

### Experiência 3: ÓTICA GEOMÉTRICA

Sabemos que a luz visível é apenas um caso particular de ondas eletromagnéticas, que são detetáveis pelos nossos órgãos de visão, o que lhes confere um estatuto de privilégio nos diversos estudos que lhe são consagrados. No caso especial em que podemos desprezar efeitos devidos ao comprimento de onda e estudamos a propagação retilínea da luz em meios homogêneos temos a chamada ótica geométrica. Quando a luz incide numa superfície podem verificar-se três fenómenos distintos: a difusão, a reflexão e a refração. Neste trabalho iremos analisar os dois últimos.

A reflexão da luz acontece quando um raio incide numa superfície polida e volta para o mesmo meio. A reflexão da luz dá-se de acordo com duas leis:

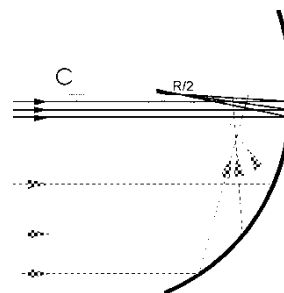
1. O raio incidente, a normal no ponto de incidência e o raio refletido estão no mesmo plano.
2. O ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais, quando medidos em relação à normal no ponto de incidência.

Estas duas leis permitem determinar o comportamento de qualquer raio luminoso ao incidir num espelho, possibilitando deste modo a determinação das imagens de um objeto formadas por um espelho. Como elementos óticos, os espelhos são divididos em espelhos planos e espelhos curvos, destacando-se como caso particular mais importante destes últimos os esféricos.

A imagem dada pelo espelho plano de um qualquer objeto constata-se ser virtual (isto é, forma-se no espaço posterior relativamente ao espelho), obtida pelo prolongamento do raio luminoso refletido, tem dimensão igual ao objeto e encontra-se situada a uma distância igual à do objeto ao espelho.

Um espelho esférico é por definição qualquer calote obtida a partir de uma esfera, a qual foi recoberta interior ou exteriormente por uma camada refletora. Consoante a superfície espelhada é a interior ou a exterior, assim o espelho esférico se denomina côncavo ou convexo.

No caso de um espelho esférico côncavo, os raios luminosos incidentes na zona periférica do espelho são refletidos de tal modo que intersectam o eixo principal na vizinhança do vértice do espelho, em pontos distintos. Relativamente aos raios incidentes segundo direções vizinhas desse eixo principal, raios paraxiais, verifica-se que estes são refletidos de tal modo que se intersectam num ponto equidistante ao centro de curvatura e ao vértice do espelho. Este ponto é referenciado como o foco do espelho e está situado sobre o eixo principal a uma distância do vértice e do centro de curvatura que é igual a metade do raio de curvatura do espelho.



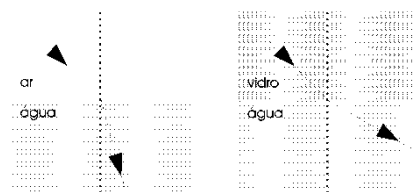
Considerando apenas essa região paraxial, demonstra-se que:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f} = P \quad (1)$$

em que  $p$  é a distância do objeto ao vértice  $V$  do espelho,  $p'$  a distância da imagem a  $V$  e  $R$  o raio de curvatura, e atendendo a que a distância focal de espelho esférico é igual a  $R/2$  (posição da imagem quando o objeto se encontra no infinito). A potência do espelho  $P$  tem como unidades a dioptria (com  $f$  em metro). Esta equação considera como convenção de sinais que  $p$  e  $p'$  são ambos positivos à esquerda de  $V$  (tenha em atenção que diferentes livros usam diferentes convenção de sinais).

Enquanto num espelho esférico côncavo a imagem de um objeto situado no infinito (raios paralelos) é real, no convexo ela é virtual por ser obtida por detrás do espelho, ou seja, a imagem forma-se não à custa dos raios luminosos refletidos mas dos seus prolongamentos. O que foi referido para os espelhos côncavos aplica-se aos espelhos convexos, tendo-se neste caso uma distância focal de sinal contrário.

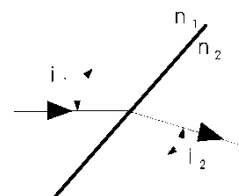
Chama-se refração à passagem da luz de um meio transparente para outro. É, em geral, acompanhada de uma brusca mudança de direção dos raios luminosos (sendo que os raios perpendiculares à superfície não sofrem qualquer desvio).



Num meio óptico diferente do vácuo (ex.: ar, água, vidro, ...) a luz propaga-se com uma velocidade inferior. A razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo  $c$  e a velocidade de propagação num dado meio óptico  $v$  constitui o índice de refração desse meio  $n$ :

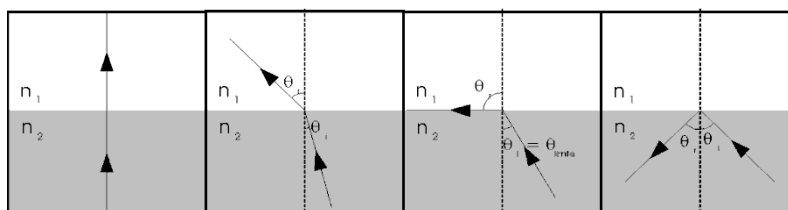
$$n = c/v \quad (2)$$

O fenómeno da refração pode ser compreendido com base no princípio de Fermat, segundo o qual a trajetória seguida por um raio luminoso entre dois pontos é aquela que é percorrida no menor intervalo de tempo possível. A partir deste princípio é possível obter a lei de Snell-Descartes que relaciona os ângulos de incidência com os índices de refração:



$$n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2) \quad (3)$$

Considerando uma fonte luminosa orientável no seio de um meio ópticamente denso, que está em contacto com o ar, fazendo aumentar



gradualmente o ângulo de incidência  $\theta_i$ , verifica-se que o raio refratado vai aproximar-se cada vez mais da superfície de separação dos dois meios e que cada vez é maior a energia transportada pelo feixe refletido, ficando  $\theta_r = 90^\circ$  para um  $\theta_i = \theta_{limite}$  (ângulo limite ou ângulo crítico). Para ângulos de incidência iguais ou superiores a  $\theta_{limite}$  toda a energia é refletida para o meio de incidência, num processo conhecido como reflexão interna total.

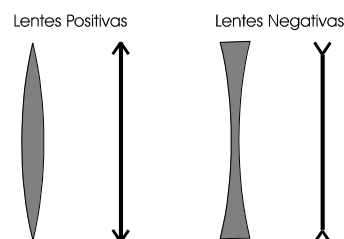
Neste caso, de acordo com a lei de Snell-Descartes, temos:

$$\theta_{limite} = \sin^{-1}(n_1/n_2) \quad \text{com } n_2 > n_1 \quad (4)$$

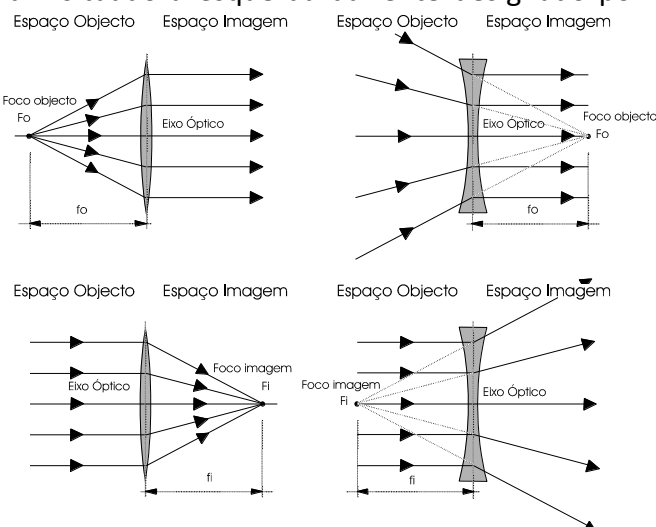
As superfícies que constituem a fronteira de dois meios ópticos de índice de refração diferente são designadas por dioptras. Assim, diz-se, por exemplo, que o ângulo limite para um dioptra ar-vidro é de aproximadamente  $42^\circ$ .

Por lente entende-se todo e qualquer meio óptico limitado por duas superfícies curvas, ou por uma superfície curva e outra plana (dois dioptros). Numa definição um pouco menos formal, podemos designar por lente, qualquer elemento óptico retractor capaz de alterar as características geométricas da luz. Associa-se obviamente uma potência não nula a esse elemento óptico. Dependendo do sinal da sua potência, as lentes classificam-se como: lentes convergentes ou de potência positiva (raios de luz incidentes, paralelos entre si, convergem do outro lado da lente) e lentes divergentes ou de potência negativa (raios de luz incidentes, paralelos entre si, divergem do outro lado da lente).

Podemos definir dois tipos de lentes relativamente à sua espessura (distância que separa os dois dioptros, quando medido sobre o eixo ótico da lente): lentes delgadas e lentes espessas. De um modo geral, define-se lente delgada como sendo aquela cuja espessura é pequena em relação às distâncias normalmente associadas às suas propriedades óticas, como por exemplo o raio de curvatura, distância focal, diâmetro. Trata-se de uma simplificação que iremos considerar neste trabalho. Existe, para o caso das lentes delgadas, uma representação gráfica que decorre do facto de os dois dioptros se encontrarem praticamente em contacto. Assim, é possível substituir a nossa representação usual da lente por um traço perpendicular ao eixo ótico.



Os pontos focais e as distâncias focais para lente delgadas definem-se de acordo com o que está representado na figura seguinte. De acordo com o sentido positivo de propagação dos raios luminosos e a forma como eles incidem e são refractados pela lente, podemos relativamente a esta definir dois espaços, um situado à esquerda da lente designado por Espaço Objeto e outro situado à sua direita, designado por Espaço Imagem. Representam-se também: o Foco Imagem  $F_i$  (por vezes designado por  $F'$ ), o Foco Objeto  $F_o$  (por vezes designado por  $F$ ), a distância focal imagem  $f_i$  (por vezes designada por  $f'$ ) e a distância focal objeto  $f_o$  (por vezes designada por  $f$ ). Note-se que, caso o meio que se encontra do lado esquerdo da lente tenha o mesmo índice de refração que se encontra do outro lado, a distância  $f_o$  é igual a  $f_i$ .



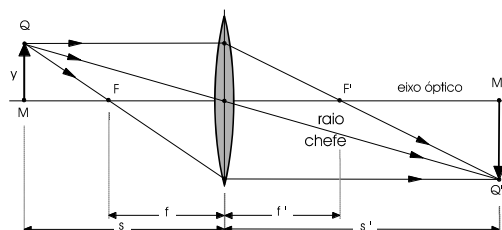
Para fabricar uma lente com uma determinada distância focal, é necessário saber com que raio de curvatura deve ser cortado o material da base, sabendo à partida o índice de refração do material. Para isso deve calcular-se o raio de curvatura que satisfaz a seguinte equação dos fabricantes de lentes (o raio de curvatura será positivo se o centro de curvatura se encontra à direita da superfície e negativo se se encontrar à esquerda):

$$P = \frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

Em termos de formação de imagem, qualquer par de pontos imagem e objeto constituem um par conjugado. Do mesmo modo, qualquer par de planos que sejam perpendiculares ao eixo ótico nos pontos objeto e imagem, constituem os planos conjugados. É possível definir para as lentes delgadas uma equação dos planos conjugados que relaciona as distâncias do objeto e da imagem à lente  $s$  e  $s'$  com a distância focal  $f$  do seguinte modo:

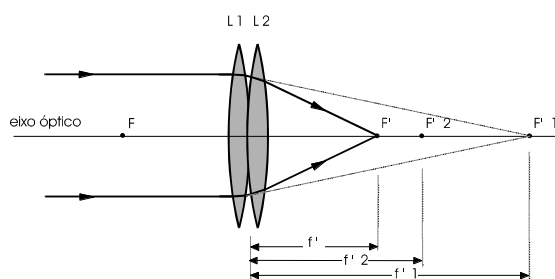
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = P \quad (6)$$

Através da equação dos planos conjugados é possível, a partir da posição do objeto e da potência da lente, determinar a posição onde se vai formar a imagem desse mesmo objeto. Esta equação considera como convenção de sinais que  $s$  é positivo à esquerda da lente e  $s'$  positivo à direita da lente.



As imagens formadas por lentes convergentes quando o objeto está para além do plano focal da lente são reais e podem ser visíveis num ecrã. Elas são caracterizadas pelo facto de os raios de luz que emergem da lente serem realmente convergentes num ponto do espaço imagem. Quando o objeto está entre o foco e o vértice de uma lente convergente ou quando utilizamos uma lente divergente, os raios emergentes divergem e não se cruzam num ponto. Para isso, temos que projetar os raios refratados para o espaço objeto e encontrar esse ponto. Neste caso temos uma imagem virtual. Ao contrário de uma imagem real, uma imagem virtual nunca será projetada num alvo.

Quando duas lentes delgadas são postas em contacto, a combinação irá atuar como uma única lente com dois pontos focais ( $F$  e  $F'$ ) simetricamente localizados em relação ao conjunto. Aplicando a equação dos planos conjugados no caso de ambas as lentes se encontrarem no ar, é possível obter a seguinte relação:



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \Leftrightarrow P = P_1 + P_2 \quad (7)$$

ou seja, a potência da combinação de lentes delgadas em contacto é igual à soma das potências de cada uma das lentes.

A determinação da posição da imagem de um objecto dada por uma lente pode ser facilmente obtida de uma forma geométrica tendo por base duas das três seguintes regras:

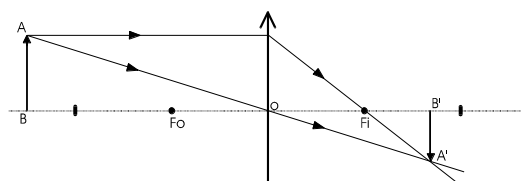
- Os raios luminosos que incidem na lente segundo a direção do centro ótico emergem sem sofrer qualquer desvio.
- Os raios luminosos que incidem na lente paralelamente ao seu eixo ótico emergem segundo a direção que passa pelo foco imagem.

- Os raios luminosos que incidem na lente segundo a direção do foco objeto emergem paralelamente ao eixo ótico.

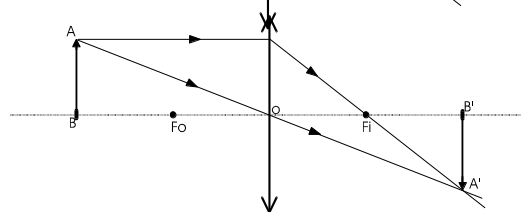
Este conjunto de três regras constitui a ferramenta base para a construção gráfica de imagem, sendo designado pelo método dos raios paralelos. De todos os raios possíveis, o mais importante, é aquele que parte da extremidade do objeto e passa pelo centro ótico da lente, emergindo sem sofrer qualquer desvio angular, e designado por raio chefe.

De seguida apresenta-se a construção da imagem segundo o método dos raios paralelos para alguns casos típicos. Para isso, iremos considerar objetos retilíneos situados sobre o eixo ótico da lente, perpendicularmente a este, e situados a diferentes distâncias relativamente à lente, que consideraremos primeiro positiva e depois negativa.

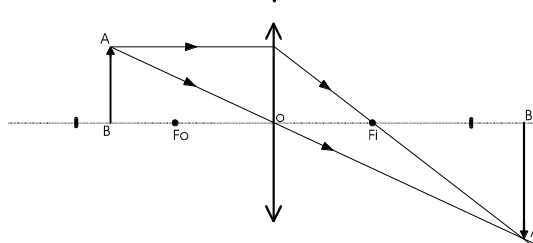
Para um objeto situado *além da dupla distância focal* obtém-se uma imagem real, invertida e menor que o objeto, estando situada entre o foco e a dupla distância focal.



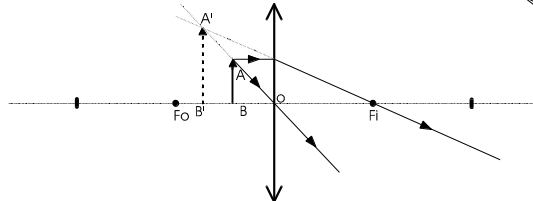
Para um objeto situado *sobre a dupla distância focal* obtém-se uma imagem real, invertida e do mesmo tamanho do objeto estando situada na dupla distância focal.



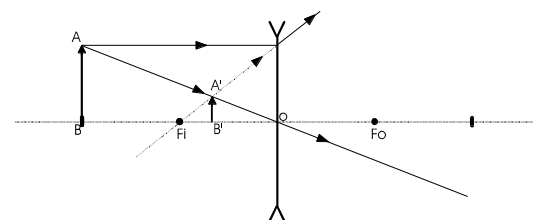
Para um objeto situado *entre a dupla distância focal e o foco* obtém-se uma imagem real, invertida e maior que o objeto formando-se para além da dupla distância focal.



Para um objeto situado *entre o foco e a lente* obtém-se uma imagem virtual, direita e maior que o objeto e situada no espaço objeto.



No caso das lentes negativas, obtém-se sempre, independentemente da posição do objeto, imagens virtuais, direitas relativamente ao objeto e mais pequenas que ele situadas no espaço objeto.



No caso de um sistema com mais de uma lente, o processo deverá ser sequencial, fazendo com que a imagem do objeto dada pela primeira lente se torne o objeto para a segunda lente, e assim sucessivamente.