

# Física Experimental IV

[www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex](http://www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex)

[www.fap.if.usp.br/~hbarbosa](http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa)

Prof. Antonio Domingues dos Santos

[adsantos@if.usp.br](mailto:adsantos@if.usp.br)

Ramal: 6886

Mário Schemberg, sala 205

Prof. Leandro Barbosa

[lbarbosa@if.usp.br](mailto:lbarbosa@if.usp.br)

Ramal: 7157

Ala I, sala 225

## Aula 1 – Computador Óptico Ótica Geométrica: Lentes

Prof. Henrique Barbosa

**(coordenador)**

[hbarbosa@if.usp.br](mailto:hbarbosa@if.usp.br)

Ramal: 6647

Basílio, sala 100

Prof. Nelson Carlin

[carlin@dfn.if.usp.br](mailto:carlin@dfn.if.usp.br)

Ramal: 6820

Pelletron

Prof. Paulo Artaxo

[artaxo@if.usp.br](mailto:artaxo@if.usp.br)

Ramal: 7016

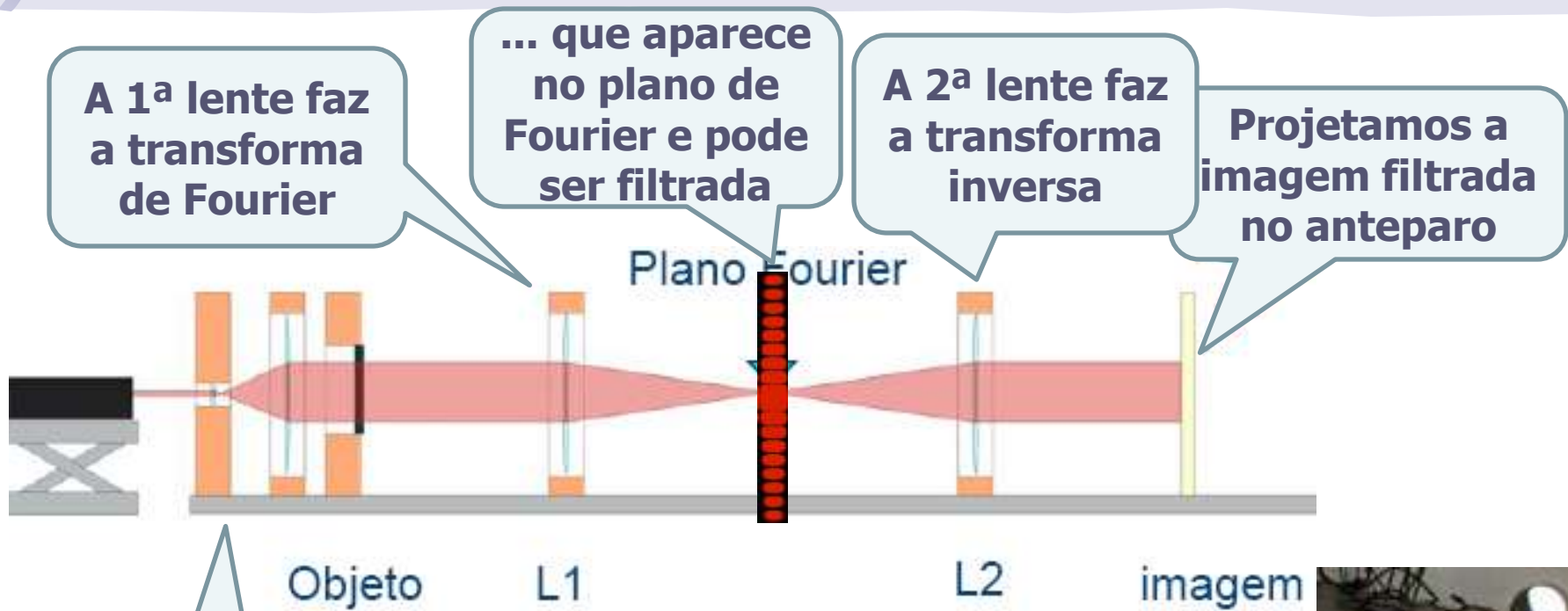
Basílio, sala 101

# Computador ótico

- **Computador ótico** é um dispositivo que permite a manipulação de imagem de maneira controlada sem a necessidade de efetuar cálculos complicados.
- Esse dispositivo pode e vai ser construído e estudado no laboratório e vamos, nas próximas aulas, discutir como fazê-lo em detalhe.



# Como funciona?



o laser ilumina o objeto

**COMPUTADOR ÓTICO**



# Programação da Exp. 2

- Aula 1: óptica geométrica
  - Medidas com lentes convergente e divergente
- Aula 2: laser
  - Associação de lentes e aumento do diâmetro do laser
- Aula 3: difração
  - Figuras de difração e espectrofotômetro
- Aula 4: transformada de fourier
  - Estudo no plano de fourier
- Aula 5: computador ótico
  - Filtro na transformada de Fourier e recompor a imagem filtrada
- Aula 6: ImageJ
  - Tratamento de imagem no computador

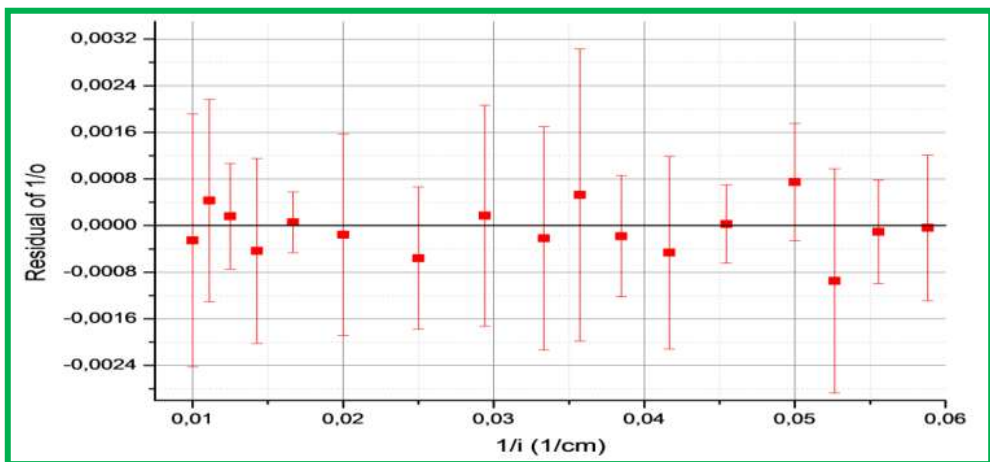
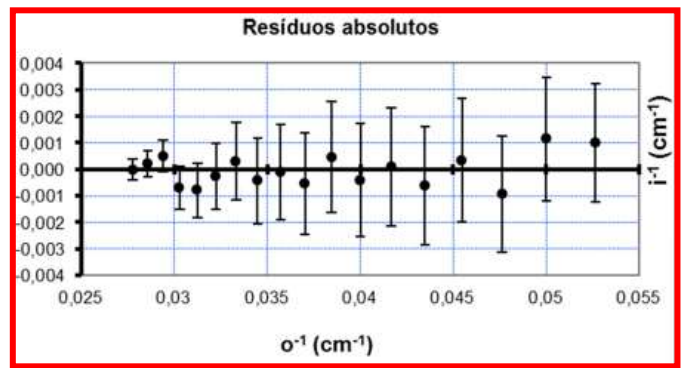
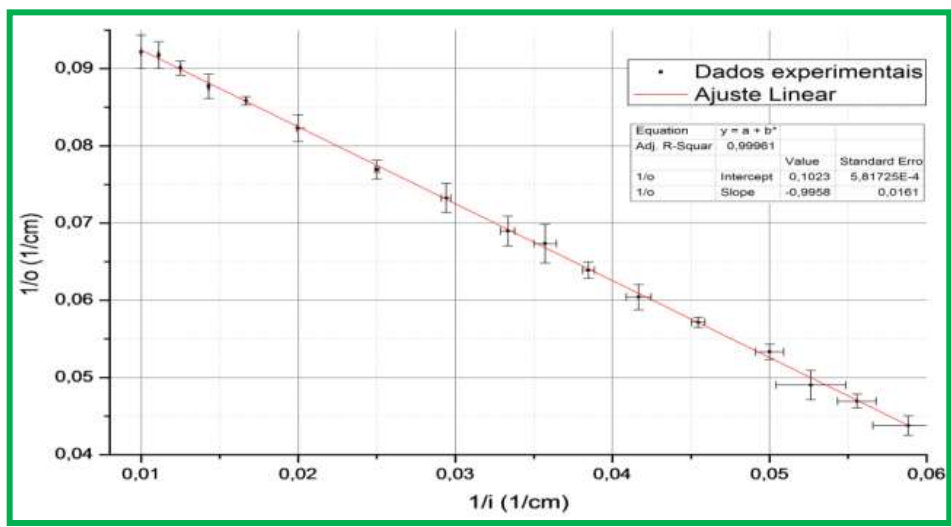
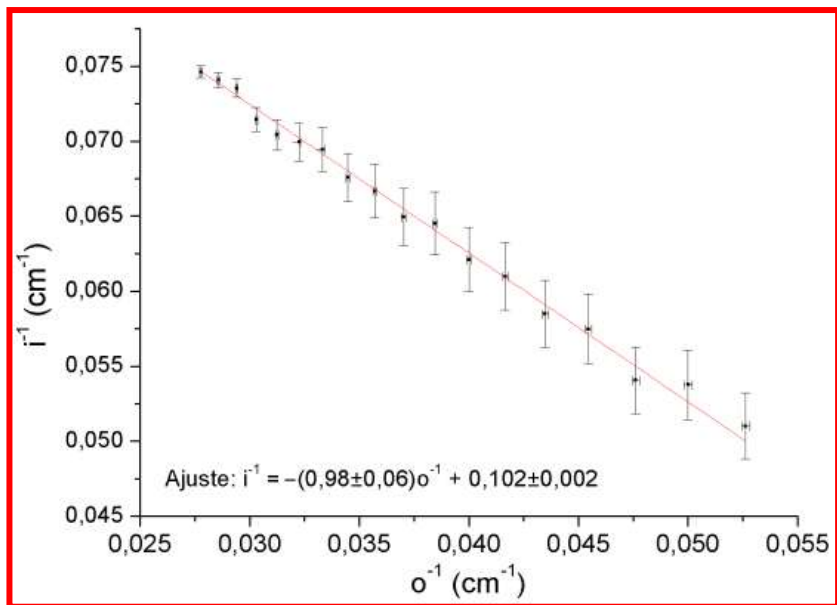
# Tarefas 1: para a síntese

- Medir a distância focal de uma lente convergente
  - Estabeleça um procedimento experimental para efetuar as medidas e obter  $f$  com incerteza de alguns mm.
    - DICA: é possível fazer com a lei gauss, mas você também poderia usar um laser ou projetar um objeto distante.
  - Tome os dados necessários e obtenha as distâncias focais correspondentes
    - mostre o gráfico, o ajuste, etc...
  - Analise os resíduos (mostre o gráfico) e discuta a qualidade do ajuste
    - Discuta os prós e contras do método proposto

# Para pensar...

- Existem várias maneiras de fazer a medida proposta, mas todas envolvem medidas de distância: objeto, imagem, lente, etc...
- Para o método de vocês:
  - Como estimar os erros nas posições?
    - os erros são todos iguais?
  - Os erros são independentes?
  - A distribuição da incerteza é gaussiana?

# Resultados



# Problemas 1

1. A lei de Gauss é válida também para lente espessa
2. Ao procurar pelo foco mexendo na posição da lente, a distância do objeto e da imagem estão correlacionados!!!
3. O erro na posição não pode ser 1 mm. Qual a precisão no seu julgamento visual para a focalização da imagem??

Considerando a **exopessura** da lente desprezível, a equação que relaciona a posição da distância focal  $f$ , a posição do objeto  $p$  e da imagem  $q$ , em relação à lente é

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (1)$$

Se fixarmos a distância entre o objeto e a imagem, isto é,  $p + q = D$  e deslocarmos a posição da lente em  $L$ , podemos encontrar uma segunda organização dos componentes com imagem correspondente ao foco. desta forma, a nova posição  $p' = p + L$  e  $q' = q - L$ , onde  $L$  é o deslocamento da lente. Aplicando as novas posições em (1), obtemos novamente o valor de  $f$ .

Para se determinar estes valores, medimos a posição da lanterna geradora de imagem, do anteparo e da lente convergente entre ambos. Os componentes estavam em um trilho, com trena paralela para medição da posição. A incerteza em cada posição pode-se considerar em **1mm**. Logo, a incerteza na posição de cada componente é  $\sqrt{2}mm$ .

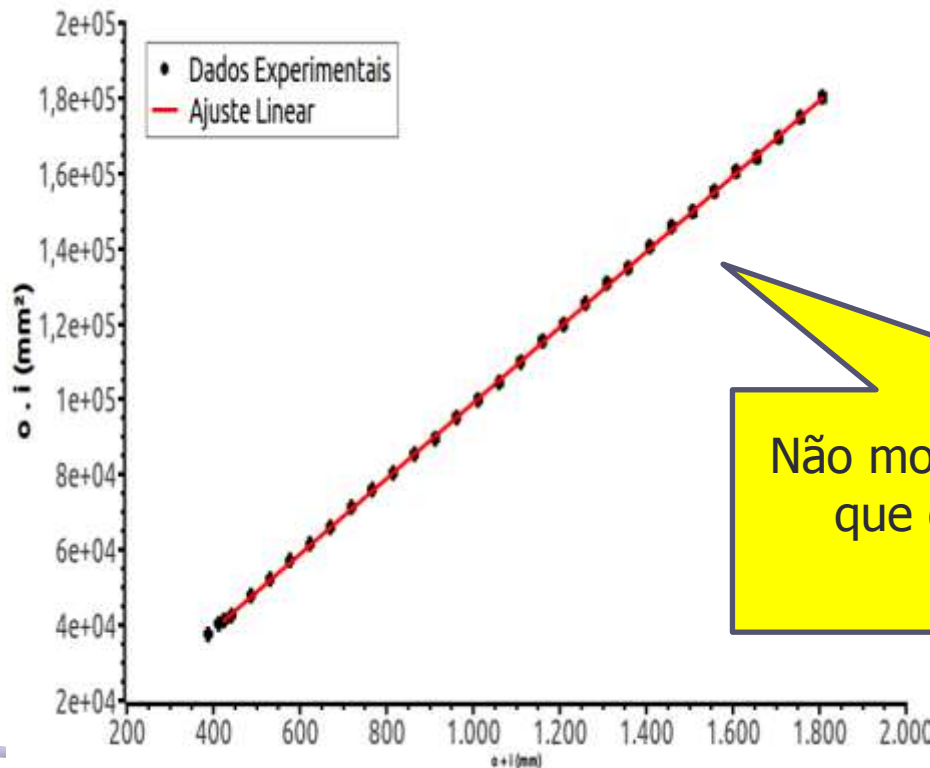


# Problemas 2

O segundo, que foi utilizado, foi através lei de gauss, medindo as distancias  $i$  e  $o$ . Como sabemos, a lei de Gauss é:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \quad (1)$$

então foram tomados diversos valores de  $i$  e  $o$  e ajustada uma função linear do tipo  $y = Ax + B$  em que  $A = f = \frac{i \cdot o}{i + o}$  e  $B = 0$ .



- Este outro grupo ajustou uma reta no gráfico de  $i \cdot o$  X  $i + o$

Não mostram as incertezas em X e Y, que obviamente também estão correlacionadas!

# Convergente

**10.5cm**

	R (cm)	D (mm)	F exp (cm)	N (ind. refra.)
H01				
H02	10.0 (1)	8.588 (5)	10.08 (20)	
H03			9.86 (3)	
H04			0,0978 (15) [sem unid]	
H05	10.0 (1)	7.840 (5)	Delg=9.75 (2) Esp=9.67 (2)	1.51 (2)
H06			9.76 (6)	
H07	10.0 (1)	8.38 (1)	9.8 (2)	1.509 (5)
H08				
H09	1.00 (1)	8.60 (1)		

f~R pela eq.  
do fabricante

# Tarefas 2: para o relatório

- Você pode garantir que a aproximação de lente delgada é válida para esta lente?
  - **DICA:** considerando uma lente espessa, calcule a posição dos planos principais e estime o erro que você cometeu ao medir  $i$  e  $o$  na aproximação de lente delgada (em relação ao centro).
    - Que tipo de erro é este?
    - Seus dados permitem você perceber esta diferença?
- Calcule o índice de refração da lente
  - **DICA:** meça as dimensões da lente usando: medidor de raio de curvatura (**cuidado, só temos um!**), micrômetro e paquímetro.
  - Discuta se sua aproximação de lente delgada tem influência na determinação deste valor


# Tentativa 1

também o raio de curvatura da lente e encontramos um  $R=100(1)$  mm. ok

**Tabela 1:** V2-V1 representa a espessura da lente em seu centro e  $f$  a distância focal considerando-a como lente delgada. V1 foi tomado como posição zero.

Grandezas	Posição mm	$\sigma$ mm
V2-V1	8,38	0,01
Espessura borda	2,61	0,01
H1	2,89	0,01
H2	2,89	0,01
f	98	2

qual o erro sistemático?



Da equação 2 calculamos o índice de refração  $n$  da lente, desconsiderando o segundo termo do segundo membro já que a lente foi suposta delgada e supondo  $R_1=R_2$ . Encontramos o valor  $n=1,509(5)$ .

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] - \frac{(n-1)^2}{n} \left[ \frac{t}{R_1 R_2} \right] \quad (2)$$

# Problema

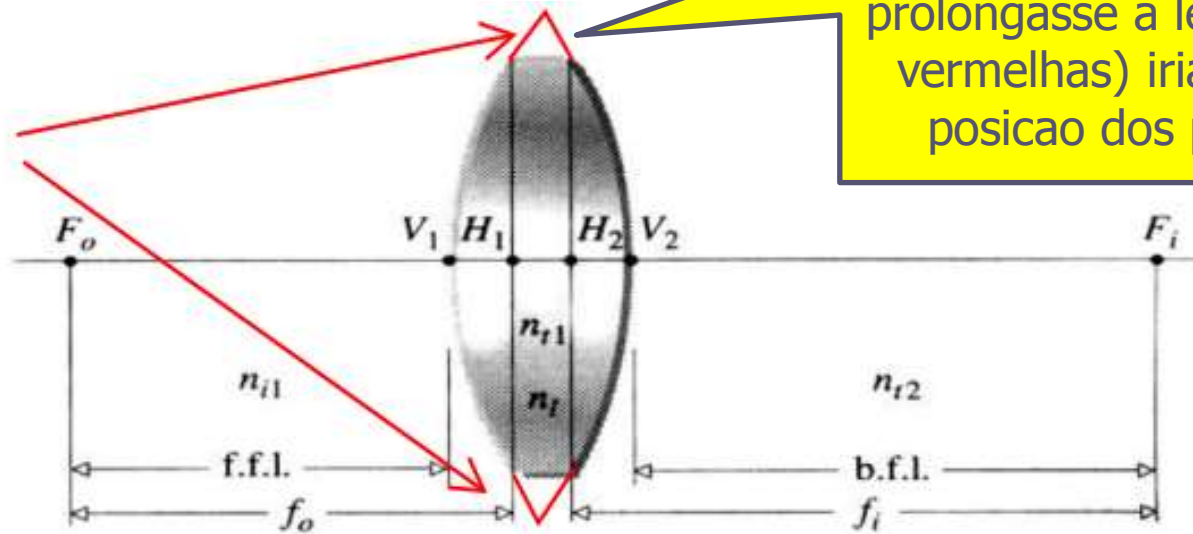


imagem que a gente prolongasse a lente (linhas vermelhas) iria mudar a posição dos planos??

Figura 2: Exemplo de lente convergente similar à utilizada neste experimento.

Consideramos que a lente fosse simétrica ao longo da direção mostrada na figura 1. As incertezas de leitura nas três primeiras medidas da tabela 1 foram extraídas do micrômetro. Para calcular a posição de  $H_1$  e  $H_2$  subtraímos da espessura a posição da espessura da borda e dividimos o valor encontrado por 2. Medimos também o raio de curvatura da lente e encontramos um  $R=100(1)$  mm.  ok

os planos principais estão onde os raios aparentam fazer a curva...

# Análise da eq. do fabricante

Era possível decidir se a lente era delgada ou não apenas observando a equação do fabricante.

Mesmo sem saber qual o índice de refração, o erro relativo em desprezar o último termo é  $< 1\%$

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] - \left[ \frac{(n - 1)^2}{n} \right] \left( \frac{t}{R_1 R_2} \right)$$

	[mm]		[mm]	[mm]	%
<b>r1</b>	255	<b>n</b>	<b>f_del</b>	<b>f_esp</b>	<b>ERRO</b>
<b>r2</b>	255	1.1	1275.0	1276.2	-0.09%
<b>t</b>	5.113	1.5	255.00	255.86	-0.33%
		2.0	127.50	128.14	-0.50%
		2.5	85.000	85.514	-0.60%
		5.0	31.875	32.133	-0.80%
		10.0	14.167	14.296	-0.90%
		15.0	9.1071	9.1932	-0.94%
		50.0	2.6020	2.6279	-0.98%

# Análise dos planos principais

- Outra maneira de determinar se a lente era delgada ou não era corrigir o pior erro sistemático possível:

$$R_1 = R_2 \Rightarrow P_1 = P_2 = (n-1)/R$$

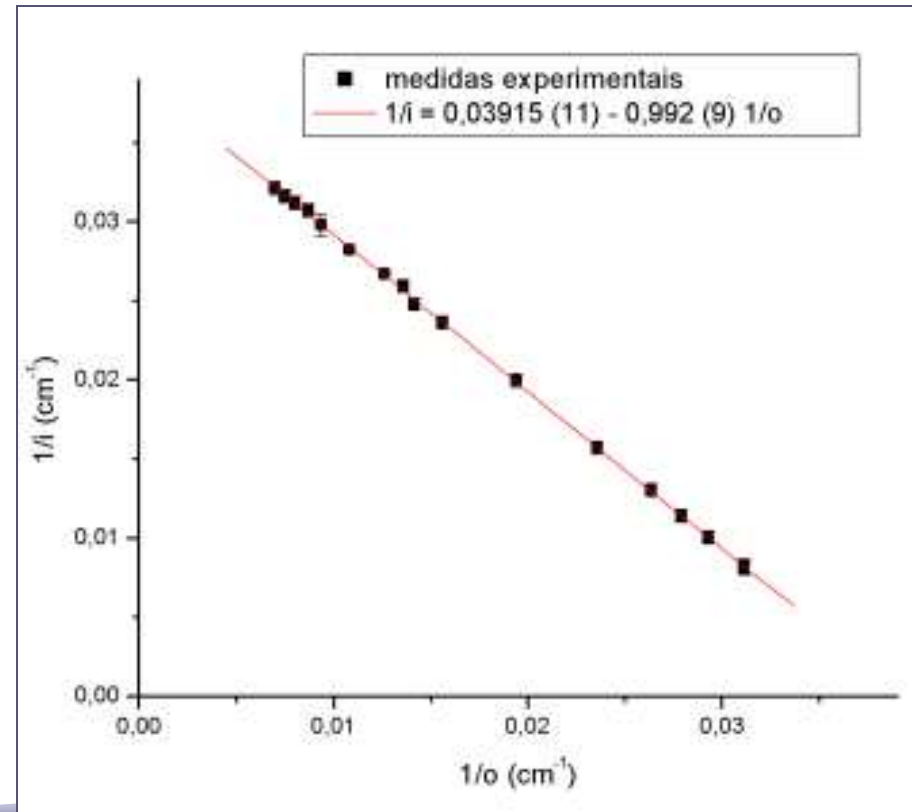
$$h_1 = h_2 = \frac{t}{n \left( 2 - \frac{t}{R} \frac{n-1}{n} \right)}$$

Mesmo sem conhecer o índice de refração, sabemos que o pior erro em **i** e **o** é metade da espessura da lente!

Limites:  $\begin{cases} n \rightarrow 1 \Rightarrow h \rightarrow t/2 & \text{h está no centro (delgada)} \\ n \rightarrow \infty \Rightarrow h \rightarrow 0 & \text{h está na borda (espessa)} \end{cases}$

# A lente é delgada??

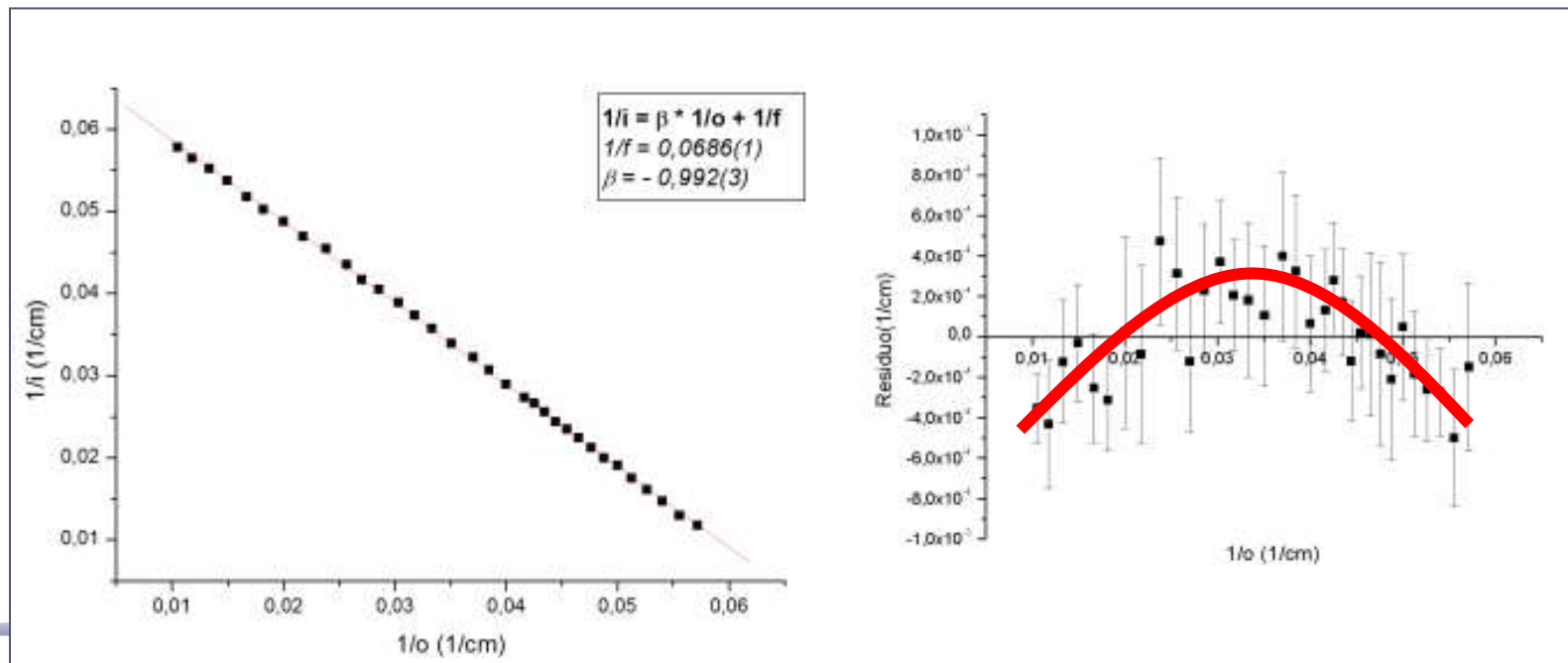
- Ou seja, o ajuste linear poderia ser feito com e sem uma correção de  $t/2$  nos valores de  $i$  e  $o$ ...
- Ao comparar os dois focos encontrados, vocês perceberiam que a diferença é menor que o erro experimental





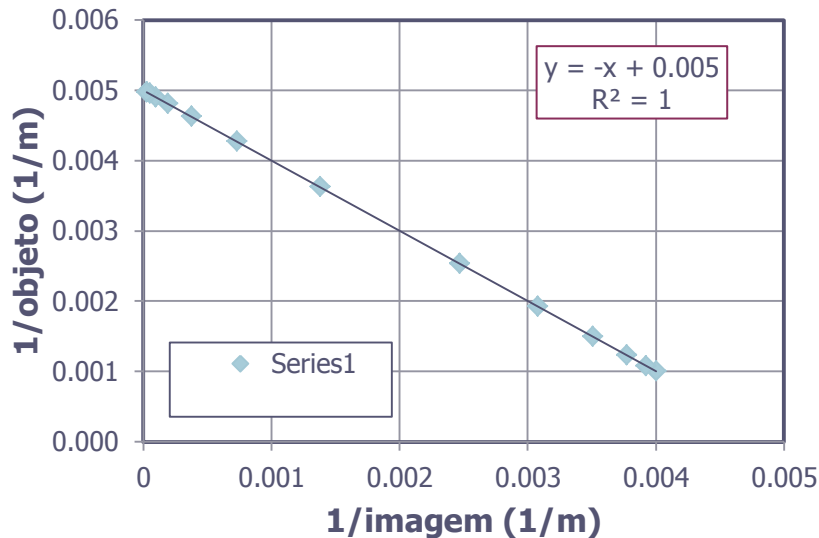
# Correção dos planos principais

Em 2009, um grupo fez medidas precisas que mostram que o ajuste linear não é bom (apesar dizerem que era).... A tendência nos resíduos mostrava que era preciso corrigir a posição dos planos principais.

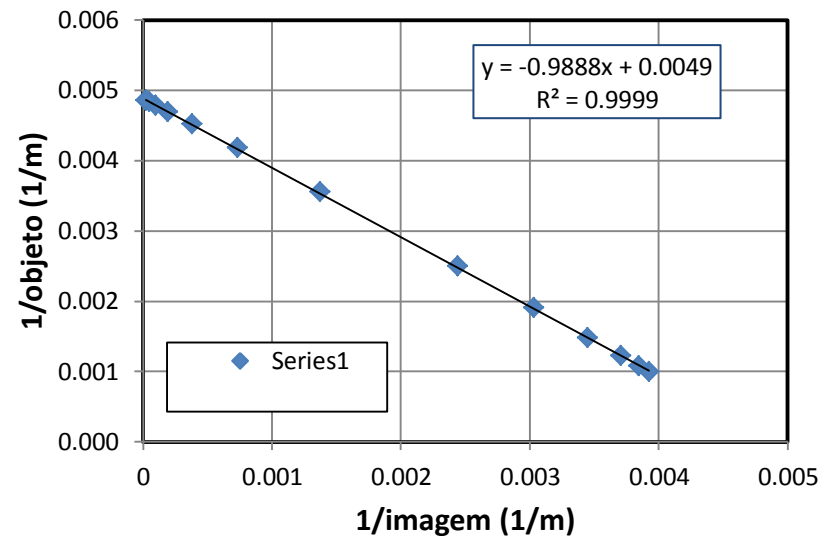


# Simulação (f=200mm)

Medida correta a partir do plano principal

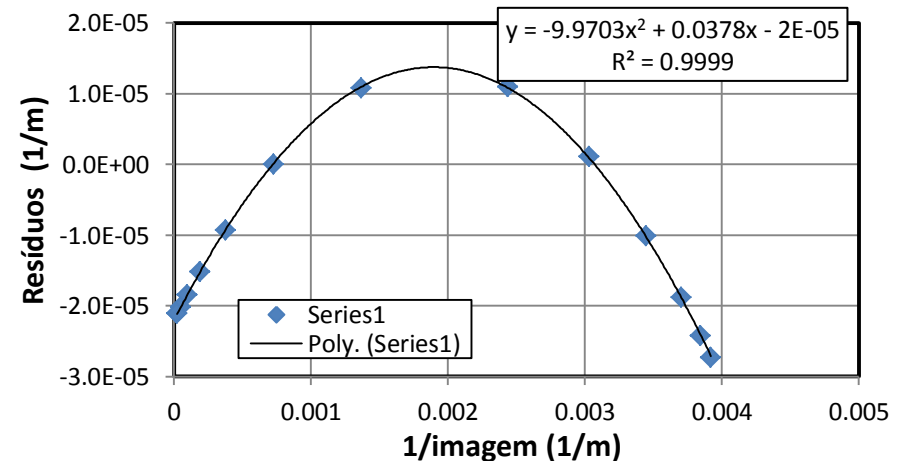


Erro sistemático de +5mm em  $i$  e  $o$



$f$  (sem erro) =  $1/0.005 = 200\text{mm}$   
 $f$  (erro) =  $1/0.0049 = 204\text{mm}$

Erro sistemático em  $i$  e  $o$  implica em resíduos como uma parábola



# Tentativa 2

Espessura da lente:  $t=7,840(5)$  mm (medida com micrômetro)

Raio de curvatura:  $R=10,0(1)$  cm (verificou-se que  $R_1 = R_2$ )

Pela equação do fabricante para lentes delgadas, com  $R_1 = R_2 = R$ , obtemos

$$\frac{1}{f_{del}} = \frac{(n-1)}{2R}$$

Usando o valor de  $f_{del} = 9,75(2)$  cm encontrado no ajuste, obtemos uma estimativa para o índice de refração como sendo  $n = 1,51(2)$ , o que já era de se esperar devido ao material da lente ser de vidro.

- O valor de  $n=1.51(2)$  é uma estimativa inicial, pois foi obtido assumindo lente delgada.

# Problema

Supondo agora lente espessa, temos a equação dos planos principais

$$h_1 = h_2 = h = \frac{t}{n \left( 2 - \frac{t}{R} \right) + \frac{t}{R}}$$

ok, mas nao deve estar exatamente nesta posicao pois  $n \neq 1.51$

Substituindo  $t$  e  $R$  medidos e  $n$  estimado, obtemos que  $h \sim 0,26\text{cm}$ , logo o erro sistemático que cometemos por medir  $p$  e  $p'$  a partir do centro ao invés do plano principal é  $(t-2h)/2 \sim 0,13\text{cm}$ , que corresponde à metade da separação entre os planos principais. ok

Descontando esse erro sistemático nas medidas de  $p$  e  $p'$  e refazendo o ajuste, obtemos que  $f_{esp} = 9,67(2)\text{cm}$ . Levando em conta que  $f_{esp}$  é medida a partir do plano principal e  $f_{del}$  a partir do centro, se a hipótese de lente delgada for aceitável, esperamos ter uma relação  $f_{esp} = f_{del} - 0,13$ . Do fit, temos que  $f_{del} - 0,13 = 9,63(2)\text{cm}$ , que é compatível com o obtido para lente espessa, logo é plausível assumir que a lente é delgada.

- Para encontrar  $n$ :
  - precisaria repetir o processo até convergir
- Para delgada:
  - o argumento é que  $f_{del}$  e  $f_{esp}$  são compatíveis ( $z \sim 2.8$ )

# Tarefas 3: EXTRA

- Há problemas para se estimar o índice de refração sem assumir uma lente delgada:
  - Você não pode corrigir os valores de  $i$  e  $o$  porque não sabe o índice de refração...
  - Você não pode calcular o índice de refração porque  $f$  foi estimado assumindo lente delgada
- Discuta esta ambiguidade
- Proponha um método e calcule o índice de refração assumindo lente espessa.

# Tarefa 4: EXTRA

- A aproximação paraxial é válida para as condições da sua experiência?
  - DICA: você pode usar o programa RayTrace

