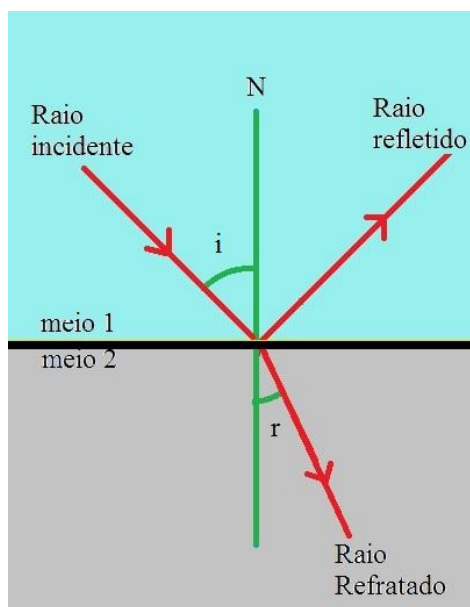


## T5 - Refração da luz, lentes e princípio de funcionamento de um microscópio.

**Mas então o que é isto de refração da luz???**



A refração da Luz é um fenômeno ótico e acontece quando a direção e velocidade de propagação do feixe de luz muda em consequência da mudança de meio, ou seja, de atravessar uma superfície de separação de dois meios.

Nesta figura (ao lado), temos um feixe de luz que incide obliquamente na superfície de separação entre 2 meios quaisquer. Verificamos que parte da luz incidente é refletida e outra parte é refratada.

À reta N chamamos de reta normal pois é perpendicular à superfície de separação entre os

meios 1 e 2.

Ao ângulo  $i$  chamamos de ângulo de incidência e é o ângulo formado entre o feixe de luz que está a incidir e a reta N. Já o ângulo  $r$ , é denominado de ângulo de refração e é o ângulo formado entre o feixe de luz refratado e a reta N.

Cada meio de propagação da luz é caracterizado por uma grandeza adimensional  $n$  chamada de índice de refração. Esta quantidade é constante e diz-nos a velocidade de propagação da luz do meio em questão em relação à velocidade de propagação da luz no vácuo. O índice de refração calcula-se através da relação:

$$n = \frac{c}{v}$$

onde  $v$  é a velocidade de propagação da luz no meio e  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

Na seguinte tabela temos os diferentes índices de refração para diferentes meios:

Material	Índice de refração
Ar	1,0003
Água	1,33
Gelo	1,31
Álcool	1,36
Óleo	1,46
Vidro crown	1,52
Diamante	2,42
Rubi	1,71

Vejamos um exemplo muito simples: olhando para tabela vemos que a água tem um índice refração  $n = 1,33$ . Isto significa apenas que a luz, ao atravessar este meio, possui uma velocidade 1,33 vezes menor que a sua velocidade no vácuo.

Outra equação muito importante da refração da luz é conhecida pela **lei de Snell-Descartes**. Proposta em 1621 por Villebrord Snell e René Descartes, esta equação relaciona os ângulos de incidência e refração com os índices de refração de cada meio envolvido.

A travessia de entre dois meios com índices de refração distintos implica uma variação da velocidade de propagação de uma onda, sendo por isso que o lápis aparenta erradamente estar partido.

Analisando detalhadamente esta questão temos a imagem seguinte:

Quando um feixe de luz se desloca de  $A'$  até  $B$  num intervalo de tempo  $t$ , um feixe de luz em  $A$ , nesse mesmo intervalo de tempo, irá sofrer um deslocamento mais pequeno até  $B'$  (pois estamos a considerar que  $v_2 < v_1$ ).

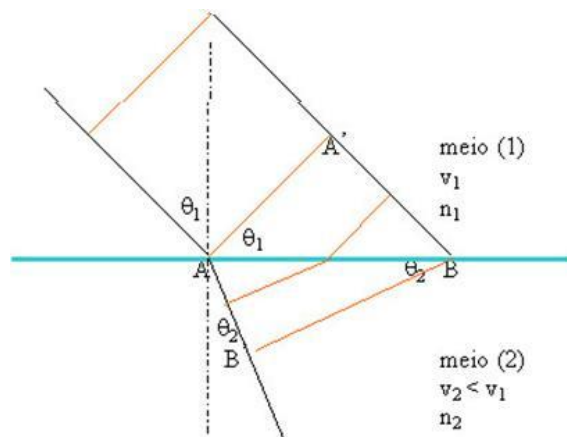
Tendo em conta que  $\overline{A'B} = v_1 t$  e  $\overline{AB'} = v_2 t$ , então temos a seguinte razão

$$\frac{\overline{A'B}}{\overline{AB'}} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Analisando agora os ângulos de incidência e refração temos as seguintes igualdades

$$\sin \theta_1 = \frac{\overline{A'B}}{\overline{AB}} \text{ e } \sin \theta_2 = \frac{\overline{AB'}}{\overline{AB}}$$

As quais nos permitem chegar à seguinte relação



$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Utilizando a expressão  $n = c/v$  atingimos por fim a expressão da lei de Snell-Descartes:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Através desta lei, podemos concluir que:

- quando temos o feixe da luz a propagar-se inicialmente num meio com menor índice de refração, então pela lei de Snell-Descartes temos que  $\sin \theta_1 > \sin \theta_2$ , e que pelas propriedades da função seno temos que  $\theta_1 > \theta_2$ , isto é o feixe de luz refratado aproxima-se da normal.
- Se tivermos a situação contrária, ou seja, se o feixe de luz se propaga inicialmente no meio de maior índice de refração, pela lei de Snell-Descartes, também verificamos que o feixe de luz refratado também se afasta da normal.

Agora que vimos a lei de Snell-Descartes, iremos introduzir outro fenómeno ótico chamado de reflexão total. A reflexão total é um fenómeno que **apenas** acontece quando o ângulo de incidência é maior que o ângulo limite. Este ângulo limite é o menor ângulo de incidência necessário para que o ângulo de refração seja igual a  $90^\circ$ , ou seja,  $\theta_2 = 90^\circ$ . Mas para isto acontecer é necessário que o feixe de luz seja proveniente de um meio com maior índice de refração. Para poder determinar o ângulo limite de  $\theta_1$  utilizamos a lei de Snell-Descartes:

$$N_1 \cdot \sin 90^\circ = N_2 \cdot \sin L \gg N_1 \cdot 1 = N_2 \cdot \sin L$$

$$\sin L = \frac{N_1}{N_2} \gg \sin L = \frac{N_{\text{MENOR}}}{N_{\text{MAIOR}}}$$

## Lentes

Como sabem, as lentes são os dispositivos óticos mais comuns, os quais funcionam por refração da luz.

Utilizou-se uma lente cilíndrica de colimação logo após a fonte de luz, a qual alinhou os feixes de luz paralelamente entre si. A lente era cilíndrica para permitir a projeção dos feixes de luz na plataforma rotativa uma vez que este tipo de lentes focaliza a luz em linhas ao invés de pontos (como no caso das lentes esféricas).

Assim, ao atravessar a máscara tipo-pente, conseguiu-se obter 7 raios de luz paralelos. Colocou-se também de seguida uma máscara de fenda simples, que nos permitiu selecionar apenas um feixe.

Escolhendo o feixe central, ajustou-se a posição da lente de colimação de forma que o feixe selecionado se encontrasse alinhado com a linha radial que indica  $0^\circ$  da plataforma.

Além disso, utilizou-se uma lente cilíndrica de acrílico com uma configuração plano-convexa, onde os feixes de luz, após sofrerem refração, convergem.

Colocou-se a lente cilíndrica em cima da plataforma rotativa, centrada com esta e com a superfície plana alinhada pela linha radial que indica  $90^\circ$ , com a parte plana da lente virada para o raio de luz incidente, de forma a observar-se a refração ar/acrílico.

## 5.2

Girando apenas a plataforma rotativa, registou-se os seguintes valores dos ângulos de incidência. Utilizando a Lei de Snell-Descartes calculou-se o índice de refração do acrílico (nota: considerou-se que o  $n_{ar} = 1,00$ ):

$$n_{acrílico} = \frac{n_{ar} \sin(\theta_{ar})}{\sin(\theta_{acrílico})}$$

Os valores obtidos foram:

Ângulo de Incidência	Ângulo de refração	Comentários	Índice de refração
0,0	0,0		-
15,0	9,5		1,57
30,0	19,0		1,54
45,0	28,0		1,51
60,0	35,5		1,49
75,0	41,0	Temos aqui uma reflexão	1,47
90,0	-	não refratou nem refletiu	-
		média	1,51

Colocando agora a parte esférica da lente virada para o raio da luz, observou-se a refração acrílico/ar. Como o  $n_{\text{acrílico}} > n_{\text{ar}}$ , para um determinado ângulo de incidência observou-se o fenômeno da reflexão total. Obteve-se os seguintes dados:

Ângulo de Incidência	Ângulo de refração	Comentários	Índice de refração
0,0	0,0		-
5,0	7,5		1,50
10,0	15,0		1,49
15,0	22,5		1,48
20,0	30,5		1,48
25,0	38,5		1,47
30,0	48,0	Existe aqui uma reflexão	1,49
35,0	68,5	Existe aqui uma reflexão	1,62
42,5	90,0	Verificamos que este é o valor máximo de incidência	1,48
		média	1,50

(nota: verificamos então que para um angulo superior a 42,5º visualizou-se sempre o fenômeno de reflexão total.)

Esta parte da atividade laboratorial permitiu-nos observar e analisar o fenômeno da refração da luz detalhadamente e também permitiu comprovar e aplicar a lei de Snell-Descartes, através da proximidade dos valores obtidos do índice de refração do acrílico com o valor teórico tabelado, que é 1,49.

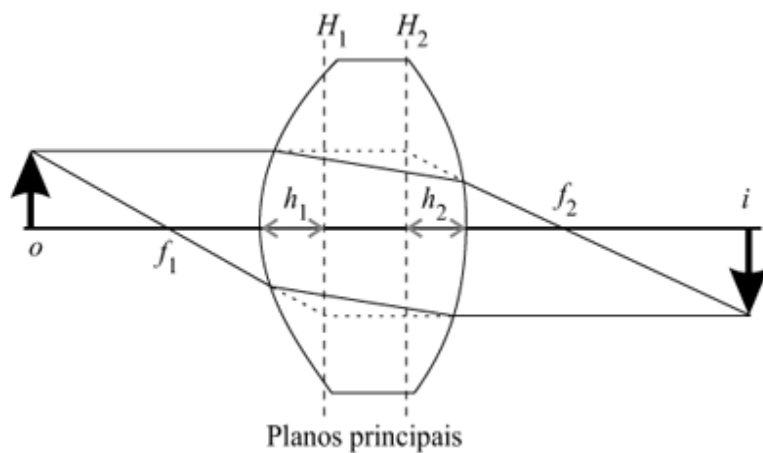
### 5.3

Como sabemos, para diferentes formas e configurações de lentes obtemos diferentes direções de propagação da luz nela incidida e, por consequência diferentes distâncias focais.

A distância focal é a distância entre o foco, isto é, onde os raios refratados da lente incidem, e a lente, e pode ser obtida pela equação dos fabricantes de lentes, também designada por equação de Halley. No entanto, isto só é correto para lentes finas, onde se despreza a espessura da mesma.

Como para esta experiência utilizamos uma lente espessa, para calcular a distância focal precisamos de saber os valores da distância focal efetiva através da seguinte expressão:

$$\frac{1}{f} = (n_{\text{lente}} - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n_{\text{lente}} - 1)d_{\text{lente}}}{n_{\text{lente}} R_1 R_2} \right)$$



E também de determinar  $h_1$  e  $h_2$ , que são a distância dos "vértices" da lente aos pontos principais objeto e imagem:

$$h_1 = -\frac{f(n_{lente} - 1)d_{lente}}{R_2 n_{lente}}$$

$$h_2 = -\frac{f(n_{lente} - 1)d_{lente}}{R_1 n_{lente}}$$

Assim, a distância focal anterior e posterior obtém-se através da soma da distância focal com o  $h_1$  e  $h_2$ , respetivamente.

Tendo em conta que a lente usada era plano-convexo, o raio de curvatura do lado plano tende para o infinito e então as expressões ficam:

$$\frac{1}{f} = \frac{(n_{lente} - 1)}{R_{convexo}}$$

$$h_{plano} = -\frac{f(n_{lente} - 1)d_{lente}}{\pm R_{convexo} n_{lente}}$$

$$h_{convexo} = 0$$

Prosseguindo para a montagem em laboratório, colocou-se a plataforma rotativa com o reticulado voltado para cima e retirando a máscara de fenda simples, permitindo a passagem de 7 feixes de luz, mantendo o resto da montagem.

A forma como a lente se encontrava posicionada afetou o comportamento dos raios de luz refratados, sendo colocada num primeiro instante com a parte plana voltada para os feixes incidentes e com a parte curva noutro momento.

Como um dos objetivos seria encontrar a distância focal da lente, decidiu-se calcular primeiramente os valores teóricos para ambas as situações.

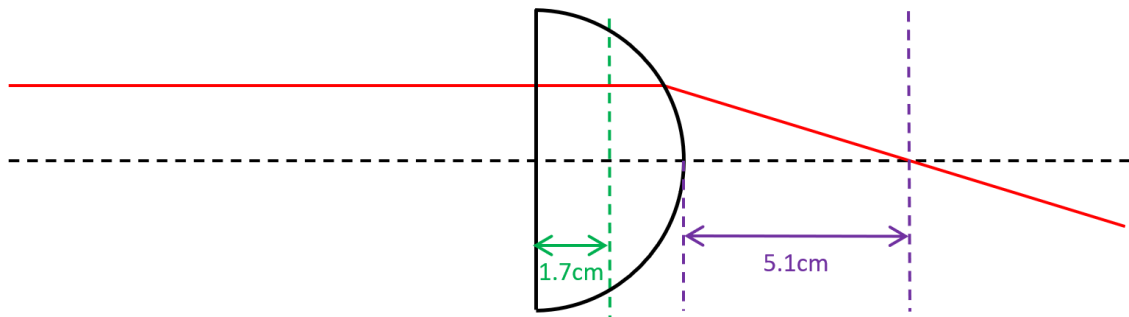
Sendo assim, substituindo nas expressões pelos valores da lente utilizada (semicírculo de raio 2.55cm), obtivemos os seguintes resultados:

$$f = 5.1cm$$

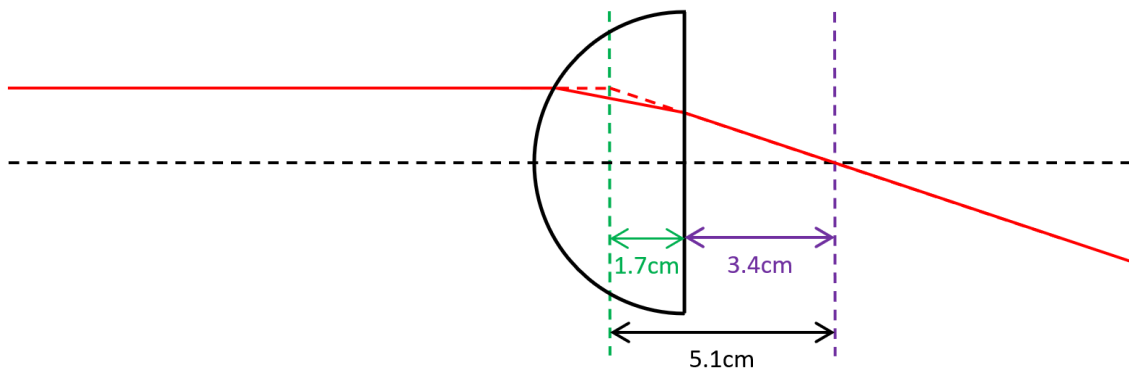
$$h_{plano}^1 = 1.7cm$$

$$h_{plano}^2 = -1.7cm$$

Então para o primeiro caso ficamos com o seguinte diagrama:



E para o segundo caso:



Estes valores de distância focal serão os esperados para os raios paraxiais, ou seja, os raios mais próximos do eixo ótico, uma vez que os restantes raios sofrem aberração esférica.

A aberração esférica é um fenómeno da ótica geométrica na qual os raios de luz incidentes próximos à borda das lentes sofrem uma maior refração do que os raios que incidem próximos ao eixo ótico.

Em laboratório, registou-se os seguintes comportamentos dos raios de luz refratados, recolhendo os raios de incidência para cada feixe, analisados individualmente com recurso à máscara de fenda simples:

Raio de incidência	Distância Focal (cm)
1º	3,55
2º	4,45
3º	4,85
4º	0,00
5º	4,85
6º	4,35
7º	3,45

Nesta situação, os raios incidentes mais longe do eixo sofreram um maior desvio, correspondendo a menores distâncias focais, verificando-se assim a existência de aberração esférica.

Uma vez que os valores de distância focal teórica serão os esperados para os raios paraxiais, ou seja, os raios mais próximos do eixo ótico, obtém-se que para esses mesmos raios, os valores obtidos em laboratório se aproximam do esperado (5,1 cm), não coincidindo totalmente devido a reflexões e difrações não consideradas.

Rodando a lente 180º obtemos:

Raio de incidência	Distância Focal (cm)
1º	2,95
2º	3,05
3º	3,15
4º	0,00
5º	3,15
6º	3,05
7º	2,95

Ao contrário do caso anterior, a aberração esférica é muito menor, uma vez que a aberração diminui quando o desvio dos raios de luz se obtém através de duas refrações (primeiro na parte redonda e depois na parte plana da lente), obtendo-se menores ângulos e, assim, uma menor distância focal.

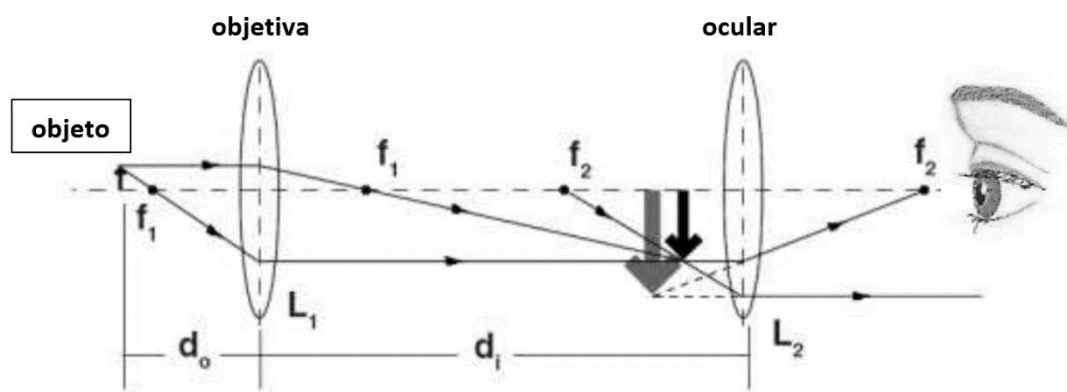
Tal como aconteceu na situação anterior, os valores obtidos aproximam-se do teórico, cuja diferença se obteve pelos mesmos motivos atrás mencionados.



## 5.4

Nesta parte final iremos abordar o princípio de funcionamento do microscópio. Apesar do microscópio ser um instrumento complexo, iremos construir um mais elementar utilizando apenas um sistema ótico simples de duas lentes, que corresponde ao conjunto canhão + objetivas de um microscópio comum.

Este microscópio elementar é composto por duas lentes: uma mais próxima do objeto denominada objetiva ( $L_1$ ) com foco  $f_1$ , cuja função era formar uma imagem real, invertida e geralmente maior que o objeto; as dimensões desta imagem intermédia são limitadas pelas dimensões físicas da ocular ( $L_2$ ), a segunda lente utilizada, mais afastada do objeto e mais perto do observador com foco  $f_2$ .



Fixada a distância entre a objetiva e a fonte de luz ( $d_0$ ) nos 15 cm, variamos a distância entre a ocular e a objetiva ( $d_i$ ), visualizando através da ocular a imagem do objeto. Verificou-se uma maior ou menor focagem da imagem, invertida e ampliada em relação à original, estando focada a uma distância entre as lentes de aproximadamente  $(25.0 \pm 0.5)$  cm. Com estes valores e através da expressão seguinte obtemos a ampliação combinada das duas lentes:

$$M = \frac{d_i}{d_0} = \frac{25}{15} = 1,67$$

Além disso, reparamos que para diferentes pessoas se obtém diferentes distâncias  $d_i$  até que a imagem se encontrasse focada, fruto da existência (ou ausência) de problemas de visão de cada um.