

Física Experimental IV

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=90535>

2º Semestre 2021

Exp. 1 - Ótica Geométrica
Atividade 3 – Lentes Espessas
Semana 3 - 2/Setembro

Prof. Henrique Barbosa

hbarbosa@if.usp.br

<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>

REVISÃO

Avisos

- Upload das sínteses: **Hxx_EXPy_ATz.pdf**
- As atividades da nossa sala, na maioria das vezes NÃO é idêntica as das outras turmas.
 - Então, usem sempre os meus slides como guia, e nunca o roteiro geral que está no site para todas as turmas.
- Grupo de discussão no eDisciplinas
- A presença é para os que estão presentes na aula!

Exp. 1 - Óptica Geométrica

- Objetivos
 - Estudar algumas características da óptica geométrica e construir imagens utilizando lentes simples e sistemas de lentes.

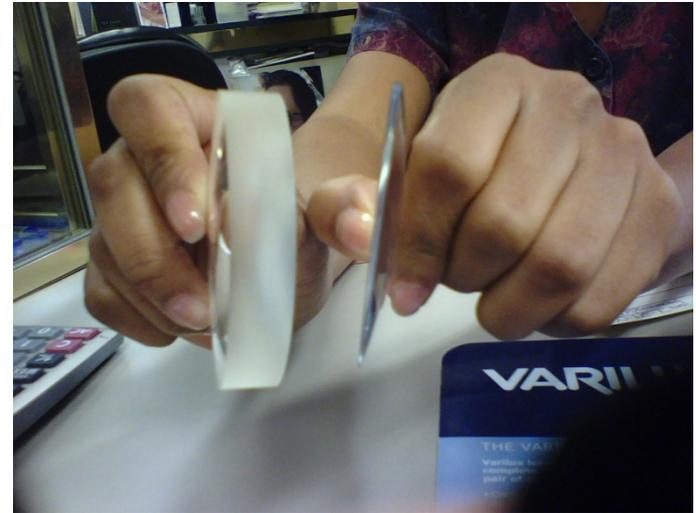
Cronograma

- 3 atividades:
 - **Atividade 1:** distância focal de uma lente
 - **Atividade 2:** associação de lentes
 - **Atividade 3:** aproximação da lente delgada

Tipos de Lentes: Dimensões

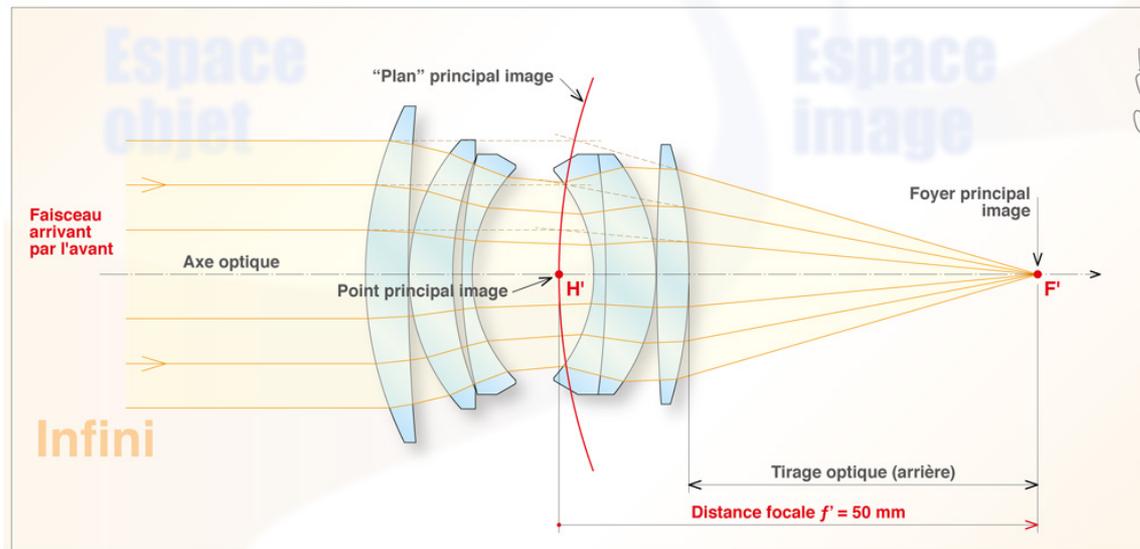
Lentes podem ser **delgadas** ou **espessas**

- Lentes delgadas são aquelas que as suas dimensões não importam, ou seja, não importa onde o raio de luz atinge a lente, o efeito será sempre o mesmo.
- Lentes espessas são aquelas que as dimensões e posição de incidência dos raios são importantes.



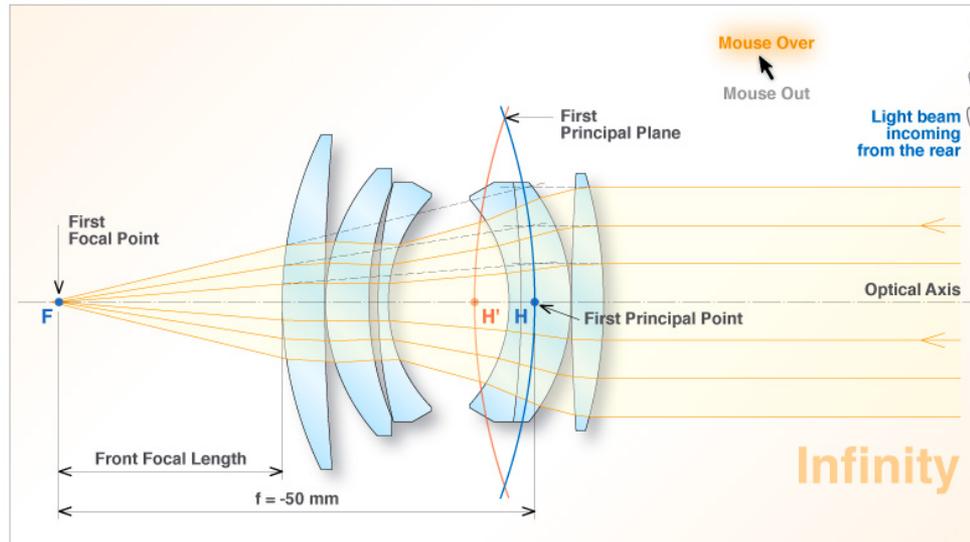
Associação de Lentes Delgadas

- Cada lente é delgada, mas a associação não é! As distâncias são obtidas a partir dos planos principais (H1 e H2)



Associação de Lentes Delgadas

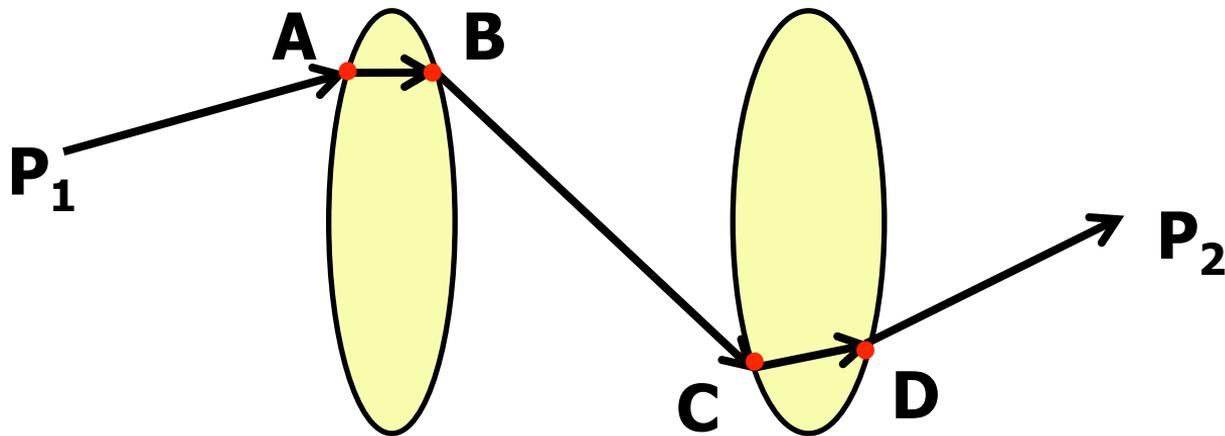
- Cada lente é delgada, mas a associação não é! As distâncias são obtidas a partir dos planos principais (H1 e H2)



Associação de Lentes

- Quando temos uma associação de lentes, a única diferença é que teremos mais matrizes:

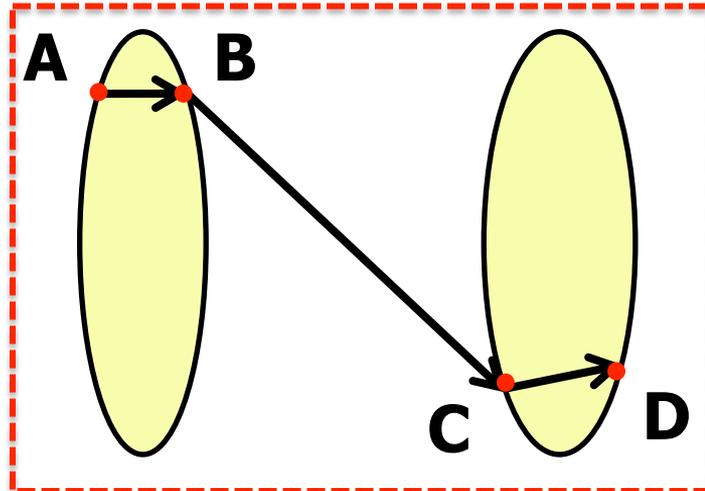
$$M_{P_1 \rightarrow P_2} = M_{D \rightarrow P_2} \cdot M_{C \rightarrow D} \cdot M_{B \rightarrow C} \cdot M_{A \rightarrow B} \cdot M_{P_1 \rightarrow A}$$



Associação de Lentes

- Vamos nos concentrar apenas na matriz de transferência da lente equivalente

$$M_{A \rightarrow D} = M_{C \rightarrow D} \cdot M_{B \rightarrow C} \cdot M_{A \rightarrow B}$$

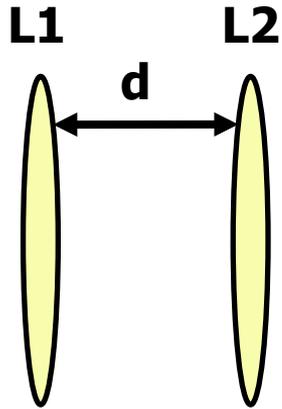


Lente
equivalente

Associação de Lentes

- Lente equivalente:

$$M_{L1+L2} = M_{L2} \cdot M_{L1 \rightarrow L2} \cdot M_{L1} = \begin{pmatrix} 1 & \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} & \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix}$$



$$= \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_1} & d \\ -\frac{1}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) - \frac{1}{f_1} & 1 - \frac{d}{f_2} \end{pmatrix}$$

Associação: distância focal

- O termo inferior esquerdo vale (ver apostila):

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad C = \frac{-1}{f}$$

- Portanto

$$\frac{-1}{f} = -\frac{1}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) - \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

Associação: planos principais

- Os planos principais estão nas posições:

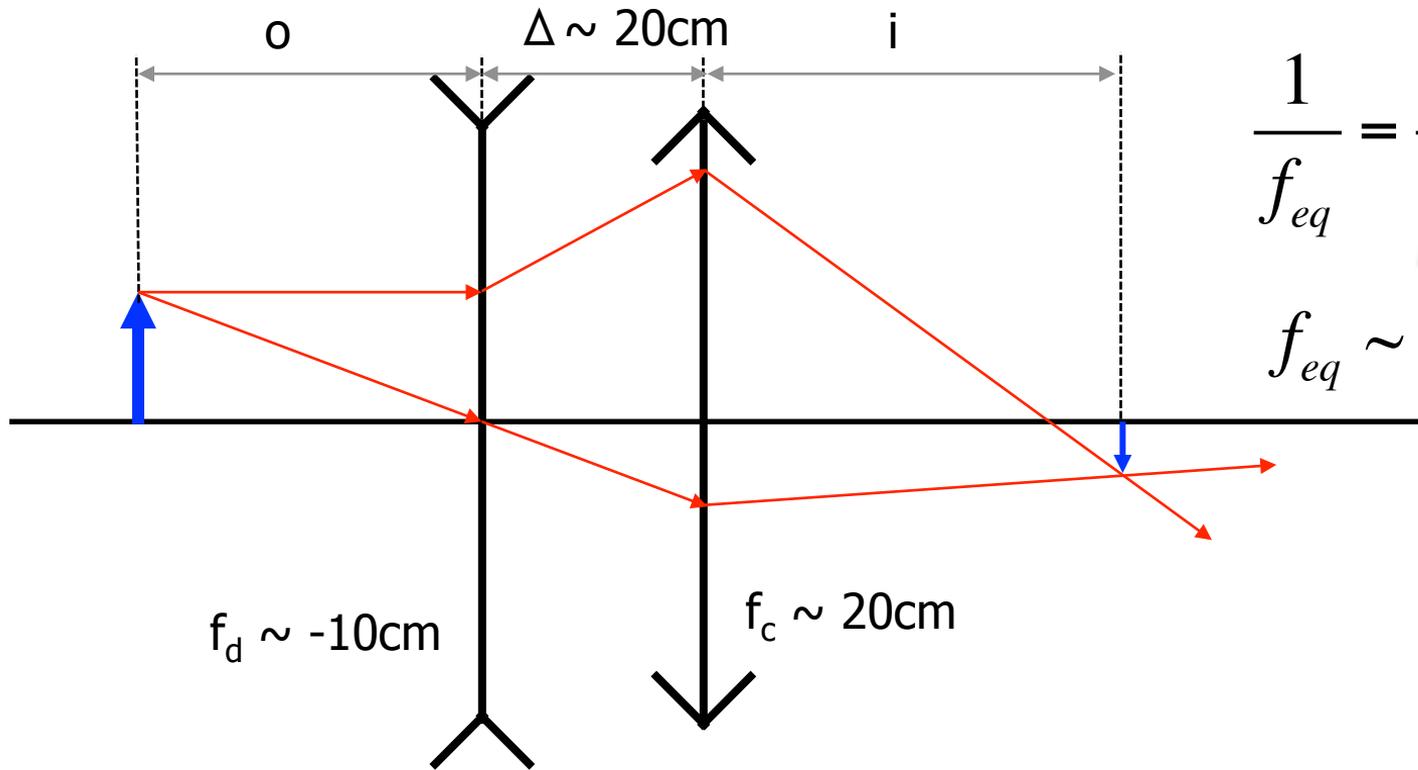
$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad h_1 = \frac{D-1}{C} \quad \text{e} \quad h_2 = \frac{A-1}{C}$$

- Portanto:

Essa definição significa que o h_2 é medido "para dentro".

$$h_1 = -f_{eq} \left[\left(1 - \frac{d}{f_2} \right) - 1 \right] = d \frac{f_{eq}}{f_2}, \quad h_2 = d \frac{f_{eq}}{f_1}$$

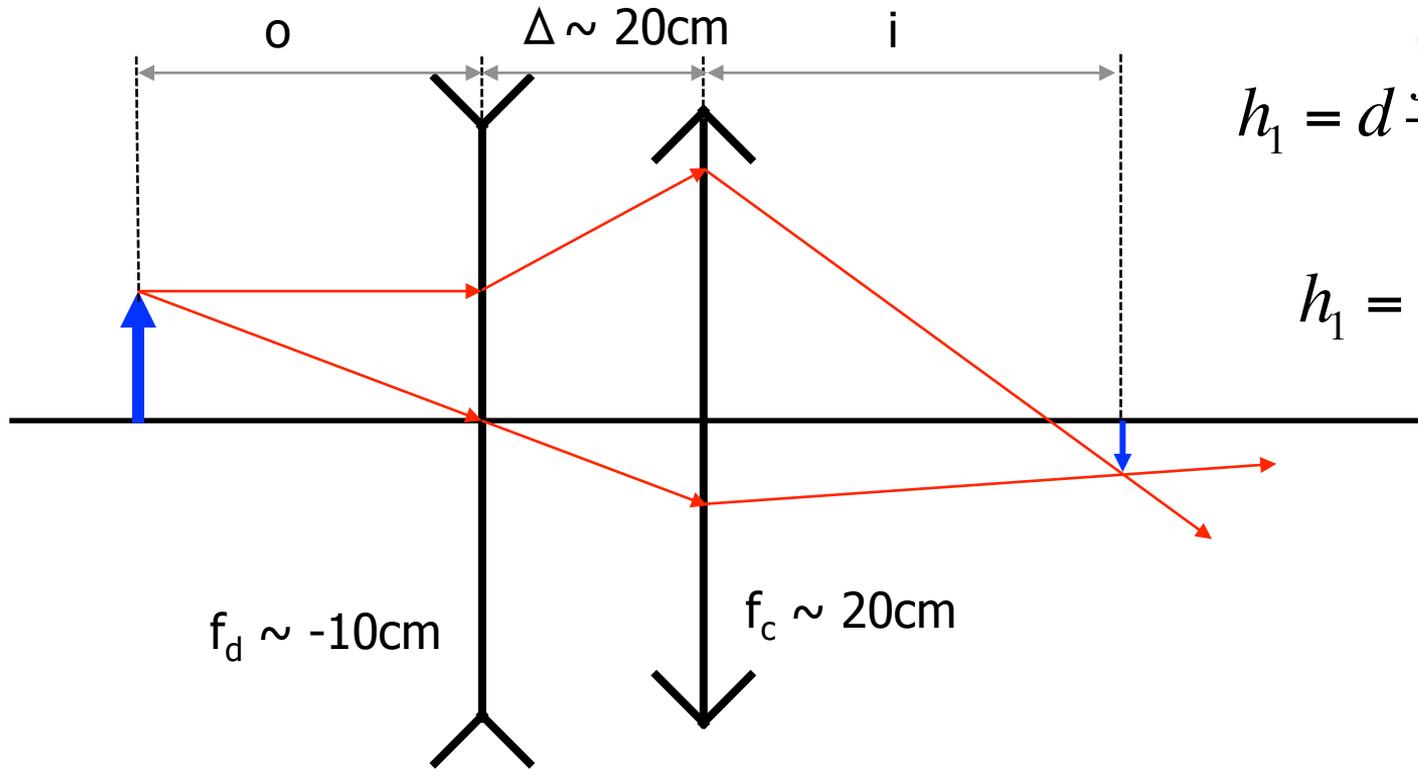
Atividade 2



$$\frac{1}{f_{eq}} = \frac{1}{f_d} + \frac{1}{f_c} - \frac{\Delta}{f_d f_c}$$

$$f_{eq} \sim f_c$$

Atividade 2



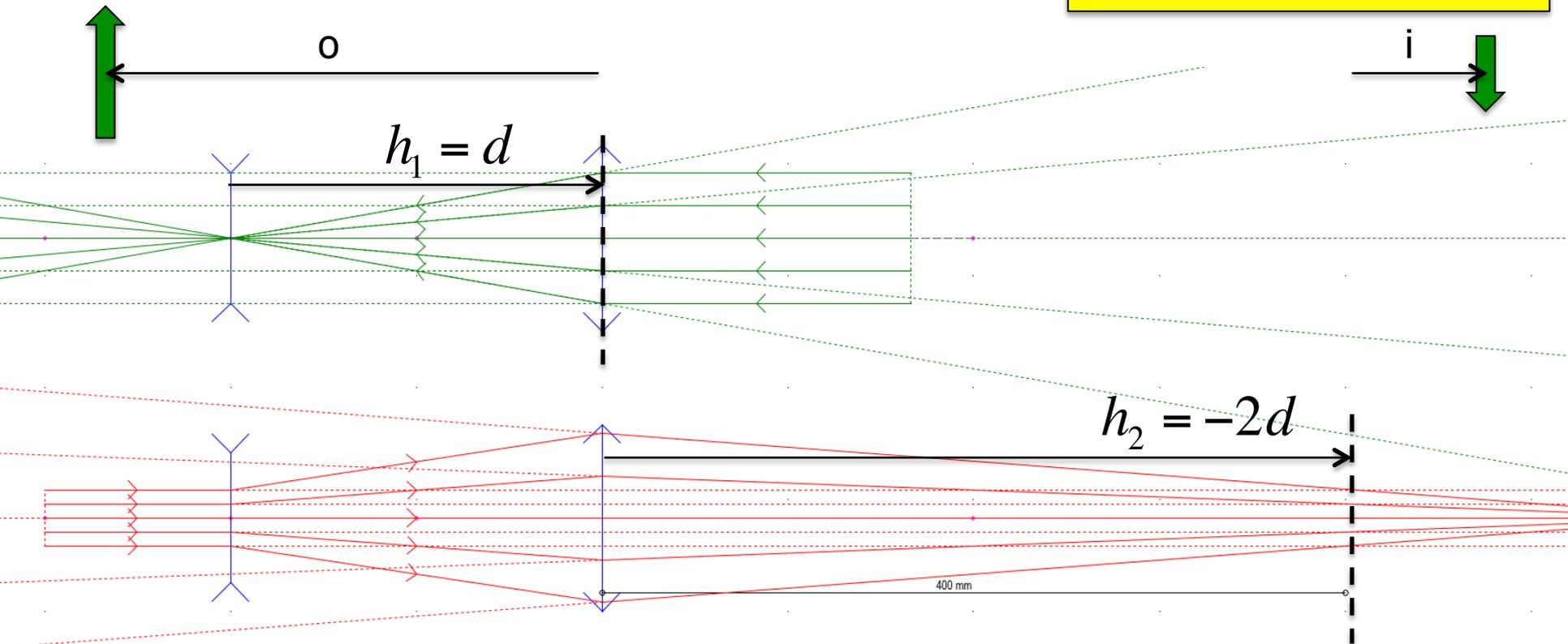
$$h_1 = d \frac{f_{eq}}{f_c}, \quad h_2 = d \frac{f_{e1}}{f_d}$$

$$h_1 = d, \quad h_2 = -2d$$

-2

Atividade 2

A Lei de Gauss, aplicada a lente equivalente, teria i e o medidos de h_1 e h_2



Atividade 3

- Calcular o índice de refração da lente
 - **DICA:** medir as dimensões da lente usando: medidor de raio de curvatura, micrômetro e paquímetro + equação do fabricante.
- Verificar se a aproximação de lente delgada é válida
 - **DICA:** calcular a posição dos planos principais e estimar o erro ao medir i e o em relação ao centro.

Como podemos fazer isso?

Análise

- Utilizando a equação do fabricante, as medidas das duas lentes e as distâncias focais determinadas nas aulas passada, calcule o índice de refração das lentes.
- Determinar as posições dos planos principais das duas lentes a partir das relações fornecidas para h_1 e h_2 .
- Utilizar o software **Optgeo** para desenhar as lentes, determinar a posição dos planos principais ($\lambda=633$ nm) e comparar com os valores anteriores.
- Corrigir os dados da atividade 1, refazer a análise e discutir.
- Corrigir os dados da atividade 2, refazer a análise e discutir.

Índice de Refração

- Isolar n na equação do fabricante:

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

- Delgada:

$$n = 1 - \frac{R_1 R_2}{f(R_1 - R_2)}$$

- Espessa:

$$n = \frac{\pm \sqrt{R_2} \sqrt{f^2 R_2 - 4f R_1 R_2 + 4f R_1 t + 4R_1^2 R_2} + f R_2 - 2ft - 2R_1 R_2}{2(f R_2 - ft - R_1 R_2)}$$

~~conta aqui~~

$$\frac{\partial n_+}{\partial a} = \frac{\frac{\sqrt{c(2ac-4bc+4bx)}}{2\sqrt{a^2c-4abc+4abx+4b^2c}} + c - 2x}{2(ac - ax - bc)} - \frac{(c-x) \left(\sqrt{c} \sqrt{a^2c - 4abc + 4abx + 4b^2c} + ac - 2ax - 2bc \right)}{2(ac - ax - bc)^2}$$

é para propagar os erros? entao precisava também da derivada em b, c e d, certo?

Posição c

t

digam que usaram o wolfram alfa, e

Sim, podem usar!

Utilizando o Mathematica do Wolfram para resolver a equação completa do fabricante para achar o índice de refração para a lente convergente com os parâmetros

Resultados

Apenas 11 grupos calcularam,
e só 3 fizeram isso também
para os dados da AT1.

Valores > 1.5 estão com erro
nas contas.

	Todos	Bons
n	1.487	1.472
err_n	0.039	0.016

	Índice de refração		
	AT1	AT2	
	conv	conv	div
h1	n/a	n/a	n/a
h2	1.469	1.464	1.479
h3	n/a	n/a	n/a
h4	n/a	1.46	1.48
h5	n/a	n/a	n/a
h6	n/a	1.467	1.48
h7	n/a	n/a	n/a
h8	n/a	1.465	1.48
h9	n/a	1.493	1.468
h10	n/a	1.59	1.59
h11	1.48	n/a	n/a
h12	n/a	1.489	1.551
h13	n/a	1.42	n/a
h14	n/a	n/a	n/a
h15	n/a	n/a	n/a
h16	1.4764	1.4745	1.495
h17	n/a	1.48	1.47
h18	n/a	n/a	n/a
h19	n/a	1.51	1.46

Análise

- Utilizando a equação do fabricante, as medidas das duas lentes e as distâncias focais determinadas nas aulas passada, calcule o índice de refração das lentes.
- Determinar as posições dos planos principais das duas lentes a partir das relações fornecidas para h_1 e h_2 .
- Utilizar o software **Optgeo** para desenhar as lentes, determinar a posição dos planos principais ($\lambda=633$ nm) e comparar com os valores anteriores.
- Corrigir os dados da atividade 1, refazer a análise e discutir.
- Corrigir os dados da atividade 2, refazer a análise e discutir.

Planos Principais

- Como dava para calcular 3 “n”, poderíamos ter 3 h’s
- Como calcular as incertezas?

$$\begin{cases} h_1 = \frac{t}{n \left(1 + \frac{P_1}{P_2} - t \frac{P_1}{n} \right)} \\ h_2 = \frac{t}{n \left(1 + \frac{P_2}{P_1} - t \frac{P_2}{n} \right)} \end{cases}$$

$$P_i = \frac{n-1}{R_i} \quad (5)$$

e as incertezas

$$\sigma_P^2 = \left(\frac{\sigma_n}{R} \right)^2 + \left(\frac{1-n}{R^2} \sigma_R \right)^2 \quad (6)$$

ok

e

$$\sigma_h^2 = \left(\frac{-tP_2(P_1+P_2)}{(tP_1P_2 - nP_1 - nP_2)^2} \sigma_n \right)^2 + \left(\frac{tP_2(tP_2 - n)}{(tP_1P_2 - nP_1 - nP_2)^2} \sigma_{P_1} \right)^2 + \left(\frac{tP_1n}{(tP_1P_2 - nP_1 - nP_2)^2} \sigma_{P_2} \right)^2 \quad (7)$$

Propagação de incertezas...

Método de Monte-Carlo

- Seria muito mais fácil usando monte-carlo

$$h_1 = \frac{t}{n \left(1 + \frac{P_1}{P_2} - t \frac{P_1}{n} \right)}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Erro em h1								
2		R1	R2	n	t	P1	P2	h1	h2
3	valor médio	192.3	-192.3	1.5	19			6.438	6.441
4	desvio	1.9	1.9	1.00E-06	1.00E-06			0.046	0.046
5	relativo (%)	1.0	1.0	0.0	0.0			0.713	0.714
6	1	193.269	-191.597	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4672835	6.4113179

(1) Sortear os
parametros, usando
a média e a inceteza

=NORMINV(RAND(),B\$3,B\$4)

(2) Calcular o valor
que queremos

=E6/D6/(1+(F6/G6)-E6*F6/D6)

Método de Monte-Carlo

- Seria muito mais fácil usando monte-carlo

$$h_1 = \frac{t}{n \left(1 + \frac{P_1}{P_2} - t \frac{P_1}{n} \right)}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Erro em h1								
2		R1	R2	n	t	P1	P2	h1	h2
3	valor médio	192.3	-192.3	1.5	19			6.438	6.444
4	desvio	1.9	1.9	1.00E-06	1.00E-06			0.046	
5	relativo (%)	1.0	1.0	0.0	0.0			0.713	
6	1	193.269	-191.597	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4672835	6.4113179
7	2	192.056	-192.491	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4320986	6.4466739
8	3	195.726	-190.913	1.500	19.000	0.003	0.003	6.5189444	6.3586446
9	4	193.931	-192.965	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4548083	6.4226551
10	5	190.267	-191.600	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4176681	6.4626207
11	6	193.669	-194.167	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4302069	6.4467344
12	7	192.666	-191.821	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4535519	6.4252617
13	8	191.608	-194.085	1.500	19.000	0.003	0.003	6.3976979	6.4804214
14	9	190.332	-194.921	1.500	19.000	0.003	0.003	6.3624767	6.5158999
15	10	193.669	-194.167	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4085133	6.4695459
16	11	192.666	-191.821	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4901002	6.4113179
17	12	193.669	-194.167	1.500	19.000	0.003	0.003	6.4483651	6.4467344

(4) Média e desvio

(3) Repetir 1000 vezes
(arrastar para baixo!)

Propagação por MC:
 $h_1 = 6.438 \pm 0.046$

Slide com erro na aula #3

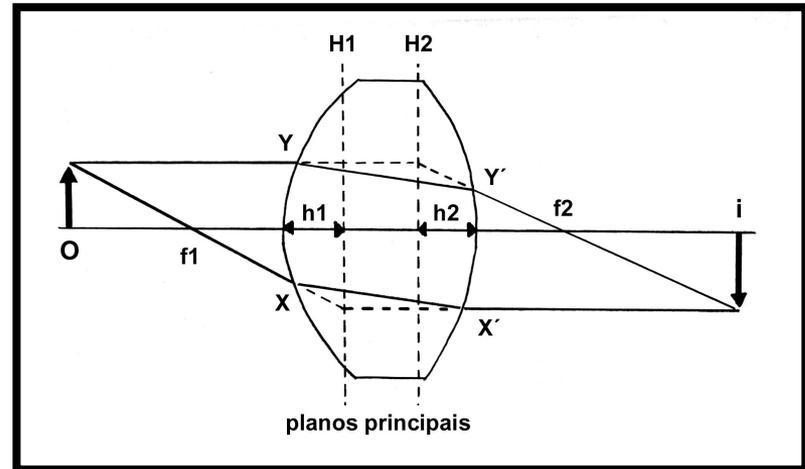
- A posição dos planos principais da lente espessa também sai da matriz de transformação (**atenção aos sinais de P_1 e P_2**):

$$h_1 = \frac{t}{n \left(1 + \frac{P_1}{P_2} - t \frac{P_1}{n} \right)}$$

$$P_1 = \frac{n-1}{R_1}$$

$$h_2 = \frac{t}{n \left(1 + \frac{P_2}{P_1} - t \frac{P_2}{n} \right)}$$

$$P_2 = \frac{1-n}{R_2}$$



h_1 é positivo para direita do vértice, e h_2 para a esquerda.

Lente espessa: planos principais

- Substituindo os valores de P_1 e P_2 , e usando a equação para o foco, temos:

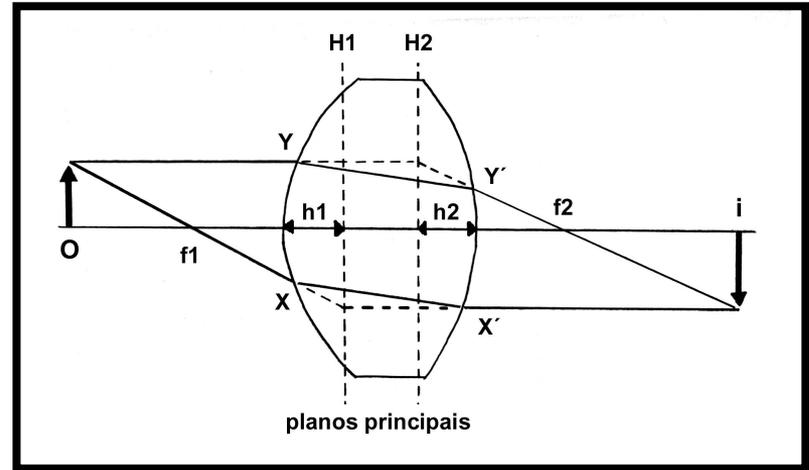
$$h_1 = -f \frac{(n-1)}{nR_2} t$$

$$P_1 = \frac{n-1}{R_1}$$

$$h_2 = f \frac{(n-1)}{nR_1} t$$

$$P_2 = \frac{1-n}{R_2}$$

Atenção: Em alguns livros, o h_2 é definido positivo para a direita, e teria um sinal "-" a mais neste slide e no anterior.



Planos principais

AT1 convergente					AT2 convergente				AT2 divergente			
h1/h2	OPTG			h1/h2	OPTG		h1/h2	OPTG				
h1	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.04	6.4	0.5	1.58	0.01	1.6	0.5
h2	6.571	0.018	6.4	0.5	6.592	0.018	6.4	0.5	1.600	0.019	1.1	0.5
h3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
h4	n/a	n/a	n/a	n/a	6.589	0.046	6.5	n/a	1.595	0.011	1.5	n/a
h5	n/a	n/a	n/a	n/a	6.4393	0.000017	6.5-7.7	0.004	1.5557	0.0043	0.7-1.2	0.004
h6	n/a	n/a	n/a	n/a	6.5	0.2	7.0	0.7	1.6	0.3	1.5	0.7
h7	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.01	6.3	n/a	1.58	0.01	1.5	n/a
h8	n/a	n/a	n/a	n/a	6.59	0.06	6.5	0.1	1.599	0.009	0.8	0.1
h9	n/a	n/a	n/a	n/a	6.57	6.00E-02	6	n/a	1.57	0.02	2	n/a
h10	n/a	n/a	n/a	n/a	6.49	1.66e-11	7.4	0.006	10.90	9.74E-06	9.6	0.006
h11	n/a	n/a	n/a	n/a	6.53	0.05	6.49	0.5	1.60	0.11	1.58	0.5
h12	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	6.30	0.2	n/a	n/a	1.50	0.5
h13	n/a	n/a	n/a	n/a	6.23	n/a	6.7	n/a	1.5778	n/a	4.4	n/a
h14	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	n/a	6.5	n/a	1.6	n/a	1.8	n/a
h15	n/a	n/a	n/a	n/a	6.439	0.001	6.5	0.05	1.577	0.001	1.5	0.05
h16	6.578	0.064	n/a	n/a	6.547	0.065	n/a	n/a	1.583	0.036	n/a	n/a
h17	n/a	n/a	n/a	n/a	6.52	0.03	6.600	0.006	1.610	0.008	1.600	0.006
h18	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.03	6.4	0.1	1.556	0.008	1.5	0.1
h19	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.02	n/a	n/a	1.55	0.02	n/a	n/a

Apenas 2 grupos tentaram com os dados da AT1

Vários grupos não deram os erros, principalmente da simulação

Planos principais

AT1 convergente				AT2 convergente				AT2 divergente				
h1/h2		OPTG		h1/h2		OPTG		h1/h2		OPTG		
h1	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.04	6.4	0.5	1.58	0.01	1.6	0.5
h2	6.571	0.018	6.4	0.5	6.592	0.018	6.4	0.5	1.600	0.019	1.1	0.5
h3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
h4	n/a	n/a	n/a	n/a	6.589	0.046	6.5	n/a	1.595	0.011	1.5	n/a
h5	n/a	n/a	n/a	n/a	6.4393	0.000017	6.5-7.7	0.004	1.5557	0.0043	0.7-1.2	0.004
h6	n/a	n/a	n/a	n/a	6.5	0.2	7.0	0.7	1.6	0.3	1.5	0.7
h7	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.01	6.3	n/a	1.58	0.01	1.5	n/a
h8	n/a	n/a	n/a	n/a	6.59	0.06	6.5	0.1	1.599	0.009	0.8	0.1
h9	n/a	n/a	n/a	n/a	6.57	6.00E-02	6	n/a	1.57	0.02	2	n/a
h10	n/a	n/a	n/a	n/a	6.49	1.66e-11	7.4	0.006	10.90	9.74E-06	9.6	0.006
h11	n/a	n/a	n/a	n/a	6.53	0.05	6.49	0.5	1.60	0.11	1.58	0.5
h12	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	6.30	0.2	n/a	n/a	1.50	0.5
h13	n/a	n/a	n/a	n/a	6.23	n/a	6.7	n/a	1.5778	n/a	4.4	n/a
h14	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	n/a	6.5	n/a	1.6	n/a	1.8	n/a
h15	n/a	n/a	n/a	n/a	6.439	0.001	6.5	0.05	1.577	0.001	1.5	0.05
h16	6.578	0.064	n/a	n/a	6.547	0.065	n/a	n/a	1.583	0.036	n/a	n/a
h17	n/a	n/a	n/a	n/a	6.52	0.03	6.600	0.006	1.610	0.008	1.600	0.006
h18	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.03	6.4	0.1	1.556	0.008	1.5	0.1
h19	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.02	n/a	n/a	1.55	0.02	n/a	n/a

Erros variaram muito!

0.001 a
0.065

0.004 a
0.1

0.001 a
0.036

0.004 a
0.1

Planos principais

AT1 convergente					AT2 convergente				AT2 divergente				
h1/h2	OPTG				h1/h2	OPTG		h1/h2	OPTG		h1/h2	OPTG	
h1	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.04	6.4	0.5	1.58	0.01	1.6	0.5	
h2	6.571	0.018	6.4	0.5	6.592	0.018	6.4	0.5	1.600	0.019	1.1	0.5	
h3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
h4	n/a	n/a	n/a	n/a	6.589	0.046	6.5	n/a	1.595	0.011	1.5	n/a	
h5	n/a	n/a	n/a	n/a	6.4393	0.000017	6.5-7.7	0.004	1.5557	0.0043	0.7-1.2	0.004	
h6	n/a	n/a	n/a	n/a	6.5	0.2	7.0	0.7	1.6	0.3	1.5	0.7	
h7	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.01	6.3	n/a	1.58	0.01	1.5	n/a	
h8	n/a	n/a	n/a	n/a	6.59	0.06	6.5	0.1	1.599	0.009	0.8	0.1	
h9	n/a	n/a	n/a	n/a	6.57	6.00E-02	6	n/a	1.57	0.02	2	n/a	
h10	n/a	n/a	n/a	n/a	6.49	1.66e-11	7.4	0.006	10.90	9.74E-06	9.6	0.006	
h11	n/a	n/a	n/a	n/a	6.53	0.05	6.49	0.5	1.60	0.11	1.58	0.5	
h12	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	6.30	0.2	n/a	n/a	1.50	0.5	
h13	n/a	n/a	n/a	n/a	6.23	n/a	6.7	n/a	1.5778	n/a	4.4	n/a	
h14	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	n/a	6.5	n/a	1.6	n/a	1.8	n/a	
h15	n/a	n/a	n/a	n/a	6.439	0.001	6.5	0.05	1.577	0.001	1.5	0.05	
h16	6.578	0.064	n/a	n/a	6.547	0.065	n/a	n/a	1.583	0.036	n/a	n/a	
h17	n/a	n/a	n/a	n/a	6.52	0.03	6.600	0.006	1.610	0.008	1.600	0.006	
h18	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.03	6.4	0.1	1.556	0.008	1.5	0.1	
h19	n/a	n/a	n/a	n/a	6.44	0.02	n/a	n/a	1.55	0.02	n/a	n/a	

Média
Desvio

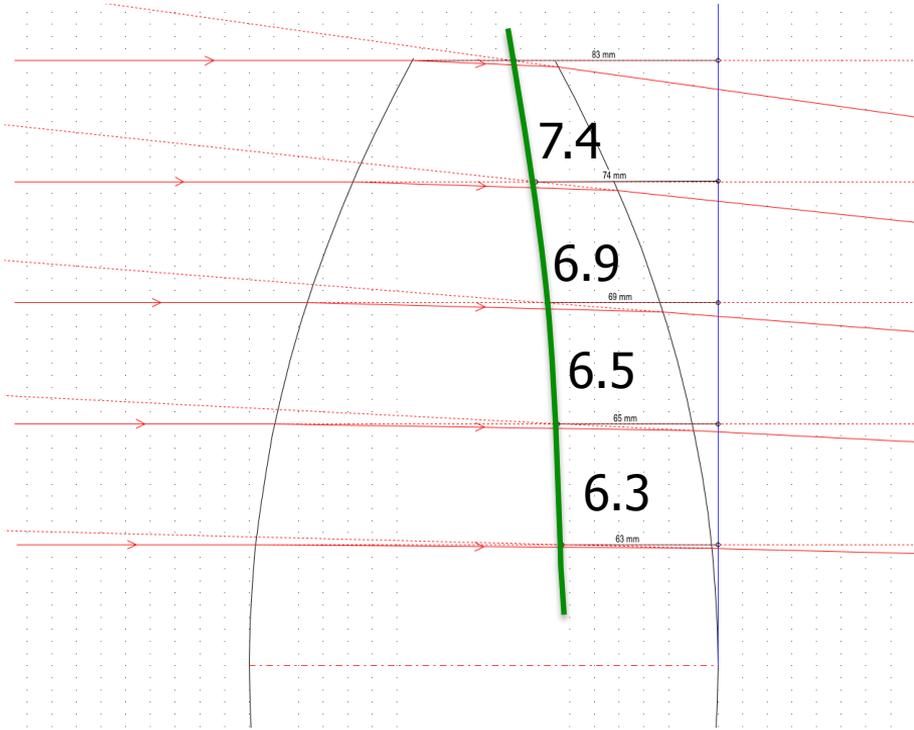
6.48		6.43		1.58		1.52	
0.09		0.17		0.02		0.17	

Melhor estimativa da incerteza, considerando todos os grupos

Análise

- Utilizando a equação do fabricante, as medidas das duas lentes e as distâncias focais determinadas nas aulas passada, calcule o índice de refração das lentes.
- Determinar as posições dos planos principais das duas lentes a partir das relações fornecidas para h_1 e h_2 .
- Utilizar o software **Optgeo** para desenhar as lentes, determinar a posição dos planos principais ($\lambda=633$ nm) e comparar com os valores anteriores.
- Corrigir os dados da atividade 1, refazer a análise e discutir.
- Corrigir os dados da atividade 2, refazer a análise e discutir.

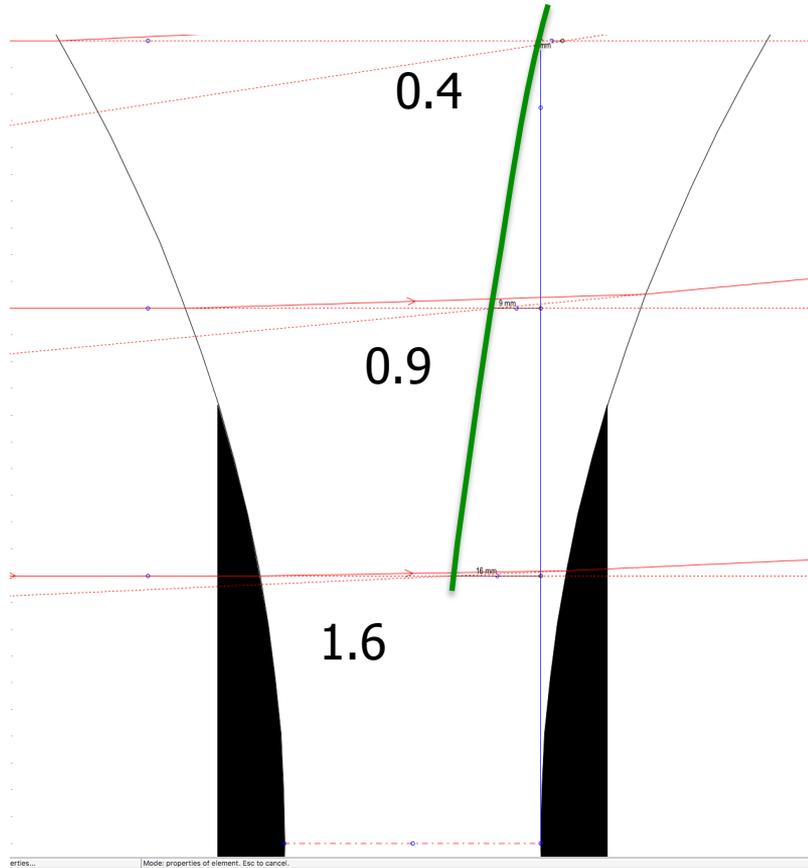
OptGeo



- A 2cm do eixo óptico, o valor de h já mudou!

OBS: Multipliquei as medidas *10 para melhor visualização

Na divergente também

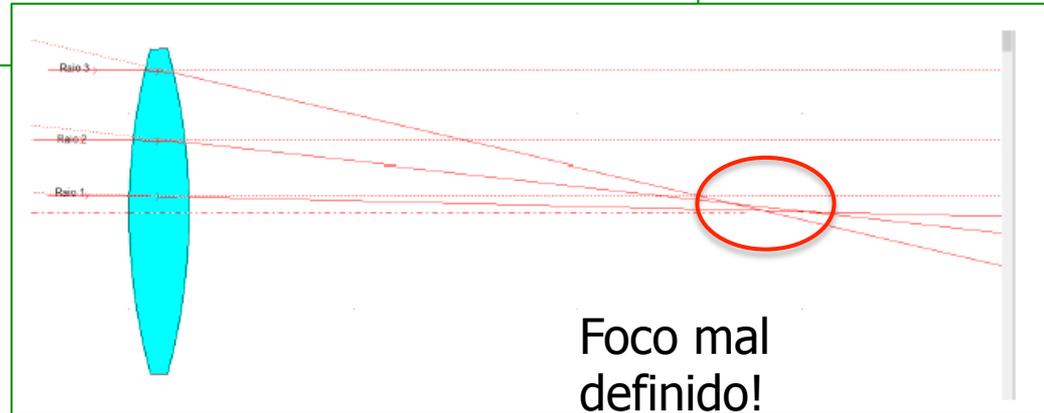


Um dos grupos percebeu

Verifica-se a partir da Tabela acima que o valor do plano principal calculado é compatível com o Raio 1, **entretanto a medida que esse raio afasta-se do eixo óptico o mesmo deixa de ser compatível.**

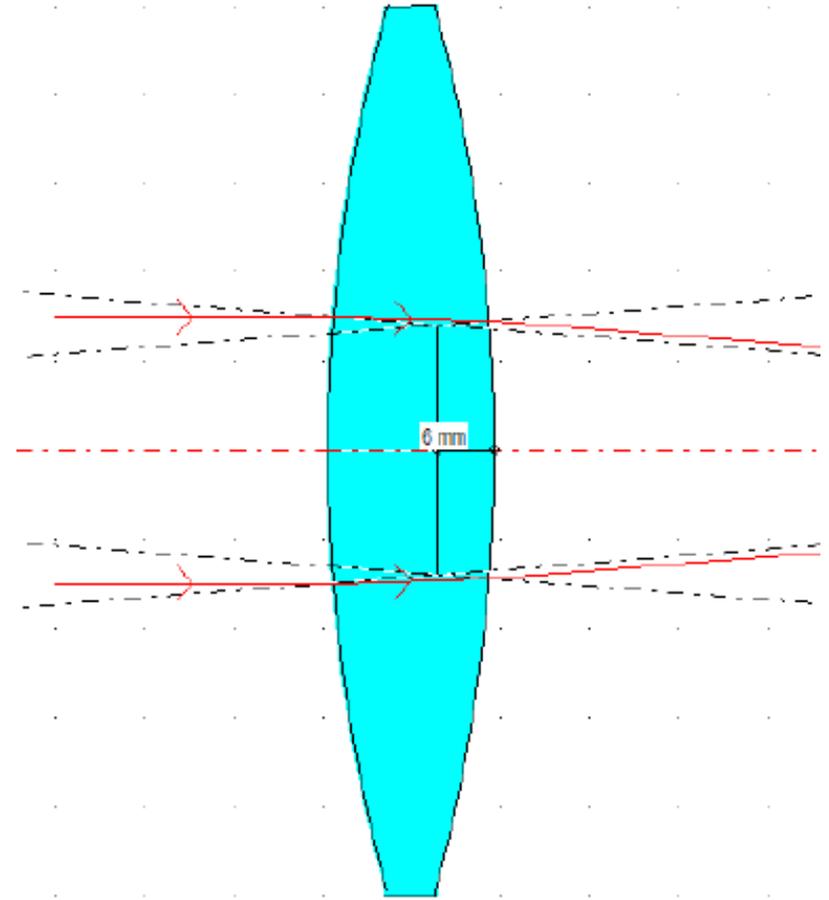
Tal fato, decorre diretamente da aproximação paraxial realizada em nosso modelo teórico. Os raios 2 e 3 não são compatíveis com a aproximação assumida.

Tal fato fica ainda mais evidente se analisarmos o ponto focal da simulação realizada, Figura 3.



Problemas

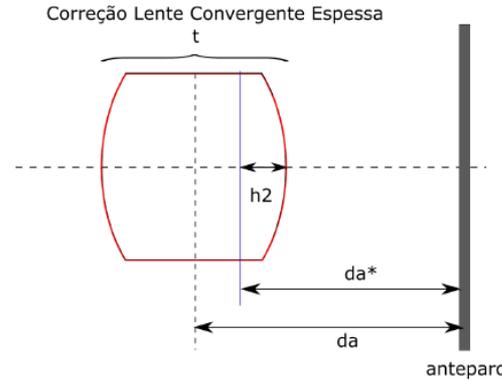
- Alguns grupos não entenderam como prolongar os raios. Acabaram usando as normais às superfícies.



Análise

- Utilizando a equação do fabricante, as medidas das duas lentes e as distâncias focais determinadas nas aulas passada, calcule o índice de refração das lentes.
- Determinar as posições dos planos principais das duas lentes a partir das relações fornecidas para h_1 e h_2 .
- Utilizar o software **Optgeo** para desenhar as lentes, determinar a posição dos planos principais ($\lambda=633$ nm) e comparar com os valores anteriores.
- Corrigir os dados da atividade 1, refazer a análise e discutir.
- Corrigir os dados da atividade 2, refazer a análise e discutir.

AT1

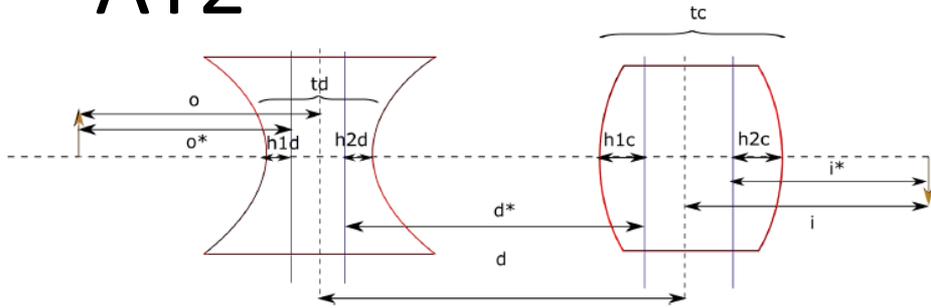


$$\begin{cases} d_a^* = d_a - \left(\frac{t}{2} - h_2 \right) \\ \sigma_{d_a^*}^2 = \sigma_{d_a}^2 + \sigma_{h_2}^2 \end{cases}$$

$$f = \frac{l}{1 + [1]}$$

Nem tinha que refazer o ajuste, bastava corrigir "l"

AT2

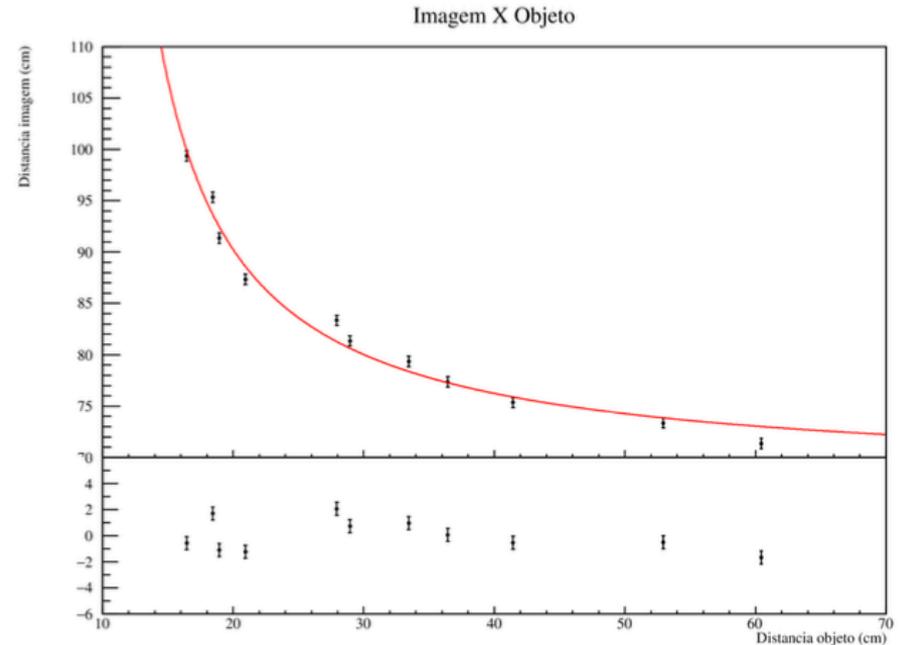
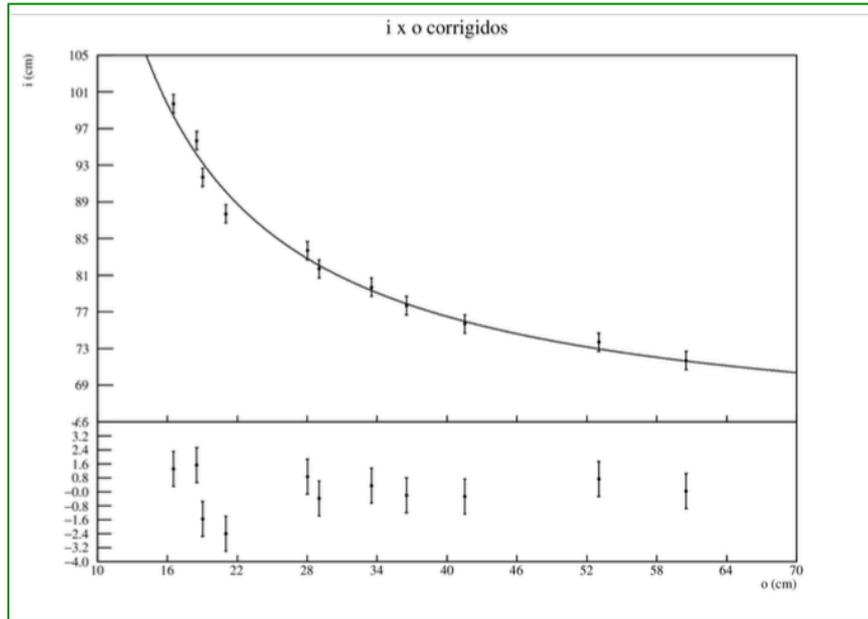


$$\begin{cases} o^* = o - \left(\frac{t_d}{2} - h_{1d} \right) & ; & \sigma_{o^*}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_{h_{1d}}^2 \\ d^* = d - \left(\frac{t_d}{2} - h_{2d} \right) - \left(\frac{t_c}{2} - h_{1c} \right) & ; & \sigma_{d^*}^2 = \sigma_d^2 + \sigma_{h_{2d}}^2 + \sigma_{h_{1c}}^2 \\ i^* = i - \left(\frac{t_c}{2} - h_{2c} \right) & ; & \sigma_{i^*}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_{h_{2c}}^2 \end{cases}$$

Figura 7: Correção das medidas consideradas na atividade 2

Para a AT2, tinha que fazer o grafico+ajuste...

Gráficos muito parecidos com os anteriores, mas vai mudar o ajuste...



Discussão

- Aproximação de lente delgada tem influência na determinação do valor do índice de refração? **Pouco**
- Qual tipo de erro cometemos ao medir i e o em relação ao centro? **sistemático**
- No experimento 1, dentro das incertezas, a aproximação de lente delgada é adequada?
- No experimento 2, a partir das incertezas nos valores de f_d e f_c sem e com correção, aproximação de lentes delgadas é adequada? **As correções eram da ordem de grande dos erros. Os valores davam compatíveis. Ou seja, é uma boa aproximação**

Análise da eq. do fabricante

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

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%

	[mm]		[mm]	[mm]	%
r1	255	n	f_del	f_esp	ERRO
r2	255	1.1	1275.0	1276.2	-0.09%
t	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%