

Cap. 1 Ótica Geométrica

Natureza da Luz:

- Luz como Onda
- Reflexão – Refração
- Lei de Snell
- Prismas – Dispersão

Natureza da Luz

Luz como Onda

A Luz é um ingrediente fundamental para a vida na Terra (fotossíntese).

A Luz tem carácter ondulatório (explica a interferência e difração) e corpuscular (explica reflexão e refração).

A Luz constitui parte do espetro eletromagnético. Propaga-se, com velocidade $c = 3 \times 10^8$ m/s, no vácuo.

Energia da radiação (fotão) : $E = hf$

$$h \text{ (Constante de Planck)} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

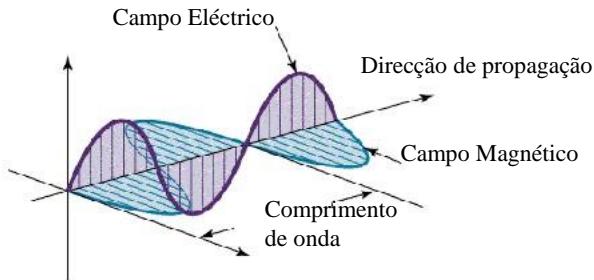
f = frequência

Natureza da Luz

A Luz é uma Onda Electromagnética

A luz propaga-se a uma velocidade

$$c = \lambda f \quad (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$$

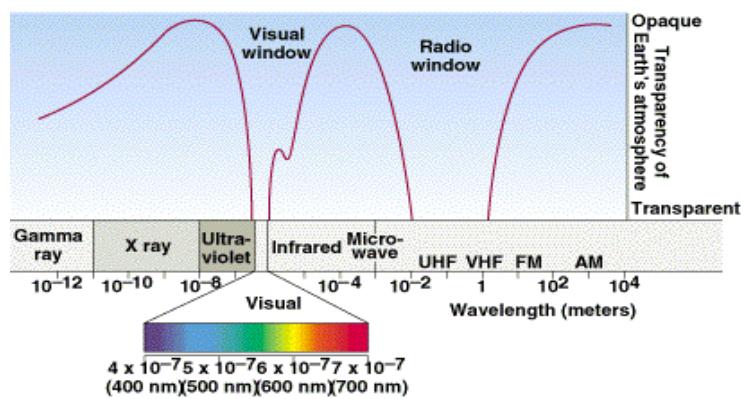


Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

3

Espetro Eletromagnético

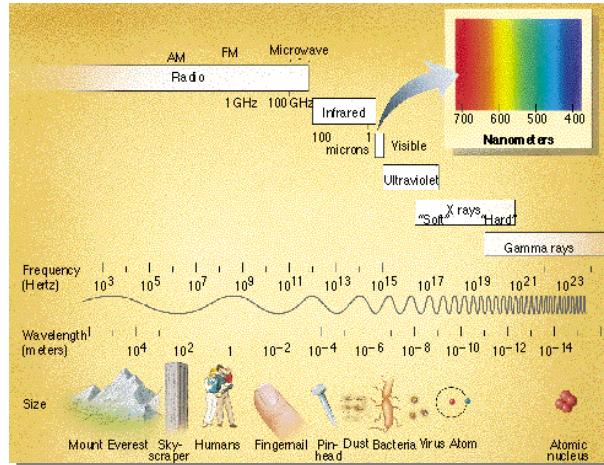


Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

4

Espetro Eletromagnético



Cap. 1: Ótica Geométrica

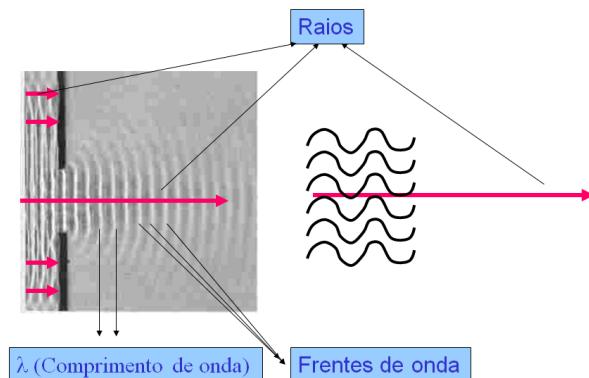
Elementos de Física
2017/2018 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

5

Interação da luz com a matéria

Conceito de Raios-Frente de Onda

Em ótica geométrica é conveniente representar a luz por raios, que indicam a direção e o sentido de propagação da onda.



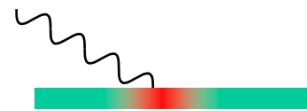
Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

6

Interação da luz com a matéria

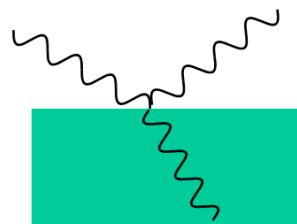
Absorvida



refletida



Refratada



Válido para comprimentos de onda << relativamente ao tamanho do objeto

Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018  universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

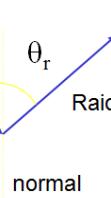
7

Interação da luz com a matéria

Reflexão da Luz

$$\theta_i = \theta_r$$

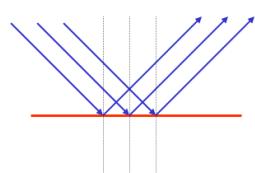
Raio incidente



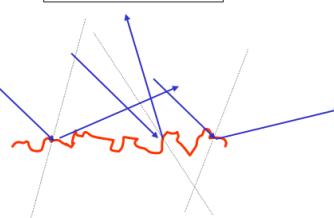
θ_i – ângulo de incidência

θ_r – ângulo de reflexão

Reflexão especular



Reflexão difusa



Cap. 1: Ótica Geométrica

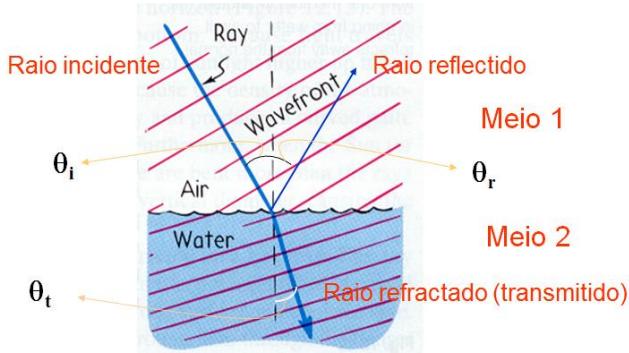
Elementos de Física
2017/2018  universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

8

Interação da luz com a matéria

Quando a luz passa de um meio para outro:

- A sua velocidade altera-se
- Os raios transmitidos são desviados : Refratados



Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018  universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

9

Interação da luz com a matéria

Índice de Refração

O ângulo de refração depende das propriedades do

$$\text{sen}(\theta_r) = \frac{v_2}{v_1} \text{sen}(\theta_i)$$

dois meios e do ângulo de incidência:

O **Índice de refração** dum meio é a razão entre as velocidades da luz no vazio e no meio

$$n_i = \frac{c}{v_i}$$

$$v_i = \frac{c}{n_i} \Rightarrow \text{sen}(\theta_t) = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}(\theta_i)$$

Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018  universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

10

Interação da luz com a matéria

Substância	Índice de refracção
Diamante	2.419
Vidro	1.66
Gelo	1.31
Cloreto de Sódio	1.544
Benzeno	1.501
Álcool etílico	1.361
Glicerina	1.473
Água	1.333
Ar	1.000293
Dióxido de Carbono	1.00045

Sólidos
a 20°C

Líquidos
a 20°C

Gases a
0°C e 1
atm

Refração

Lei de Snell

$$n_2 \sin(\theta_t) = n_1 \sin(\theta_i)$$

Para qualquer onda:

$$v_i = \lambda_i f$$

e

$$n_i = \frac{c}{v_i}$$

logo

$$v_1 n_1 = v_2 n_2 \Rightarrow \lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$$

Importante:

- Como as ondas mecânicas, a frequência da luz é constante.
- Só muda o comprimento de onda e a velocidade.

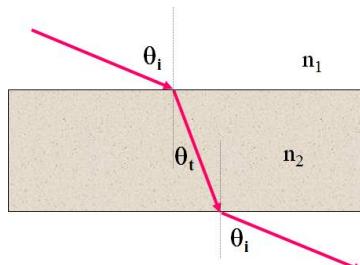
Refração

Consequência da Lei de Snell:

Quando a luz passa de um meio de índice de refração n_1 para um meio de índice de refração n_2 os raios refratados

aproximam-se da normal se:

$$n_2 > n_1 \Rightarrow \sin(\theta_t) < \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_i)$$
$$\theta_t < \theta_i$$



Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018  universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

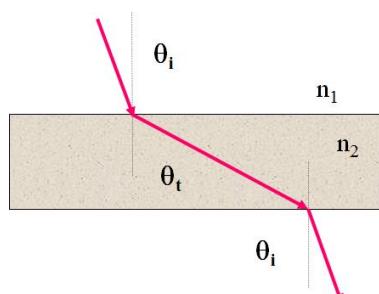
13

Refração

Quando a luz passa de um meio de índice de refração n_1 para um meio de índice de refração n_2 os raios refratados

afastam-se da normal se:

$$n_2 < n_1 \Rightarrow \sin(\theta_t) > \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_i)$$
$$\Rightarrow \theta_t > \theta_i$$



Cap. 1: Ótica Geométrica

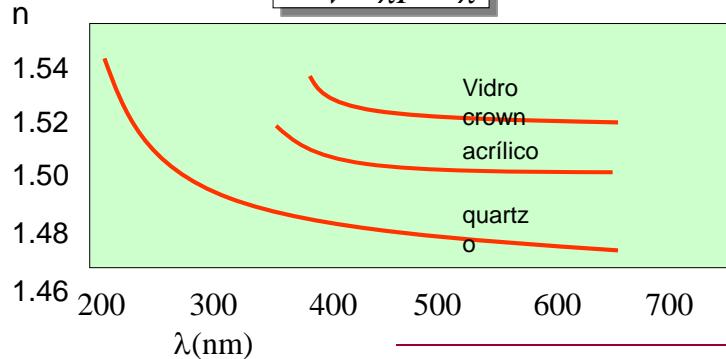
Elementos de Física
2017/2018  universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

14

Índice de Refração

Para uma determinada substância, o índice de refração é função inversa do comprimento de onda.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{c}{\lambda T} = \frac{cf}{\lambda}$$



Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

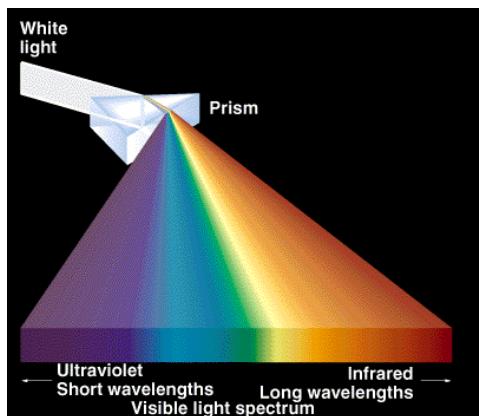
15

Dispersão da luz

Prismas

Por isso os prismas decompõem a Luz Branca:

Dispersão



©Brooks/Cole Publishing Company/ITP

Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

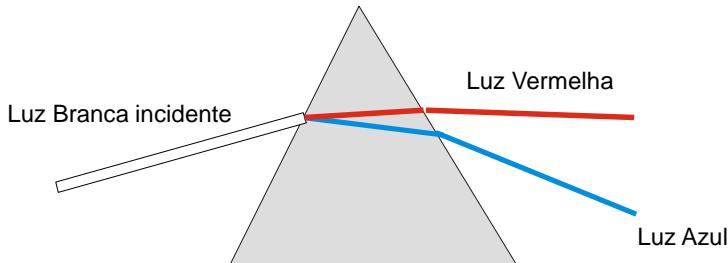
16

Dispersão da luz

Prismas-Dispersão

A Luz Vermelha que tem um comprimento de onda maior e menos desviada que a Luz Azul

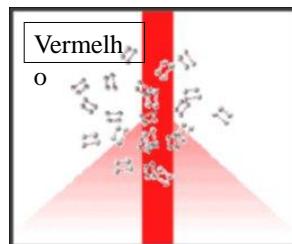
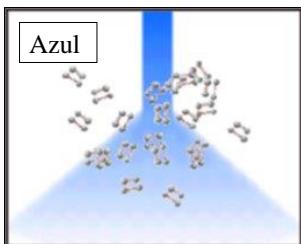
$$\lambda_{verm.} > \lambda_{azul} \Leftrightarrow n_{verm.} < n_{azul}$$



Dispersão da luz

O Azul do Céu

Devido às partículas da atmosfera a luz do sol é sofre uma dispersão, mas como vimos este dispersão é maior para os comprimentos de onda curtos, ou seja, para os azul comparados com os vermelhos.



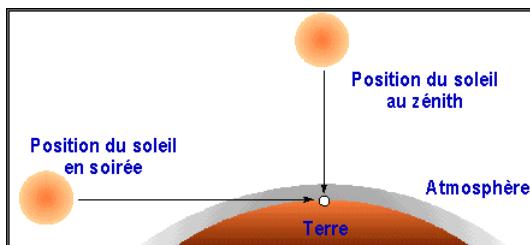
Perto do meio dia o céu é azul, enquanto a luz proveniente diretamente do sol (ou seja o sol), à qual falta a componente azul, é mais amarela.

Dispersão da luz

O Azul do Céu

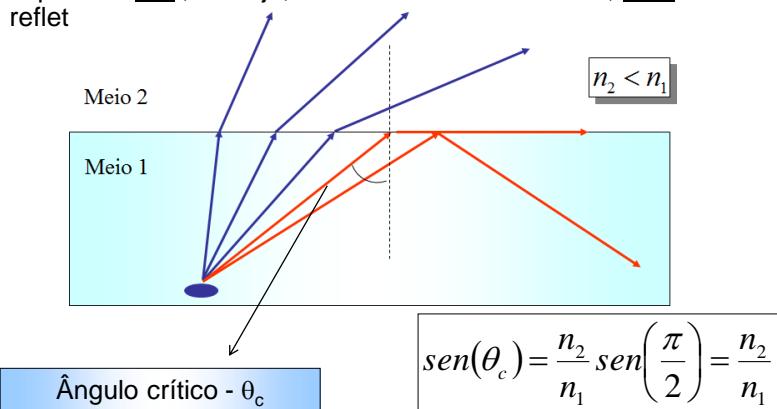
Ao fim do dia os raios de sol atravessam uma espessura de atmosfera maior que ao meio dia, a dispersão é mais importante. Esta espessura é suficiente para dispersar além do azul, o verde e uma parte do amarelo.

O céu é agora mais rose e o sol mais laranja.



Reflexão Interna Total

A reflexão interna total ocorre quando o ângulo de refração é superior a 90°, ou seja, não há transmissão de luz, toda a luz é refletida.



Ótica Geométrica

Convenções e Notações

p Distância do Objeto ao elemento ótico

q Distância do elemento Ótico à Imagem

h Altura do Objeto

h' Altura da Imagem

$m = h' / h$ Ampliação lateral

f Distância focal do elemento ótico.

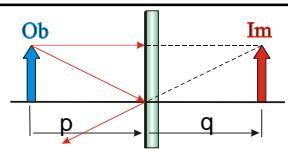
R Raio de curvatura da interface esférica.

Todas estas grandezas podem ser positivas ou negativas

Tipos de Espelho

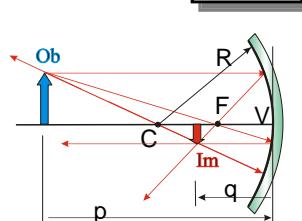
Plano

$$f = \frac{R}{2} = \infty \Rightarrow q = -p$$



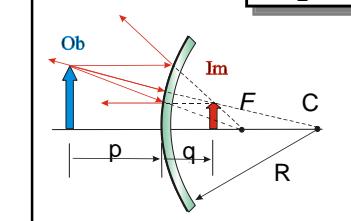
Côncavo

$$f = \frac{R}{2} > 0$$



Convexo

$$f = \frac{R}{2} < 0$$

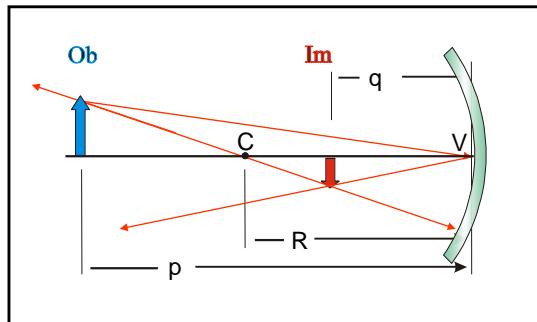


Imagens formadas por reflexão

Espelhos côncavos

Para obter a imagem criada por um espelho esférico precisamos de dois raios:

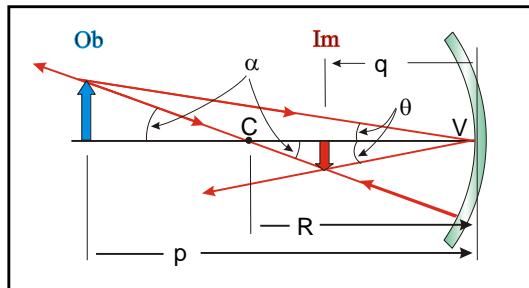
- Um incide no espelho **no vértice V** e reflecte-se com o mesmo ângulo θ .
- O outro passa pelo **centro de curvatura, C**, incide perpendicularmente ao espelho e é reflectido sobre si próprio.



Cap. 1: Ótica Geométrica

Imagens formadas por reflexão

Espelhos côncavos



$$\tan \alpha = \frac{h}{p-R}$$

$$\tan \alpha = -\frac{h'}{R-q}$$

$$\frac{h'}{h} = -\frac{R-q}{p-R}$$

mas

$$\frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$



$$\frac{h'}{h} = -\frac{R-q}{p-R} = -\frac{q}{p}$$

Cap. 1: Ótica Geométrica

Espelhos côncavos

Equação dos espelhos

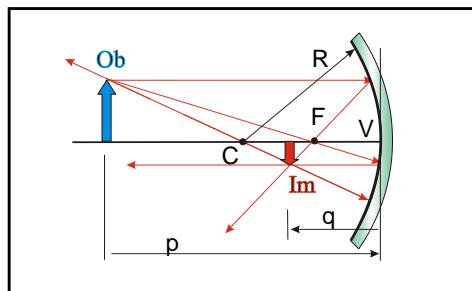


$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

Onde f é a **Distância focal** do espelho

O ponto F distante do espelho de f é o Foco

$$f = \frac{R}{2}$$

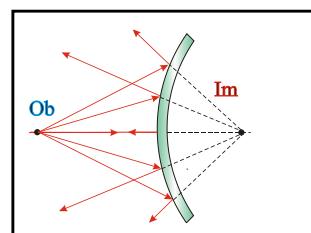
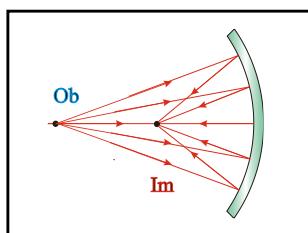


Ponto focal

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

A posição da imagem de um Objeto formada por reflexão não depende do raio incidente considerado.

Todos os raios considerados convergem no mesmo ponto !



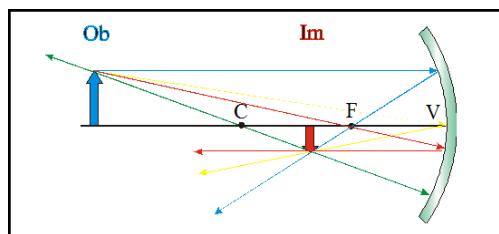
Construção de Imagens

Qualquer que seja o elemento Ótico, 2 raios são suficiente para construir a imagem.

Raios

1. Paralelo ao eixo Ótico e é refletido através do foco.
2. Passa pelo foco e é refletido paralelamente ao eixo.
3. Passa pelo centro de curvatura e é refletido sobre si próprio.
4. Bate no vértice e é refletido simetricamente.

Ex:



Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

27

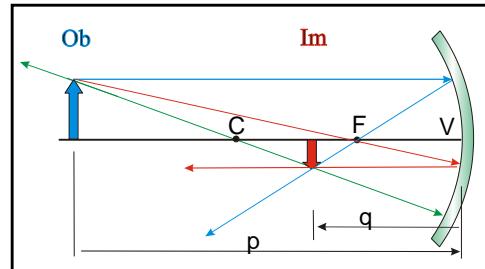
Espelhos côncavos

Objeto antes do Foco($p>f$)

Imagen Real

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} < 0$$

$$p > 0 \text{ e } q > 0$$

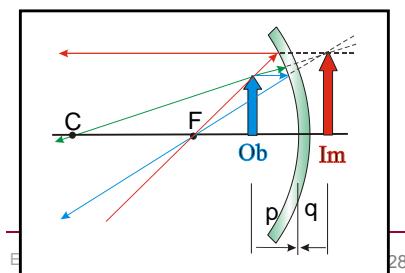


Objeto entre o Foco e o espelho ($p<f$)

Imagen Virtual

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Cap. 1: Ótica Geométrica

2017/2018 teoria poiesis praxis

28

Espelhos Convexos

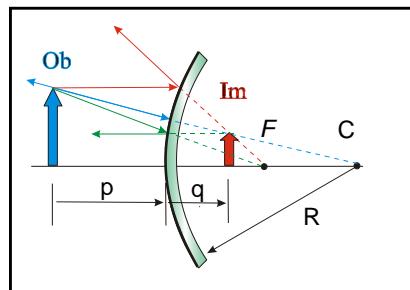
Qualquer que seja a posição de um Objeto Real criam uma Imagen virtual.

Mas!!! De um Objeto virtual criam uma Imagen real.

Imagens Virtuais

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Espelhos planos

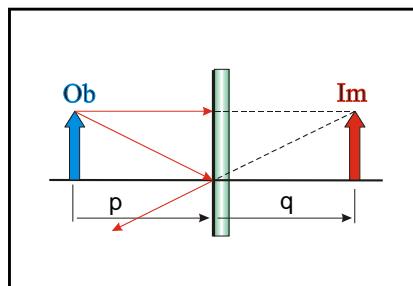
Qualquer que seja a posição de um Objeto Real criam uma Imagen virtual.

Mas!!! De um Objeto virtual criam uma Imagen real.

Imagens Virtuais

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Conjunto de Espelhos

Vamos ver agora as imagens formadas por um conjunto de dois espelhos.

Conceitos iniciais (validos também para as lentes):

- Temos dois Objetos e duas imagens.
- O primeiro espelho cria do Objeto Ob_1 uma imagem Im_1 .
- Este imagem torna-se o Objeto para o segundo espelho:
 $Im_1=Ob_2$
- O segundo espelho forma então a segunda e ultima imagem, Im_2 .

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} = \frac{2}{R_1}$$

Formação da primeira imagem Im_1 pelo espelho 1.

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} = \frac{2}{R_2}$$

Formação da segunda imagem Im_2 pelo espelho 2 sendo o Objeto a imagem Im_1 .



Conjunto de Espelhos

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} = \frac{2}{R_1}$$

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} = \frac{2}{R_2}$$

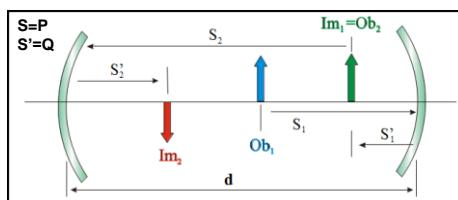
Equação de ligação

$$p_2 = d - q_1$$

Equação válida sempre,
qualquer que sejam os
elementos Óticos.

Ampliação lateral

$$m = m_1 \cdot m_2 = \left(-\frac{q_1}{p_1} \right) \cdot \left(-\frac{q_2}{p_2} \right) = \frac{h'}{h}$$



Imagens formadas por refração

Dois meios transparentes, índices de refração n_1 e n_2 :

$$n_2 > n_1$$

Superfície esférica de raio R (Interface entre os meios)

Aproximação de raios para-axiais, (θ pequenos, raios próximos do eixo Ótico)

$$\begin{cases} \sin \theta \approx \theta \\ \tan \theta \approx \theta \end{cases}$$

Aplicada à Lei de Snell:

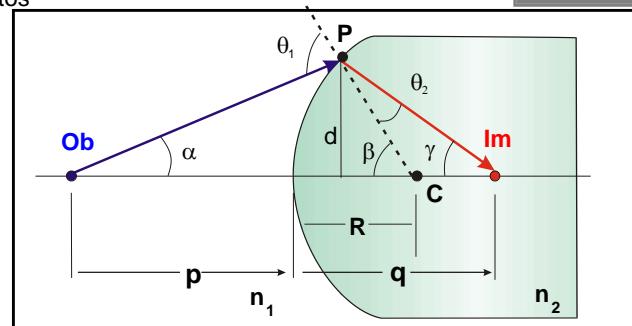
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$

Imagens formadas por refração

Aplicando aos triângulos OPC e PIC, a propriedade de o ângulo exterior a um triângulo ser igual a soma dos ângulos opostos

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha + \beta \\ \beta &= \theta_2 + \gamma \end{aligned}$$



$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$$



$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta$$

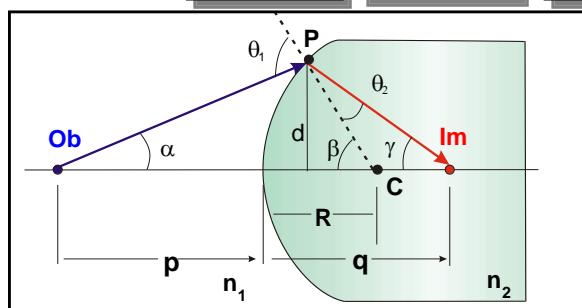
Imagens formadas por refração

Para ângulos pequenos.

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{d}{p}$$

$$\tan \beta \approx \beta \approx \frac{d}{R}$$

$$\tan \gamma \approx \gamma \approx \frac{d}{q}$$



$$n_1 \alpha + n_2 \gamma = (n_2 - n_1) \beta$$



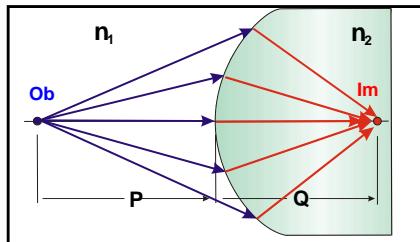
$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{(n_2 - n_1)}{R}$$

Equação das interfaces refratoras

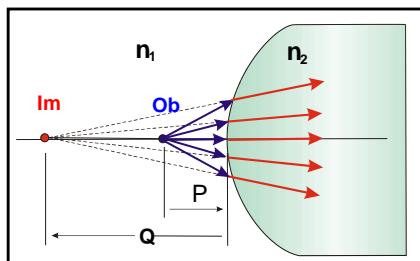
Imagens formadas por refração

A posição da imagem de um objecto formada por refração (como no caso da reflexão) não depende do raio incidente considerado.

Todos os raios considerados convergem no mesmo ponto !



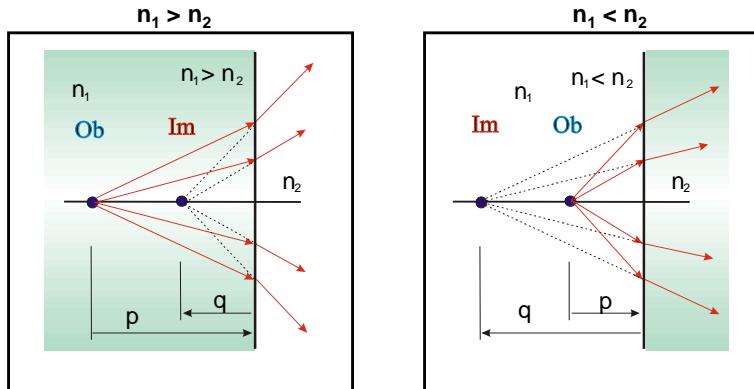
$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{(n_2 - n_1)}{R}$$



Imagens formadas por refração

Caso particular: Superfícies planas

$$R = \infty \Rightarrow q = -p \frac{n_2}{n_1}$$



Cap. 1: Ótica Geométrica

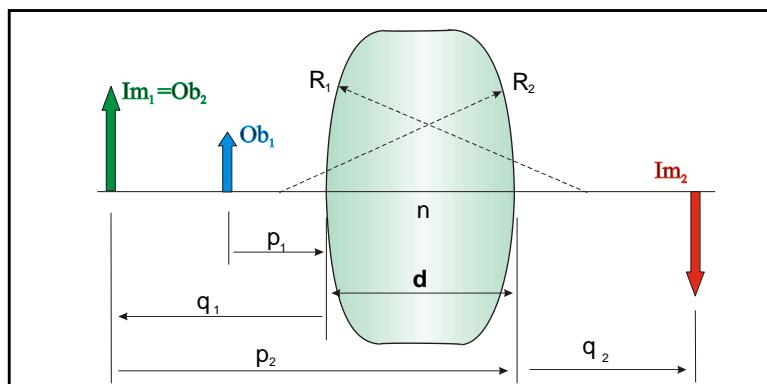
Elementos de Física
2017/2018
 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

37

Imagens formadas por refração

Considera-se uma lente, de índice n , constituída de duas superfícies esféricas de raios R_1 e R_2 . O objeto está perto da lente.

A primeira interface produz a imagem Im_1 . Este imagem torna-se o objecto, Ob_2 , para a segunda interface, que assim produz a imagem Im_2



Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

38

Imagens formadas por refração

Assim temos para a 1^a interface (Ob₁ - Im₁):

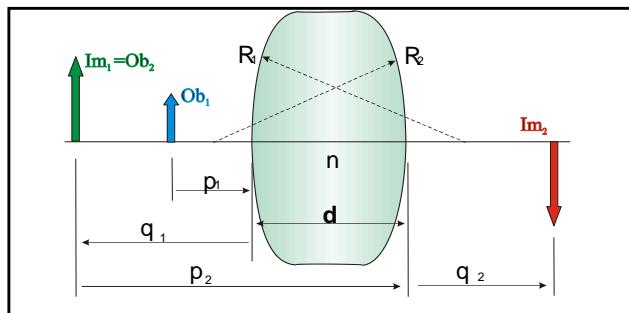
para a 2^a interface (Ob₂ - Im₂):

$$\frac{n}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1-n}{R_2}$$

$$\frac{1}{p_1} + \frac{n}{q_1} = \frac{n-1}{R_1}$$

Equação de ligação

$$p_2 = d - q_1$$



Cap. 1: Ótica Geométrica

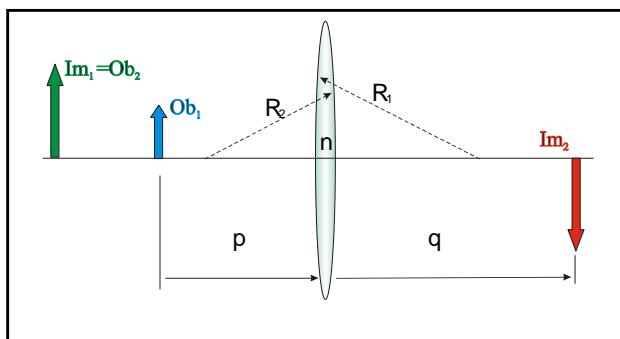
Lentes Finas

Na aproximação das Lentes Finas considera-se que $d \approx 0$:

$$p_2 = -q_1$$

$$\rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f}$$

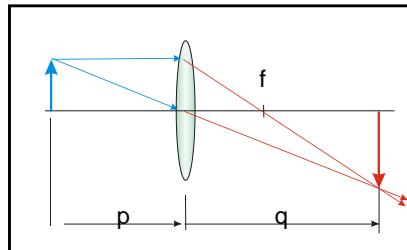
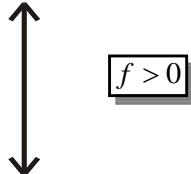
Equação
dos fabricantes de Lentes



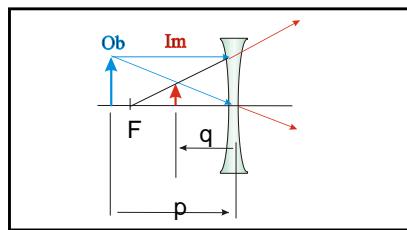
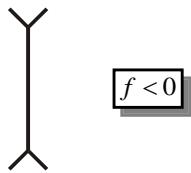
Cap. 1: Ótica Geométrica

Lentes Finas

Lentes Convergentes



Lentes Divergentes



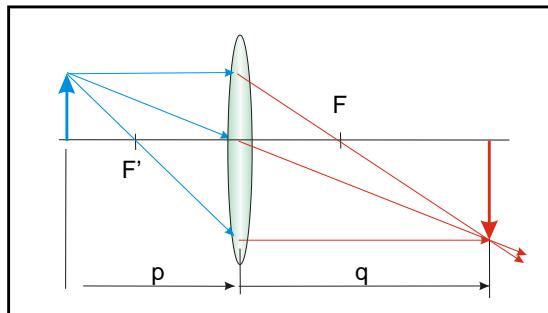
Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
universidade de aveiro
41
theoria poiesis praxis

Lentes Convergentes

1. Paralelo ao eixo óptico e é refratado através do foco, F.
2. Passa pelo foco F' e é refratado paralelamente ao eixo.
3. Passa pelo centro da lente não é desviado.

Ex:



Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

42

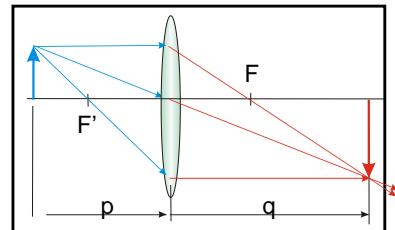
Lentes Convergentes

Objeto antes do foco, F' ($p > f$)

Imagen Real

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} < 0$$

$$p > 0 \text{ e } q > 0$$

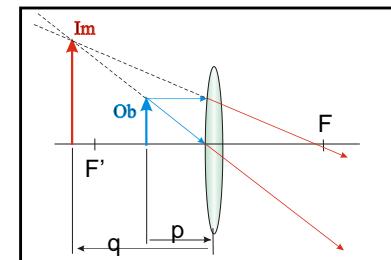


Objeto entre do foco, F' e a lente ($p < f$)

Imagen Virtual

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} > 0$$

$$p > 0 \text{ e } q < 0$$



Cap. 1: Ótica Geométrica

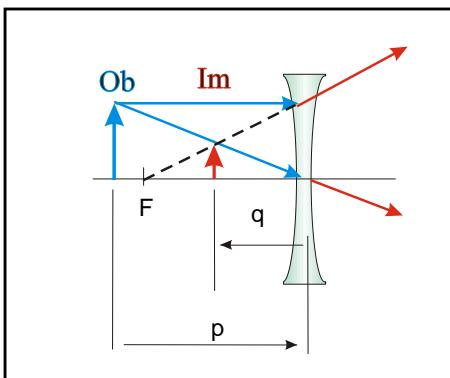
Elementos de Física
2017/2018
 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

43

Lentes Divergentes

Qualquer que seja a posição de um Objeto Real criam uma Imagen virtual.

Mas!!! De um Objeto virtual criam uma Imagen real.



Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
 universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

44

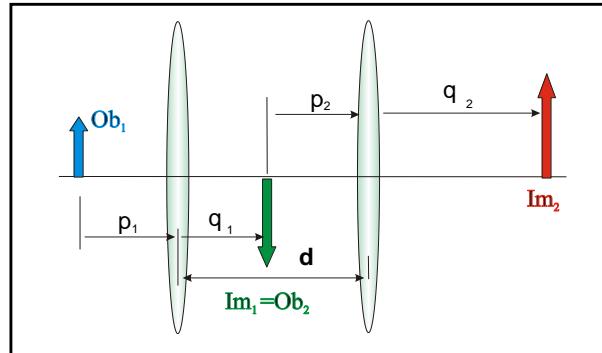
Conjunto de Lentes

A primeira lente cria do objeto Ob_1 , uma imagem Im_1 , que se torna o objeto da segunda lente $Im_1=Ob_2$.

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1}$$

$$p_2 = d - q_1$$

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2}$$



Conjunto de Lentes

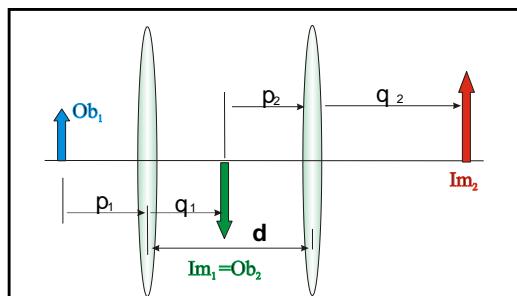
Equação de ligação

$$p_2 = d - q_1$$

Equação valida sempre que os elementos óticos.

Ampliação lateral

$$m = m_1 \cdot m_2 = \left(-\frac{q_1}{p_1} \right) \cdot \left(-\frac{q_2}{p_2} \right) = \frac{h'}{h}$$

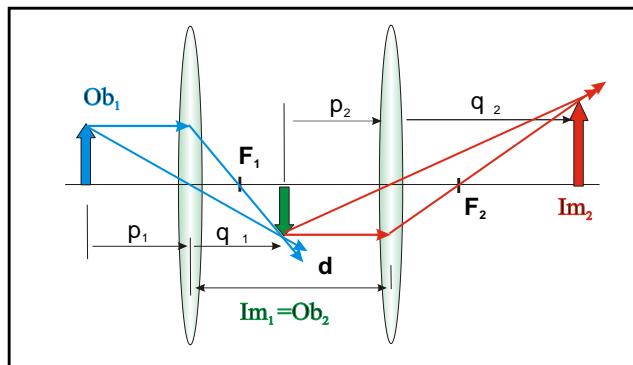


Conjunto de Lentes

I_1 real – Ob_2 real – I_2 real

$p_1 \text{ e } q_1 > 0$

$p_2 \text{ e } q_2 > 0$



$m_1 < 0 ; m_2 < 0 ; m > 0$

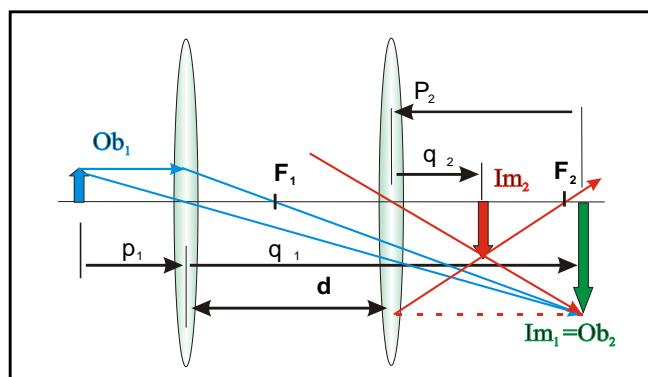
Cap. 1: Ótica Geométrica

Conjunto de Lentes

I_1 real – Ob_2 virtual – I_2 real

$p_1 \text{ e } q_1 > 0$

$p_2 < 0 \text{ e } q_2 > 0$



$m_1 < 0 ; m_2 > 0 ; m < 0$

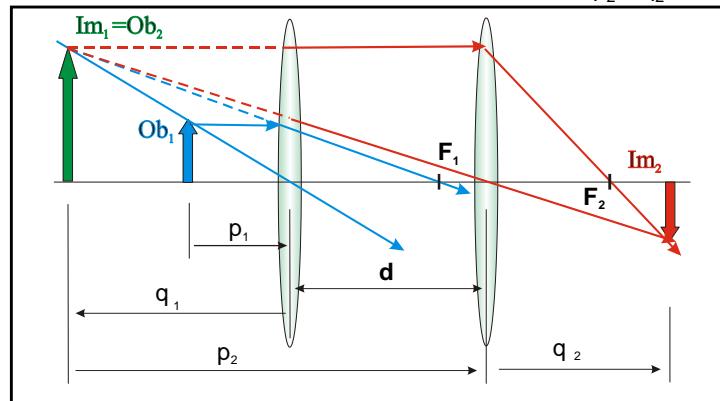
Cap. 1: Ótica Geométrica

Conjunto de Lentes

I_1 virtual – Ob_2 real – I_2 real

$p_1 > 0$ e $q_1 < 0$

p_2 e $q_2 > 0$



$m_1 > 0$; $m_2 < 0$; $m < 0$

Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018



universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

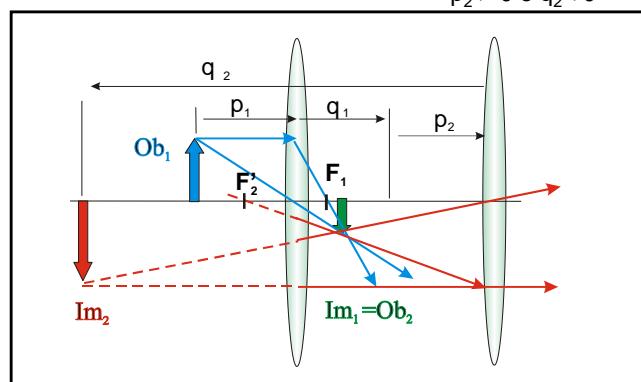
49

Conjunto de Lentes

I_1 real – Ob_2 real – I_2 virtual

$p_1 > 0$ e $q_1 > 0$

$p_2 > 0$ e $q_2 < 0$



$m_1 < 0$; $m_2 > 0$; $m < 0$

Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018



universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

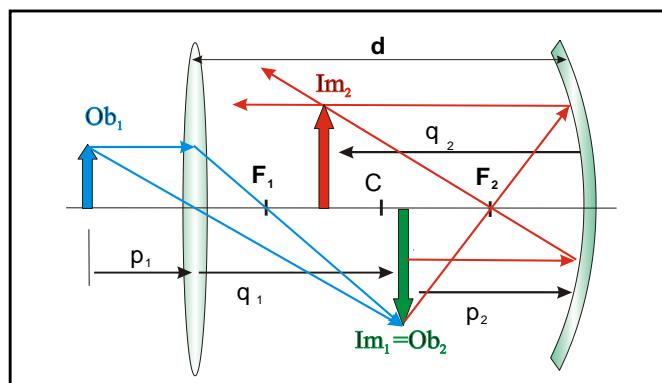
50

Conjunto de Elementos Óticos

I_1 real – Ob_2 real – I_2 real

$p_1 \in q_1 > 0$

$p_2 \in q_2 > 0$



$m_1 < 0 ; m_2 < 0 ; m > 0$

Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

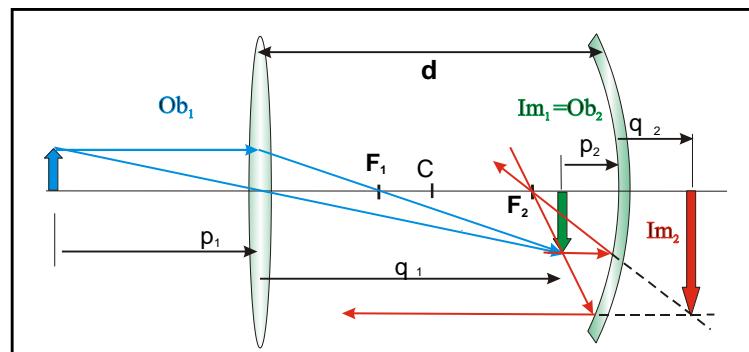
51

Conjunto de Elementos Óticos

I_1 real – Ob_2 real – I_2 virtual

$p_1 \in q_1 > 0$

$p_2 > 0 \in q_2 < 0$



$m_1 < 0 ; m_2 > 0 ; m < 0$

Cap. 1: Ótica Geométrica

Elementos de Física
2017/2018
universidade de aveiro
teoria poiesis praxis

52