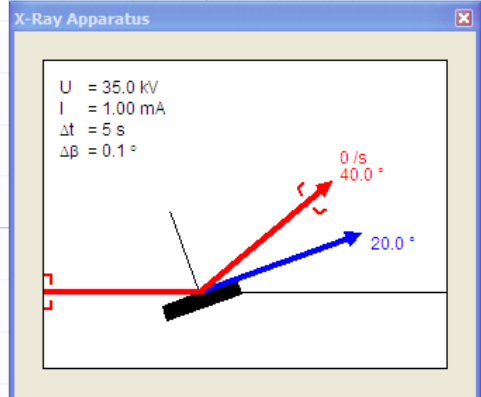
Lattice-plane spacing 2d:

Representation

Energy conversion

Show all orders

Close Crystal calibration Help



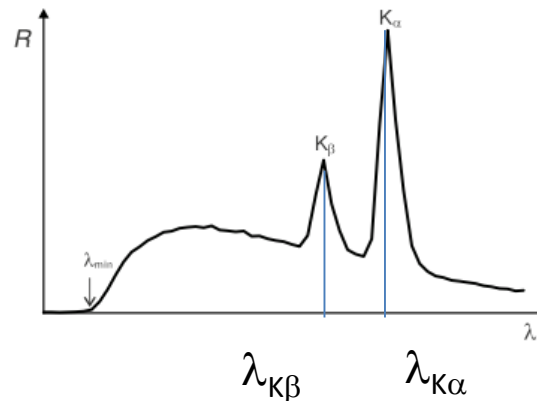
$n_i = 70.93$ pm, $\sigma = 1.01$ pm

Esses são os valores de θ e $\Delta\theta$

Valores dos comprimentos de onda das transições K do Mo

	$\frac{E}{\text{keV}}$	$\frac{\nu}{\text{EHz}}$	$\frac{\lambda}{\text{pm}}$
K_{α}	17.443	4.2264	71.080
K_{β}	19.651	4.8287	63.095

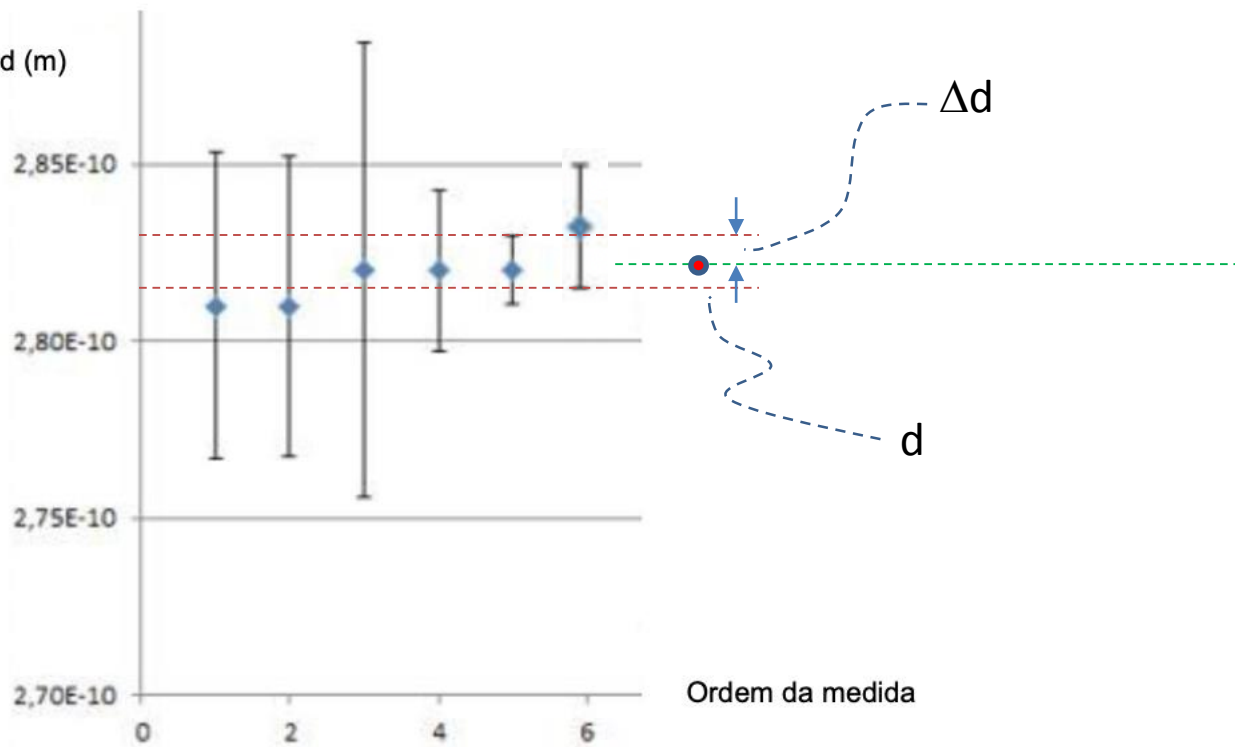
$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}$, $\text{EHz} = 10^{18} \text{ Hz}$, $\text{pm} = 10^{-12} \text{ m}$



Cálculos

- **Cálculo da distância interatômica d**
 - Para cada valor do ângulo θ determinado (respectivamente, para K_α e K_β) pode ser calculado o valor de d , usando a lei de Bragg
 - Lei de Bragg: $n\lambda = 2 \cdot d \sin(\theta)$
- Os *dois valores* de d precisam ser comparados
 - Para isso, vai precisar das **incertezas** nos valores dos ângulos θ
 - Elas *precisam ser propagadas* para os valores de d
 - Usar o método de propagação de intertezas apresentado no link
 - [Propagação de erros](https://jkogler.wordpress.com/2008/03/18/hello-world/) <https://jkogler.wordpress.com/2008/03/18/hello-world/>
 - Você tem de **deduzir a expressão** de Δd a partir da de $\Delta \theta$
 - Deve apresentar sua dedução em seu relatório
 - De posse da formula que assim deduzir, poderá calcular os respectivos valores de $d + \Delta d$
 - **Cuidado: precisa converter a incerteza $\Delta \theta$ para radianos !!**

Distância
interatômica d (m)

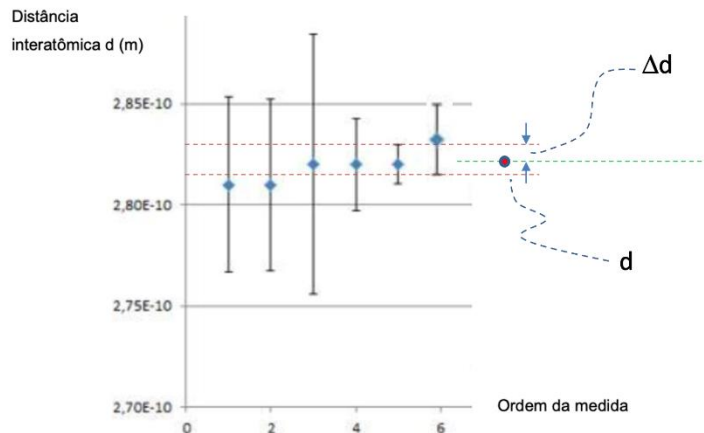


Após a tomada de dados, realizar as etapas de determinação dos ângulos θ para os quais ocorrem os picos K_α e K_β , com suas respectivas incertezas.

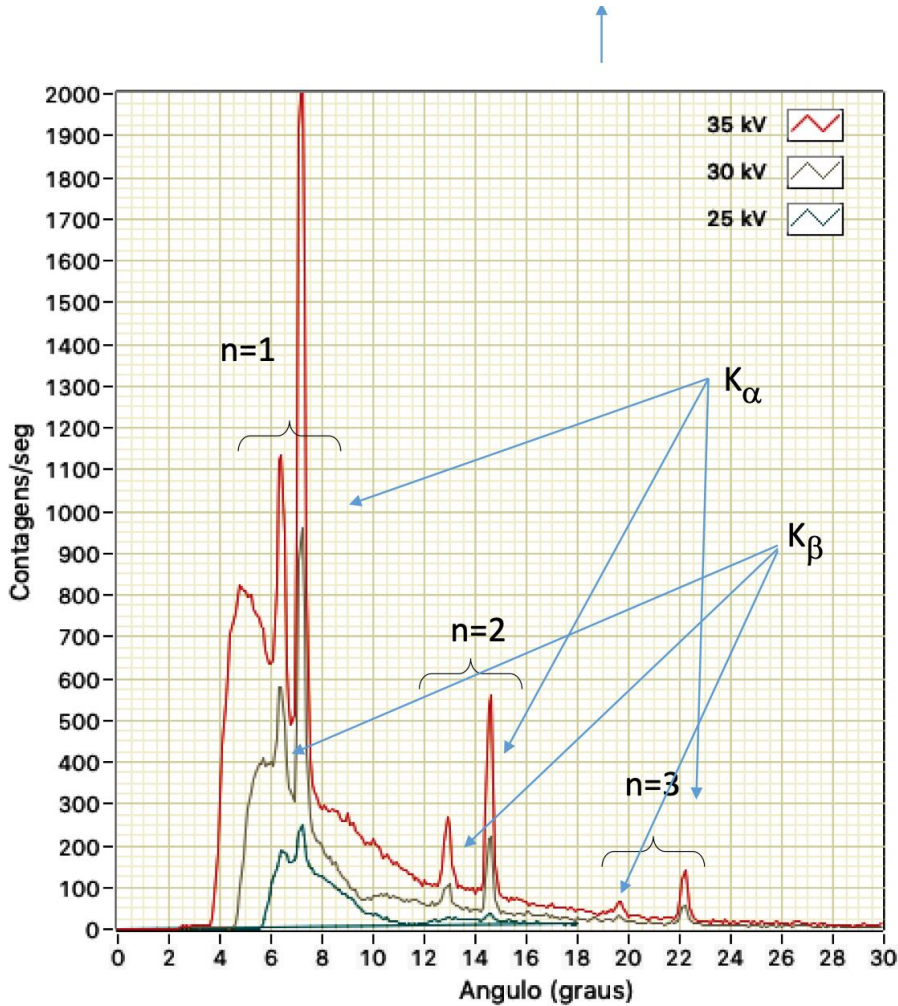
Análises da difração de Bragg

1. Determinar os centros dos picos
2. Determinar as incertezas dos centros
3. Calcular os valores da distância interatômica d usando a lei de Bragg
4. Calcular os valores das incertezas Δd com a expressão que você deduziu

O cálculo do valor da distância interatômica d empregando a lei de Bragg $n\lambda = 2 \cdot d \sin(\theta)$ para K_α e K_β , usando os respectivos valores de θ encontrados para cada caso podem ser feitos aqui no Lab. Os cálculos das incertezas em d podem ser feitos em casa



Sumário da parte 1 da análise de dados



Obter picos e desvios para tensões de 35, 30 e 25 kV

Tensao: 35 kV	Pico: 22,20	Desvio: 0,20
Tensao: 30 kV	Pico: 22,16	Desvio: 0,18
Tensao: 25 kV	Pico: 22,16	Desvio: 0,16
Tensao: 30 kV	Pico: 6,46	Desvio: 0,24
Tensao: 30 kV	Pico: 7,19	Desvio: 0,16
Tensao: 35 kV	Pico: 12,90	Desvio: 0,22
Tensao: 35 kV	Pico: 14,56	Desvio: 0,16

K_{α} : Wavelength = 0.0711 nm

K_{β} : Wavelength = 0.0632 nm

θ
graus

$\Delta\theta$
graus

radianos

Para cada pico
Calcular d:
 $d = n \lambda / 2 \sin(\theta)$

Roteiro de
Análise

Deduzir fórmula de
 Δd a partir de $\Delta\theta$

Para cada pico:
calcular Δd a
partir de $\Delta\theta$

<https://jkogler.wordpress.com/2008/03/18/hello-world/>

Resultado: 12 a 18 valores de $d \pm \Delta d$

Intersecção dos 12 a 18 intervalos **Resultado final de $d \pm \Delta d$**

Análise dos dados

Feita com auxílio do programa
X ray apparatus

Parte 2 - Determinação da constante de Planck

1. Determinar os λ_c de corte
2. Fazer o gráfico de U em função de $1/\lambda_c$
3. Determinar o coeficiente da regressão linear
 4. Calcular a constante de Planck
 5. Comparar com o valor conhecido

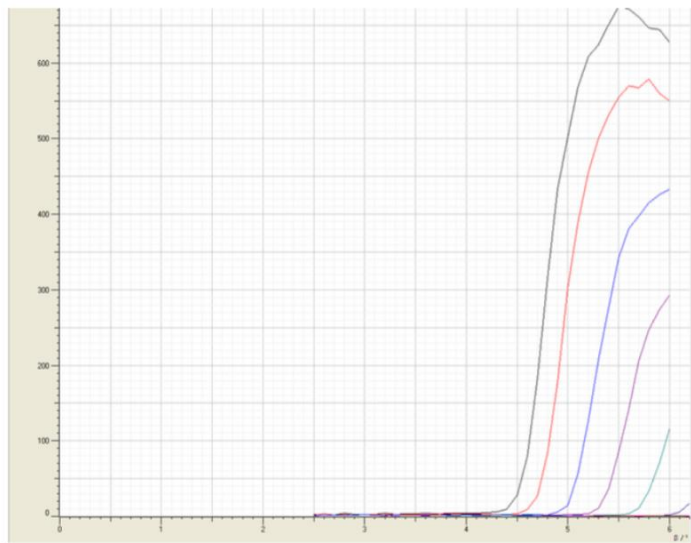


Figura 5 – Curvas de espectro de bremsstrahlung

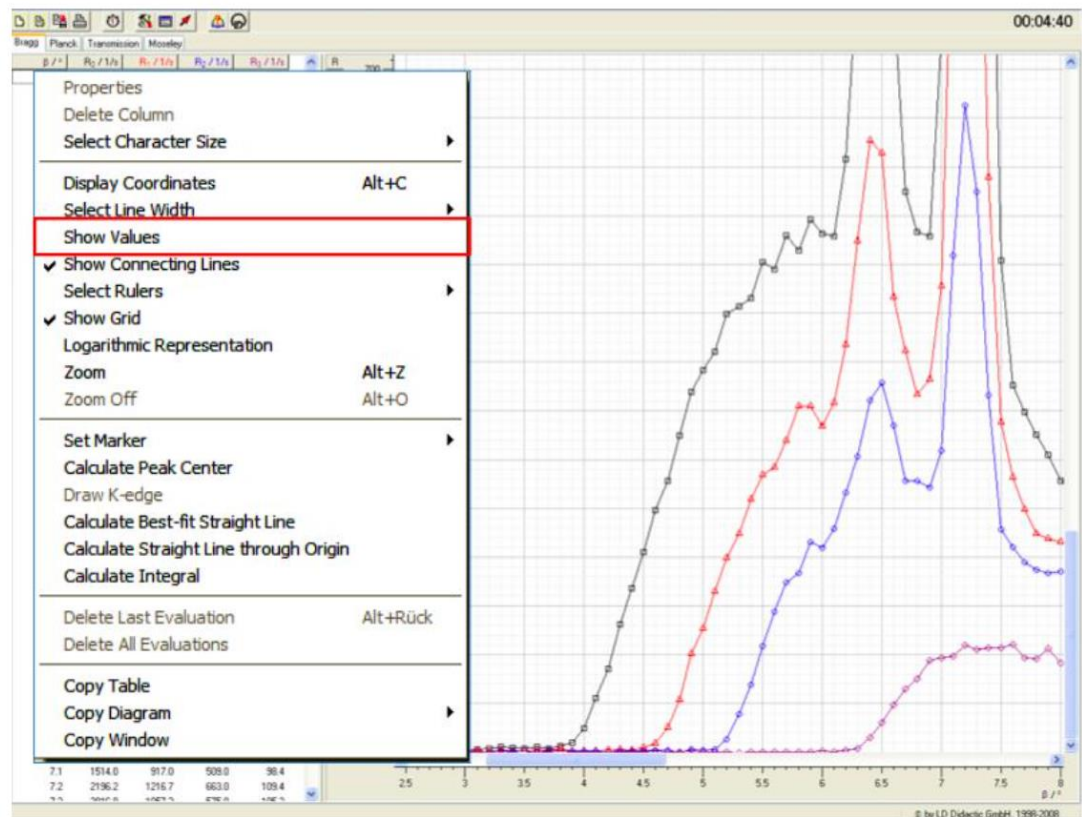
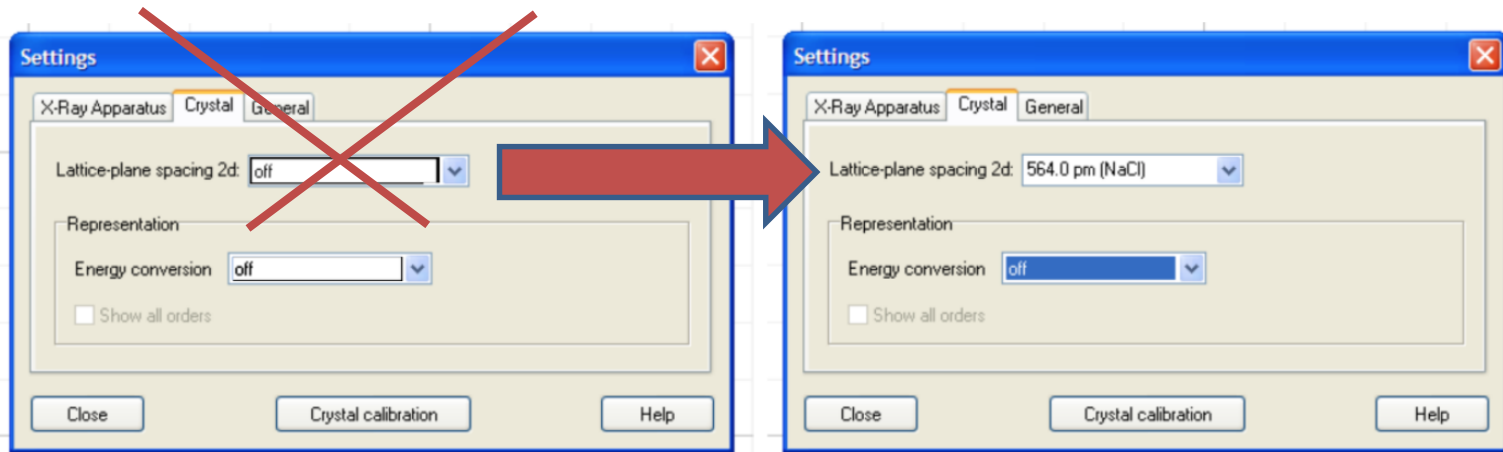


Figura 6 – Exibindo os pontos medidos

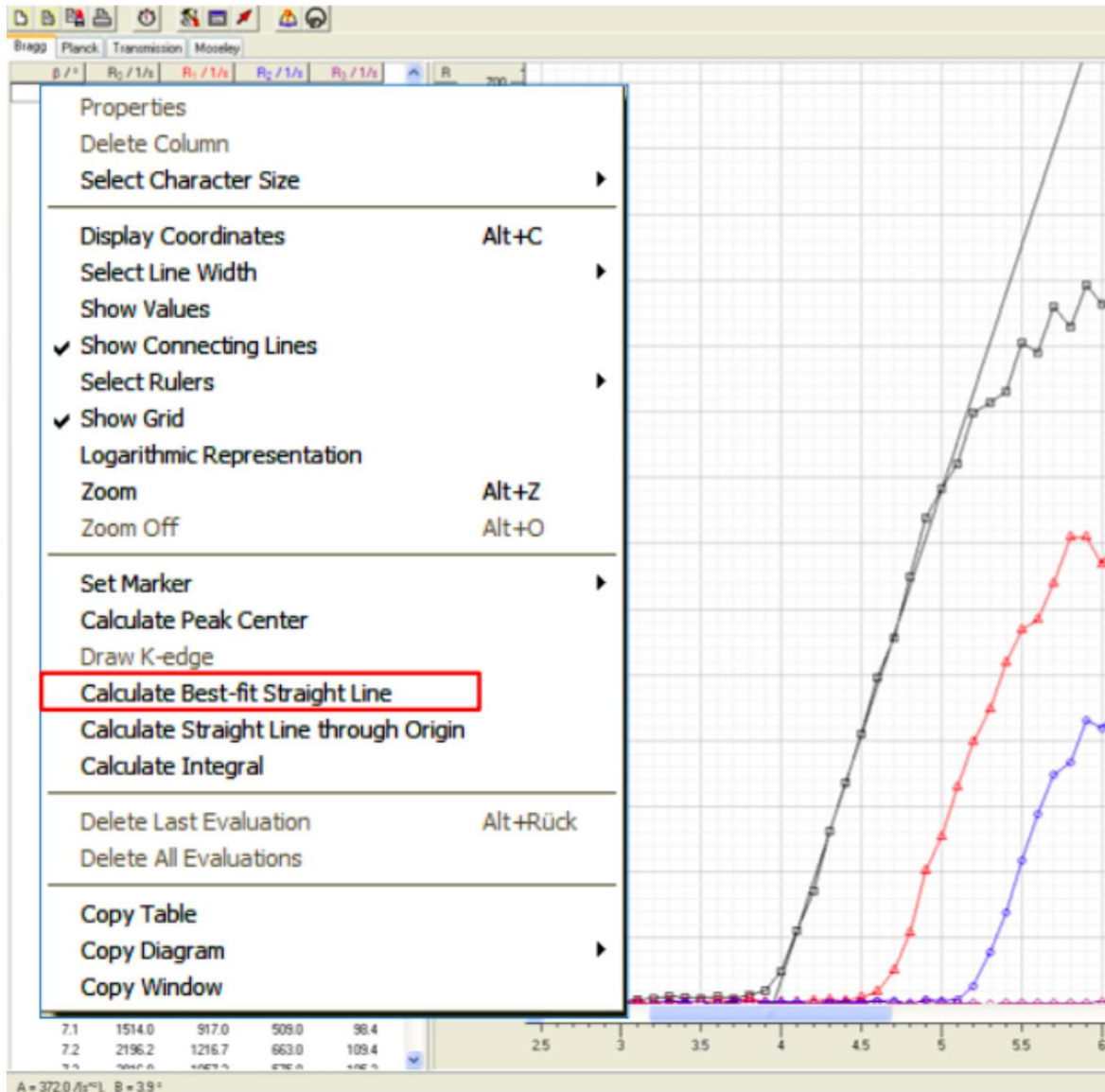
Voltar à configuração para Planck



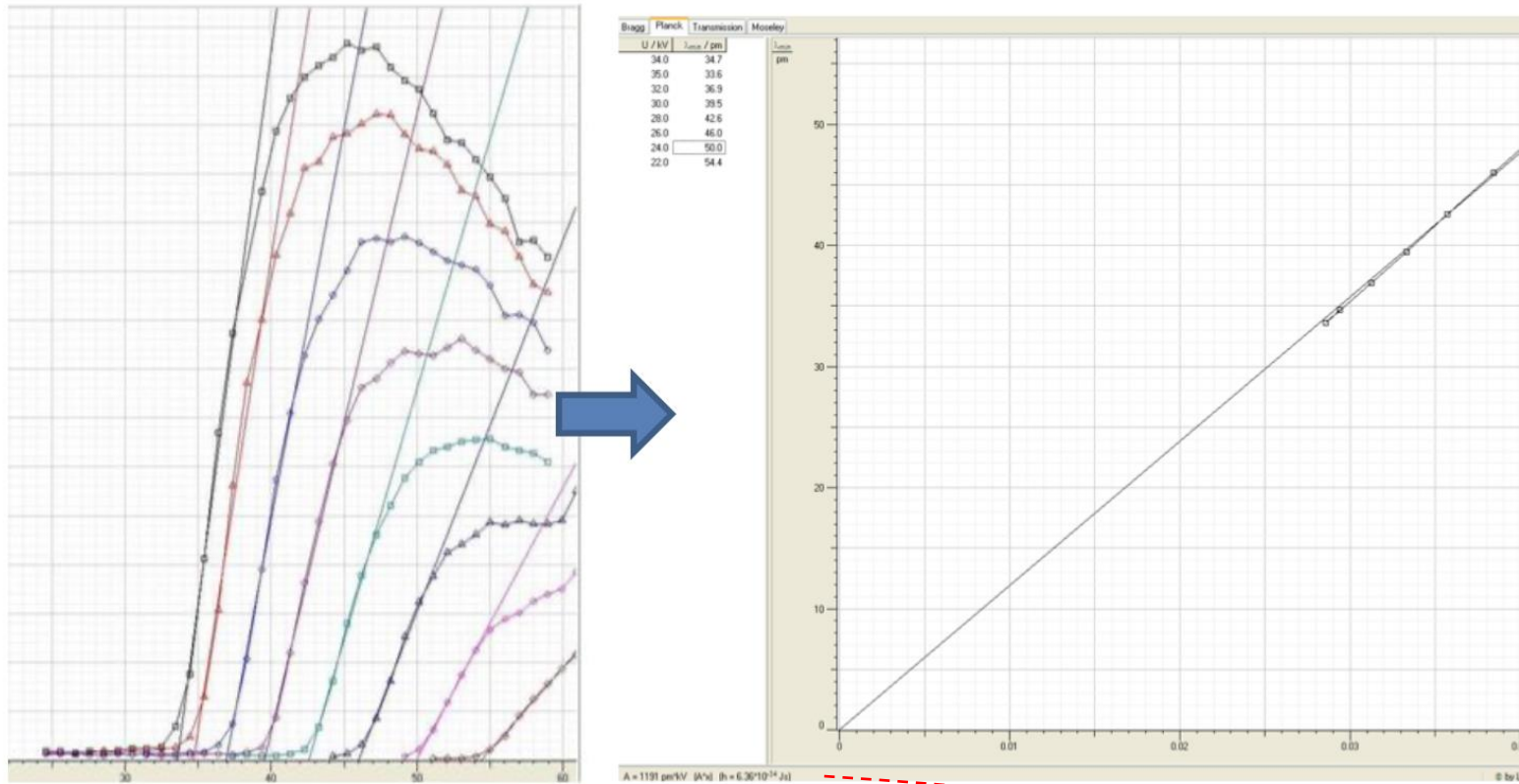
(a)

(b)

Configurações do painel *Settings* para cada experimento. (a) Configuração usada no primeiro experimento (difração de Bragg). As duas caixas devem ficar em off. (b) Configuração usada no segundo experimento (determinação de h). Informar o valor de d na caixa de cima e a outra deixar em off.



Para cada curva, deverá ajustar por regressão linear uma reta que modela aproximadamente a subida do espectro de bremsstrahlung para valores de comprimento de onda próximos ao corte. Isso é feito selecionando-se no menu com clique-direito a opção Calculate best-fit straight line, conforme mostrado na figura ao lado



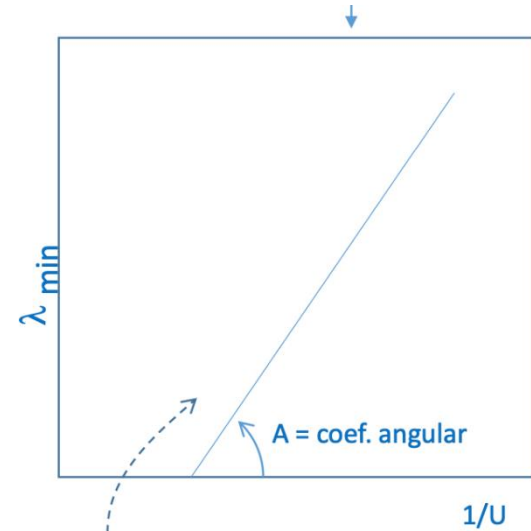
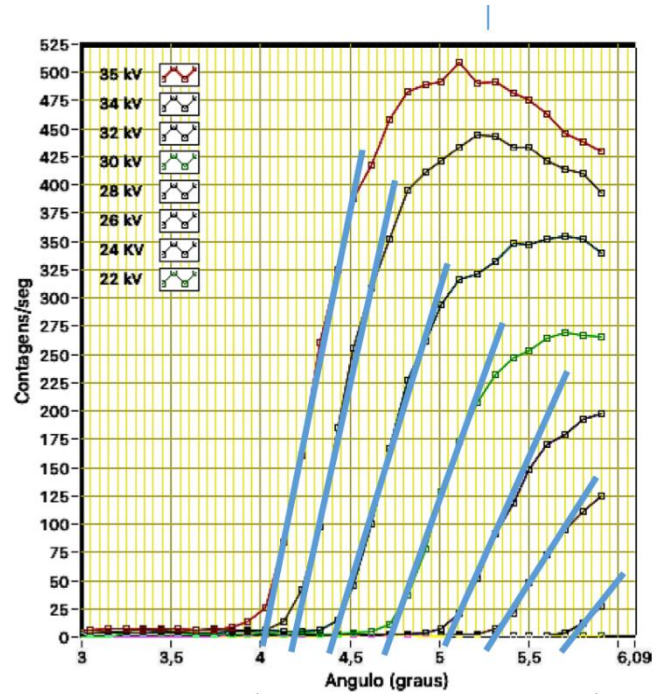
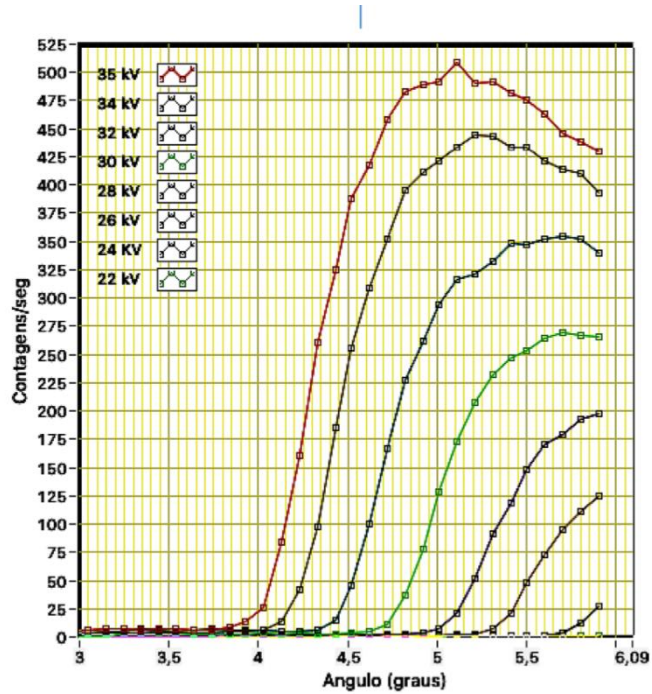
(a)

(b)

Ao terminar o procedimento para todas curvas de Bremsstrahlung, conforme mostrado na fig. a, **clique na aba Planck** e observará que todos os valores de frequência de corte e das correspondentes tensões de aceleração já foram transferidos (fig. b) para o programa que ajusta a relação de Duane-Hunt e fornece o valor do coeficiente angular da reta, com o qual poderá calcular a constante de Planck e comparar com valores tabelados.


A = 1191 pm²/kV (A²) (h = 6.36*10⁻³⁴ Js)

Sumário da parte 2 da análise de dados



Lei de
Duane
Hunt

Calcular
constante
de Planck



*Quaisquer dúvidas,
perguntem! Boa sorte!*

Universidade de São Paulo
Instituto de Física
Laboratório de Física Moderna

Disciplina: Física Experimental C - 4323301
Coordenador: José Helder Facundo Severo

Experimento: Difração de Raio-X
Edição 2020 – EAD

Autor: João Eduardo Kogler Jr.
Escola Politécnica da USP
Departamento de Sistemas Eletrônicos
kogler@lsi.usp.br

Apresentação– versão 2023 Semestral