



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

“PPE6408 – Tópicos Especiais de Física”

Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Escola de Engenharia de Lorena (EEL)

Universidade de São Paulo (USP)

Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970

durval@demar.eel.usp.br

www.eel.usp.br – Comunidade – Alunos (Página dos professores)

Área I
Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Tel. (12) 3159-5007/3153-3209

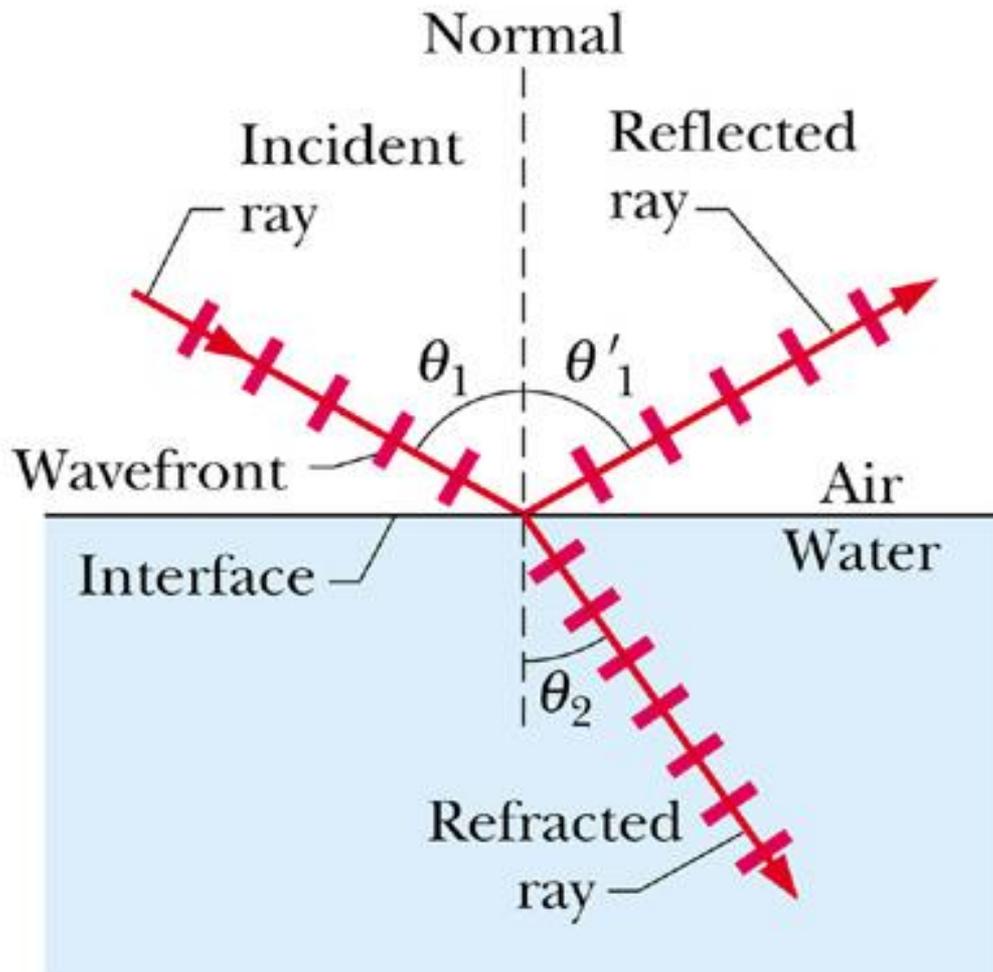
USP Lorena
www.eel.usp.br

Área II
Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Tel. (12) 3159-9900

UNIDADE 3 -

Imagens e Espelhos

34-3 | Espelhos Planos



Lei da Reflexão:

$$\text{Reflexão: } \theta'_1 = \theta_1$$

Lei de Snell:

$$\text{Refração: } n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

34-3 | Espelhos Planos



Testemunhas se protegem no escuro

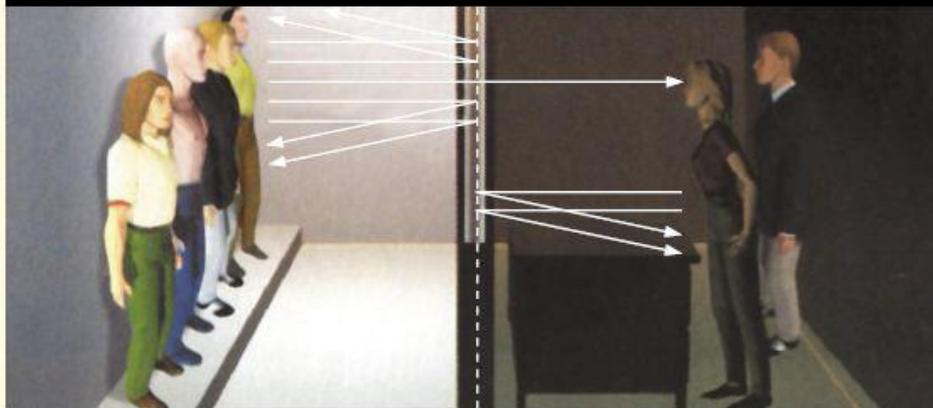
Como funcionam aqueles espelhos que refletem de um lado e são transparentes do outro?

Você já deve ter visto um desses nos filmes policiais, em cenas de interrogatório ou quando a vítima é convidada a reconhecer os suspeitos de um crime. De um lado os policiais e os cidadãos vêem tudo o que acontece do outro, como se fosse um vidro comum. No lado de lá, o criminoso só consegue enxergar sua imagem refletida.

O truque é usar espelhos semitransparentes. “Eles refletem 80% da luz que recebem como um espelho comum, mas deixam passar 20% para o outro lado”, explica o físico Cláudio Furukawa, da Universidade de São Paulo (SP). O ambiente onde ficam os suspeitos é superiluminado, transferindo parte da luminosidade para o lado oposto. Por isso, os policiais podem observar tudo o que acontece lá. Já a sala das testemunhas é quase escura. Desse jeito, a maior parte da sua luz rebate no espelho e nada passa pelo vidro. Muitos filmes falham ao retratar a sala das testemunhas bem-iluminada. Na verdade ela é sombria.

O vaivém da luz

O segredo é apagar as lâmpadas de um dos lados



O lado dos suspeitos é iluminado. Vários raios de luz incidem sobre o espelho semitransparente e alguns conseguem ultrapassá-lo, chegando aos olhos das testemunhas, do outro lado.

As testemunhas e os policiais ficam no escuro para reconhecer os suspeitos. Como há pouca luz, o espelho reflete toda a imagem e não deixa que ela alcance o lado oposto.

34-3 | Espelhos Planos



Espelho, espelho meu...

De que são feitos os espelhos? Como eles refletem as imagens?

(Luciana Amaral, Belo Horizonte, MG)

Os espelhos são feitos pela deposição de uma fina solução, em geral nitrato de prata, sobre uma face polida, limpa e plana de vidro. Vários outros objetos também refletem imagens. Mas a diferença é que os espelhos refletem maior quantidade de luz. A imagem que se vê em um deles depende de vários fatores, como a qualidade de material usado, o ângulo de incidência do objeto e o polimento da superfície. Mas mesmo os melhores modelos não refletem mais que 90% da luminosidade recebida.

Para transformar vidro em espelho, deve-se jatear a solução de prata sobre ele. Isso faz com que ela reaja com certos componentes do vidro, principalmente os óxidos de alumínio, sódio, potássio, cálcio e silício. Essa reação, chamada de oxirredução química, faz com que o nitrato de prata se fixe no vidro, permitindo a reflexão das imagens.

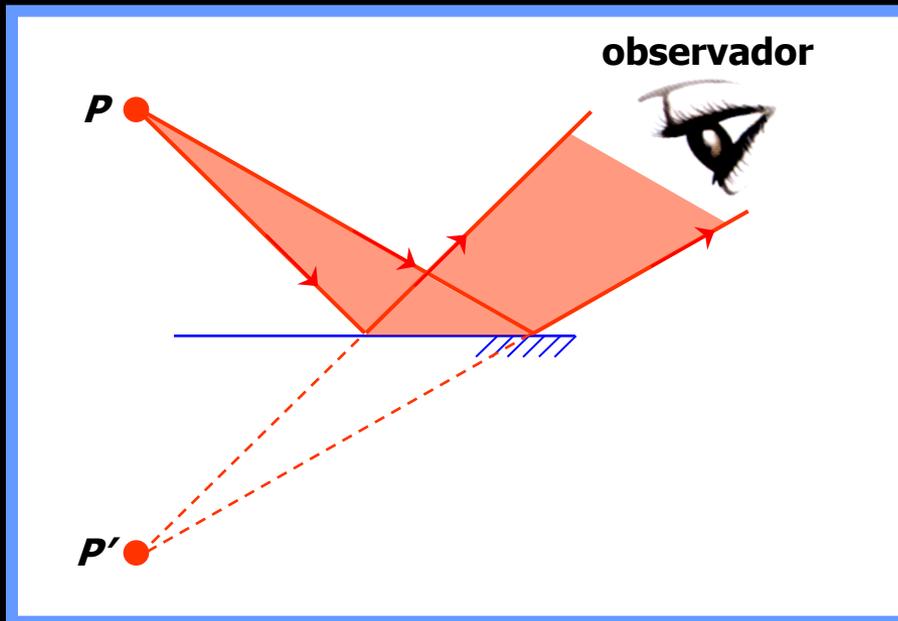
Fonte: Eli Ogata, analista químico da Cristal Plano Ltda, fabricante de espelhos, em Jacaref, SP.



O segredo está na reflexão da luz.

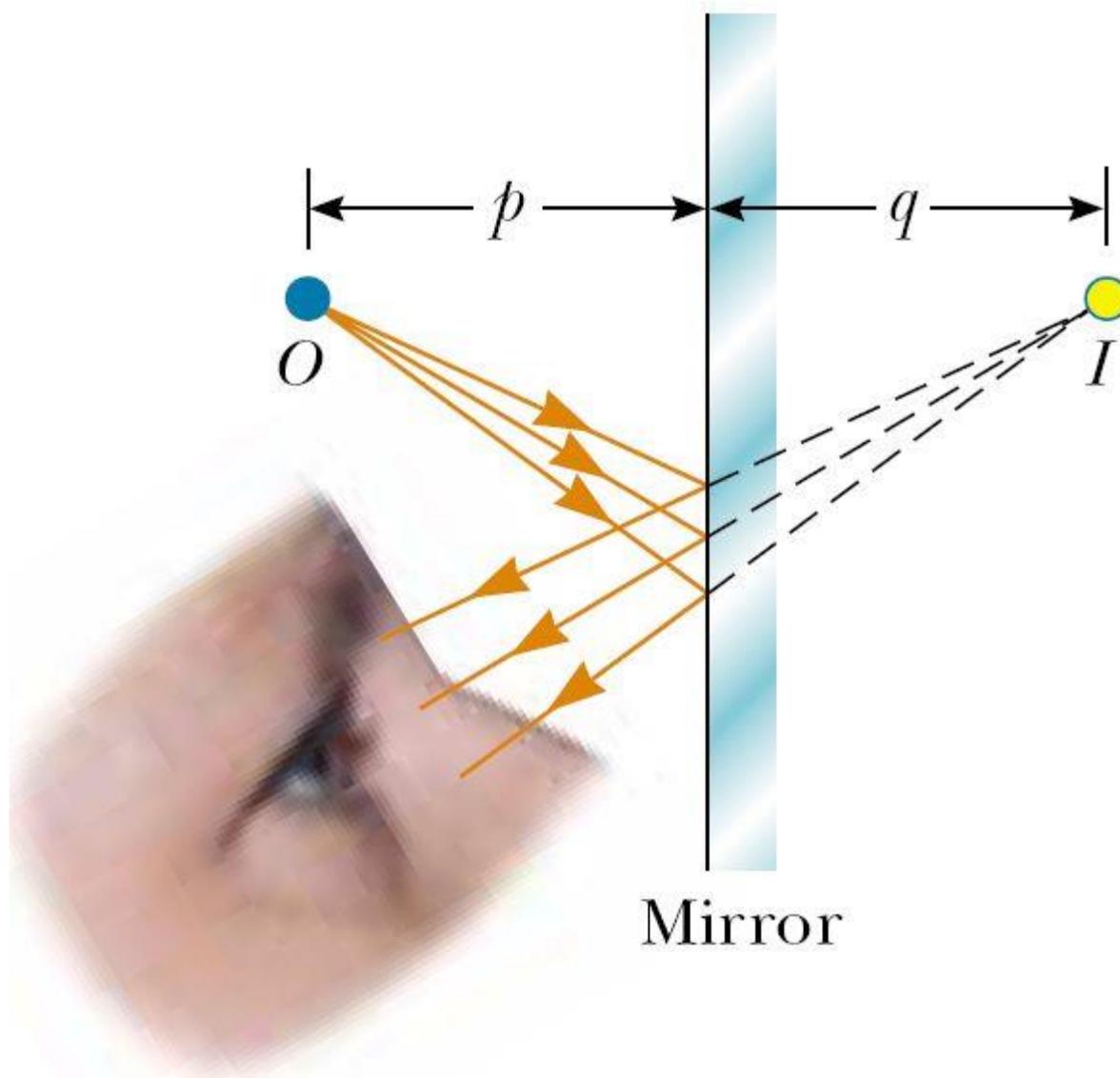
Formação de Imagem em um Espelho Plano

- Os raios de luz enviados pelo objeto incidem sobre o espelho, são refletidos e atingem os olhos do observador. Como a mente humana não está preparada para “desentortar” raios de luz, para ele tudo se passa como se esses raios fossem enviados por um ponto (P') que se encontra atrás do espelho.

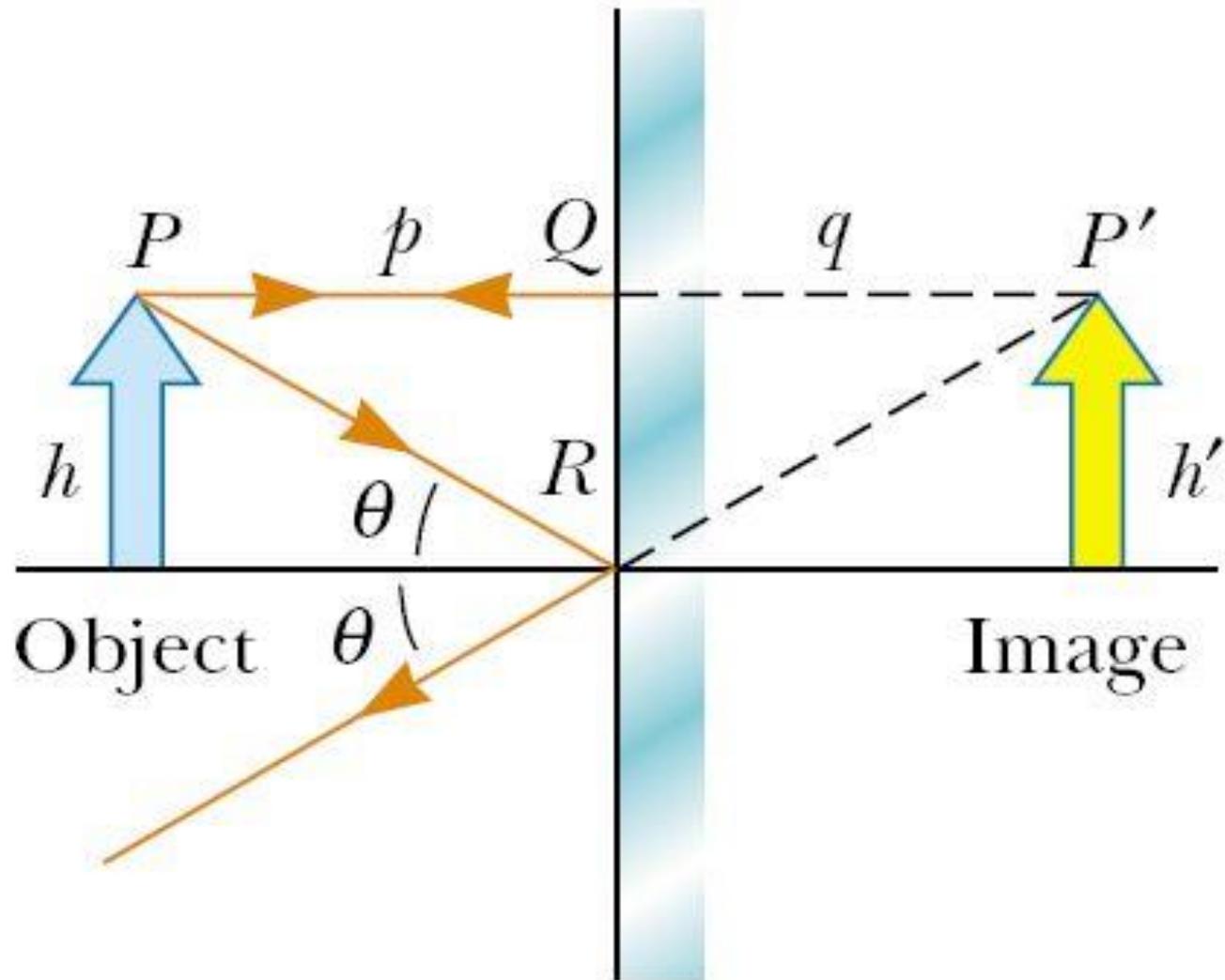


Objeto Real → Imagem Virtual

34-3 | Espelhos Planos

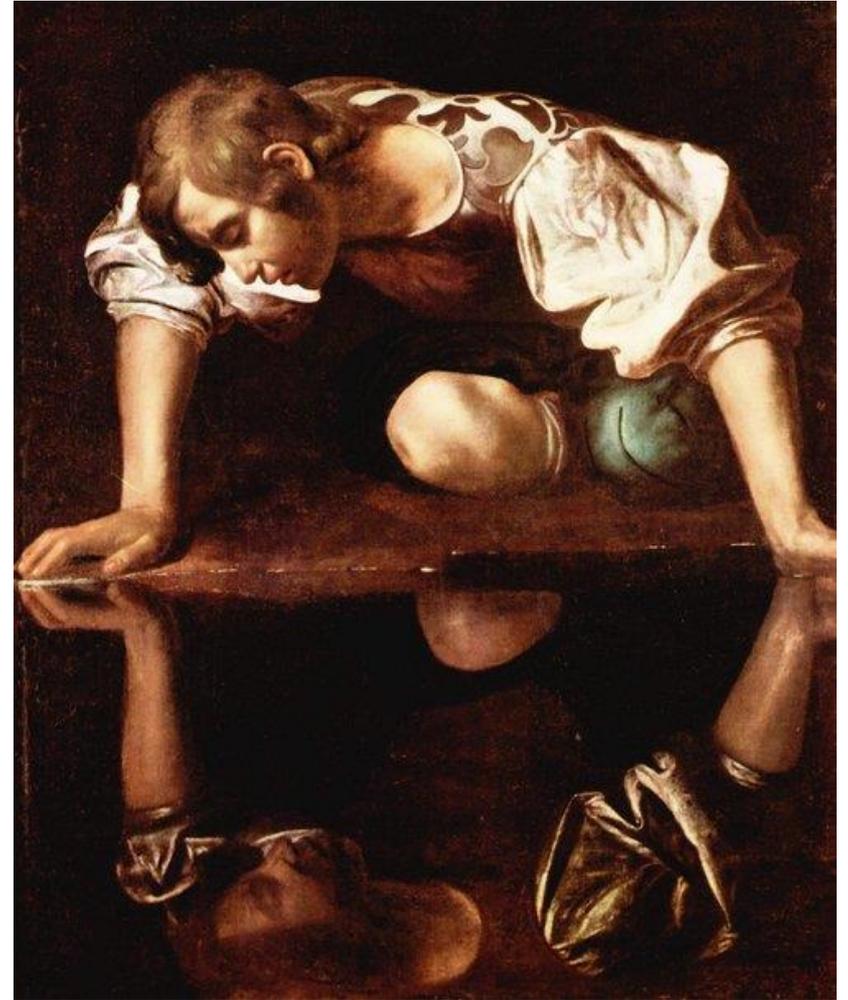


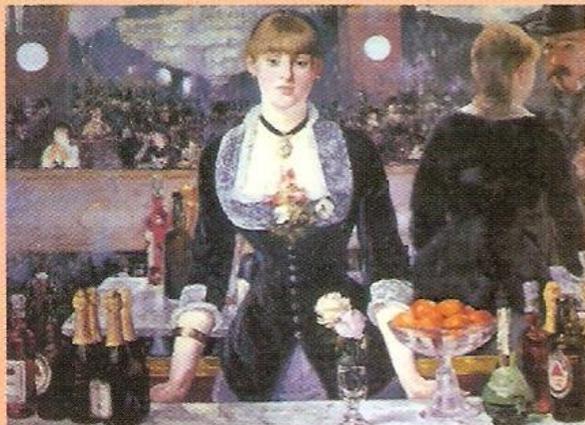
34-3 | Espelhos Planos



Capítulo 34: Imagens

34-3 | Espelhos Planos





MUSEU

Olha o erro neste quadro!

É, a lei da reflexão da luz foi violada...



SAÍDA

...na verdade, desde o ensaio!



Propriedade Fundamental do Espelho Plano

No espelho plano, objeto e imagem são simétricos em relação ao espelho.

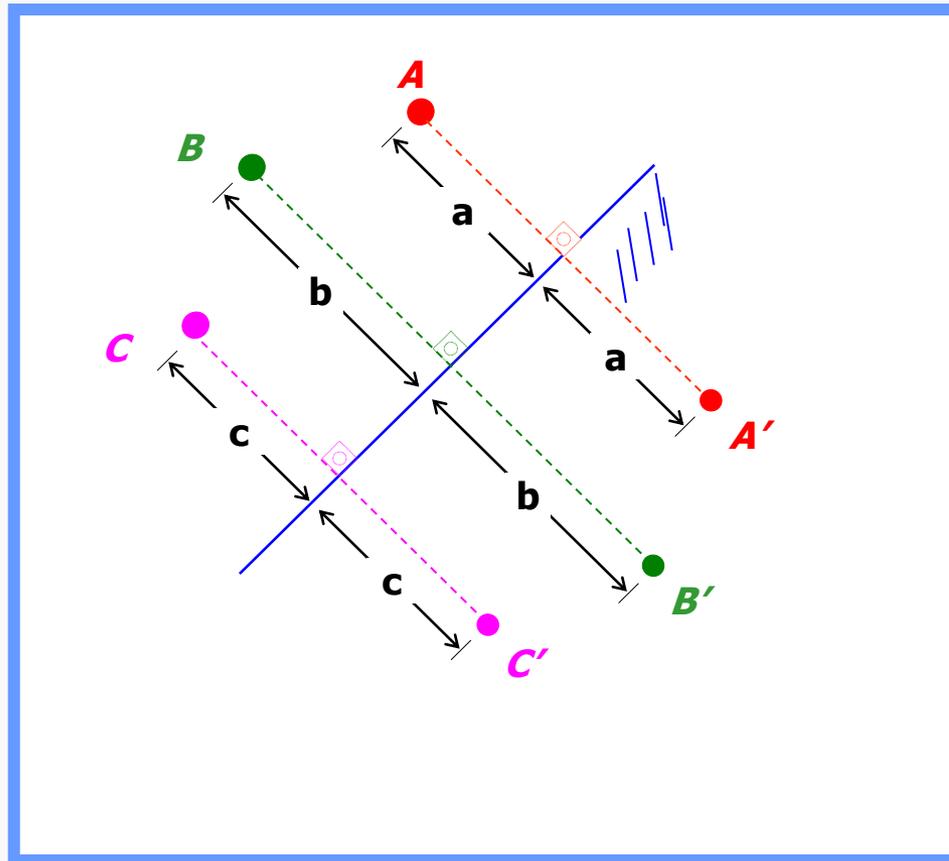
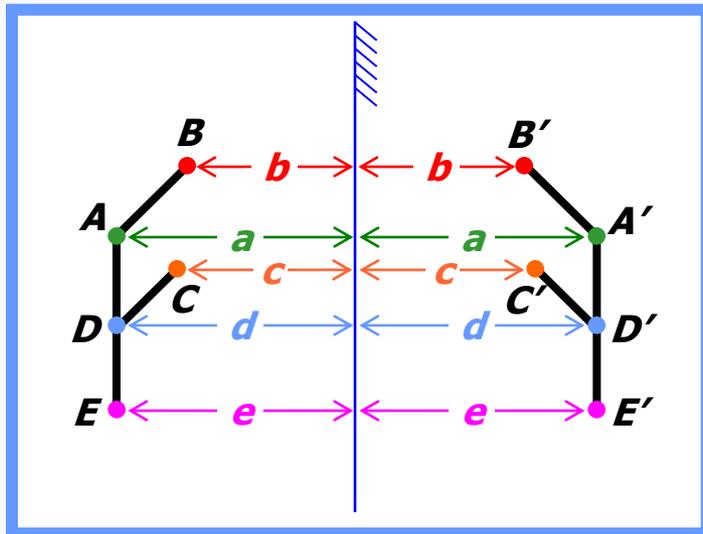
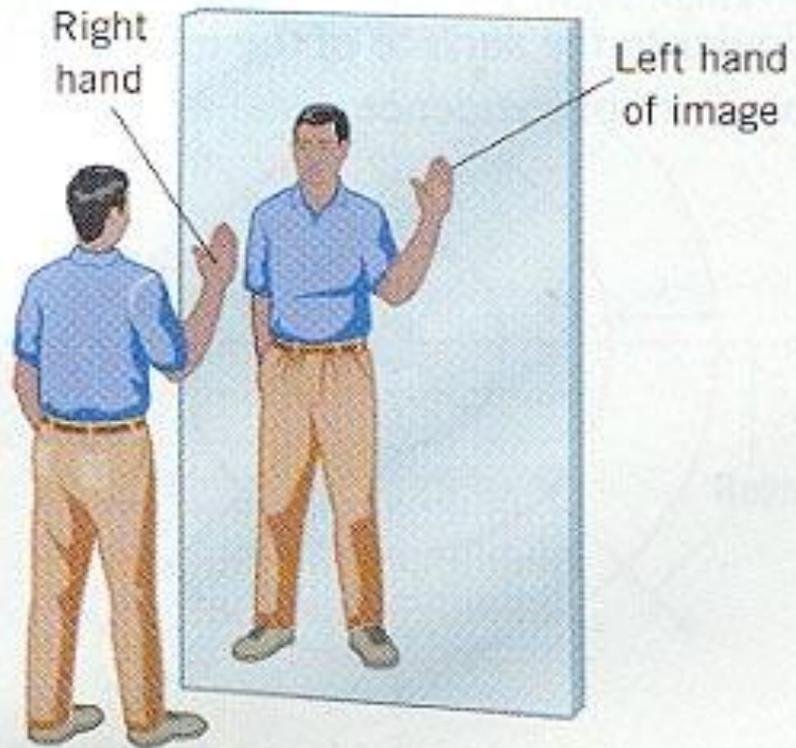


Imagem de um corpo extenso

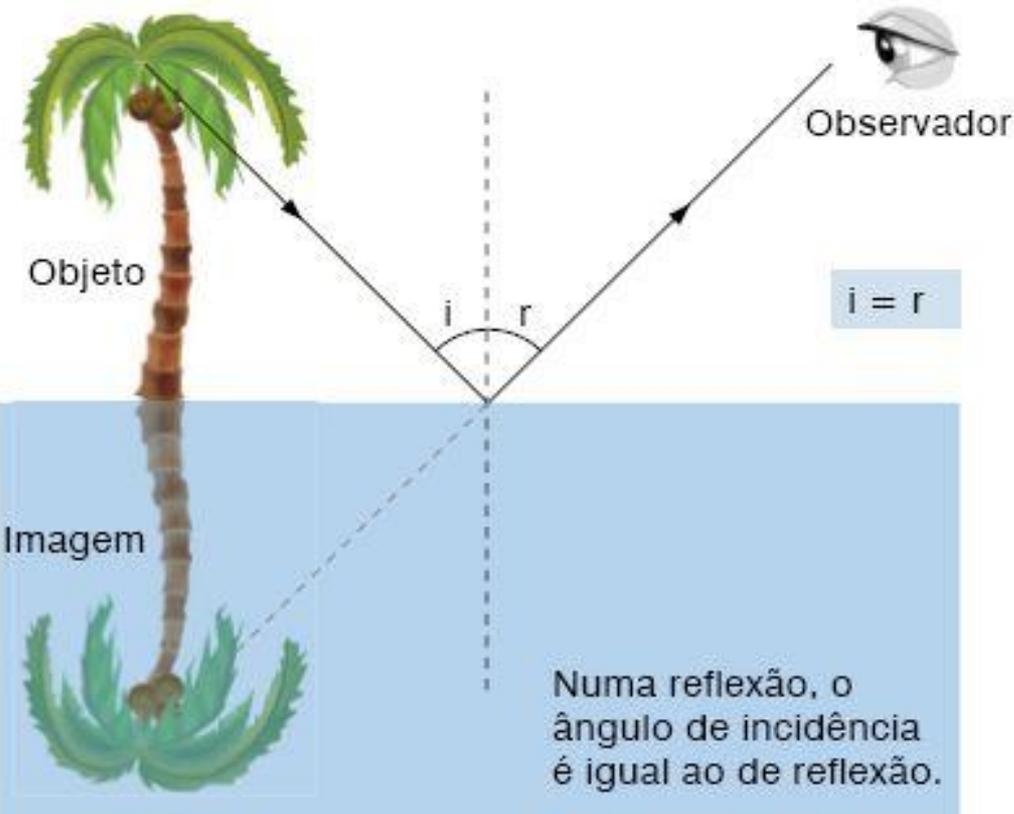
No caso de um objeto extenso, para cada ponto do objeto, obtém-se um ponto imagem que reunidos formarão a imagem do objeto.



Capítulo 34: Imagens



Capítulo 34: Imagens



Espelhos planos (a partir de objetos reais)

↓

Imagem

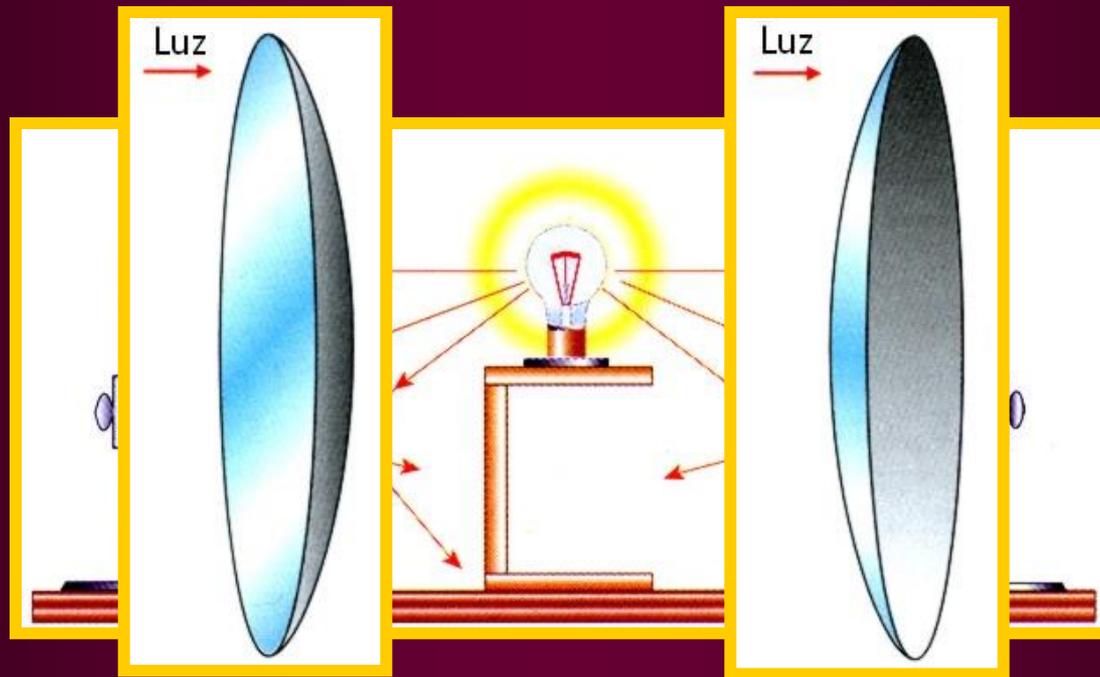
- Virtual
- Direita
- Mesmo tamanho
- Simétrica
- Revertida

34-4 | **Espelhos Esféricos**

34-5 | **Imagens Produzidas por Espelhos Esféricos**

Espelhos esféricos - Introdução

- Os espelhos esféricos são calotas esféricas polidas.



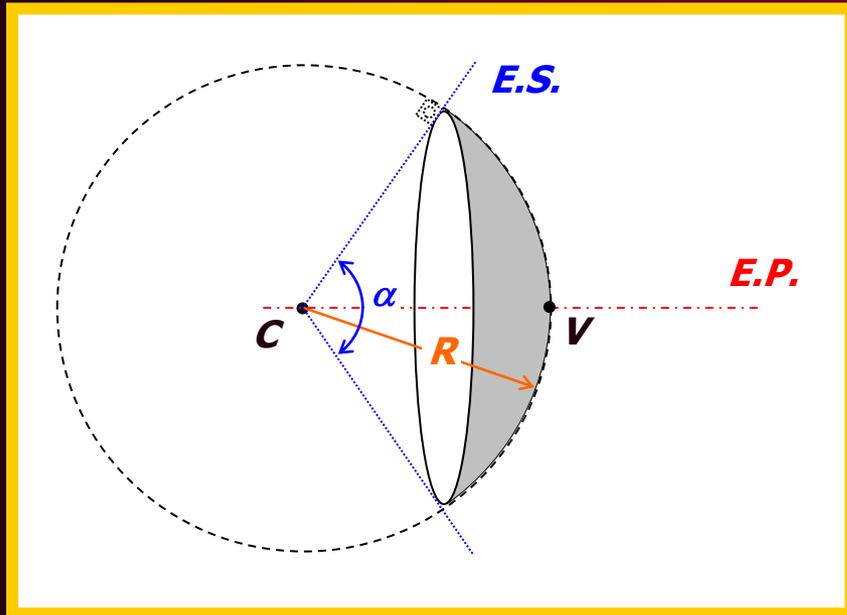
Côncavo

Polido por dentro

Convexo

Polido por fora

Espelhos Esféricos – Elementos



- *Centro de Curvatura (C)*: É o centro da superfície esférica.
- *Raio de Curvatura (R)*: É o raio da superfície esférica.
- *Vértice (V)*: É o pólo da calota esférica.
- *Eixo Principal (E.P.)*: É a reta definida pelo centro de curvatura e pelo vértice.
- *Eixo Secundário (E.S.)*: É qualquer reta que passa pelo centro de curvatura mas não passa pelo vértice.
- *Ângulo de Abertura (α)*: É o ângulo plano determinado pelos eixos secundários que passam por pontos diametralmente opostos do contorno do espelho.

Esp. Esféricos – Condições de Gauss

- Os espelhos devem ter um pequeno ângulo de abertura (10°).
- Os raios incidentes sobre o espelho devem ser paralelos ou pouco inclinados em relação ao eixo principal e próximos do mesmo.
- Em nosso curso, salvo recomendação em contrário, todos os espelhos esféricos obedecem às condições de Gauss.



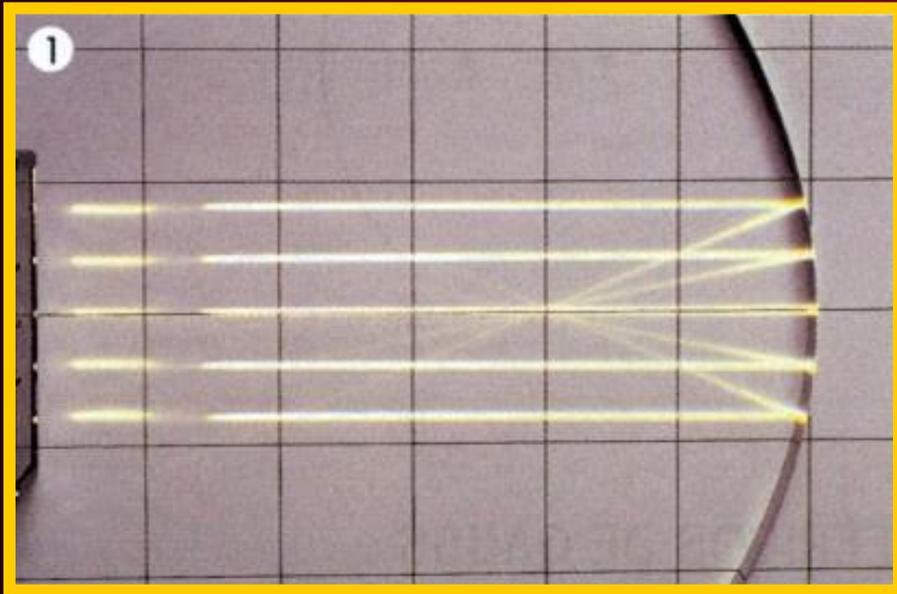
Não satisfaz as condições de Gauss



Satisfaz as condições de Gauss

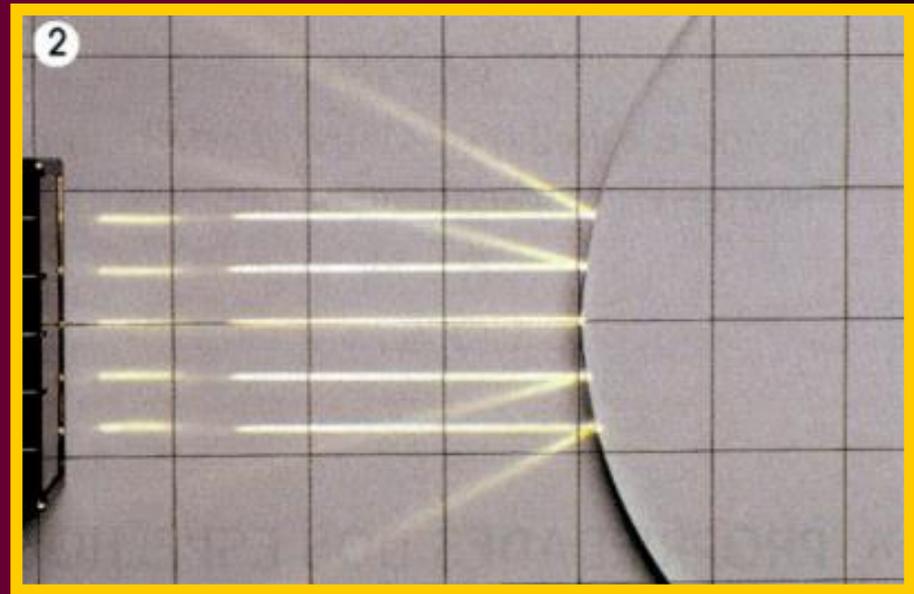
Focos dos Esp. esféricos

- Nos espelhos esféricos quando um feixe de raios luminosos incide paralelamente ao eixo principal, as direções dos raios refletidos passam, necessariamente, por um mesmo ponto do eixo principal denominado *Foco Principal (F)*.



Espelho côncavo

Foco Real

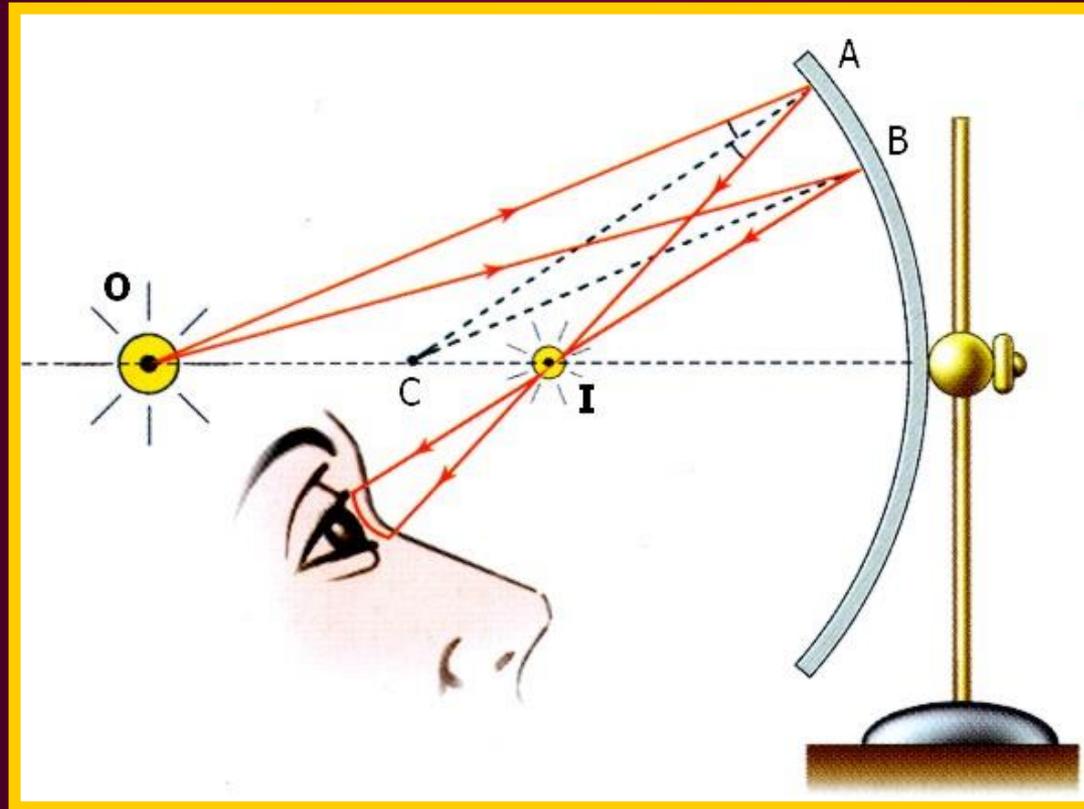


Espelho convexo

Foco Virtual

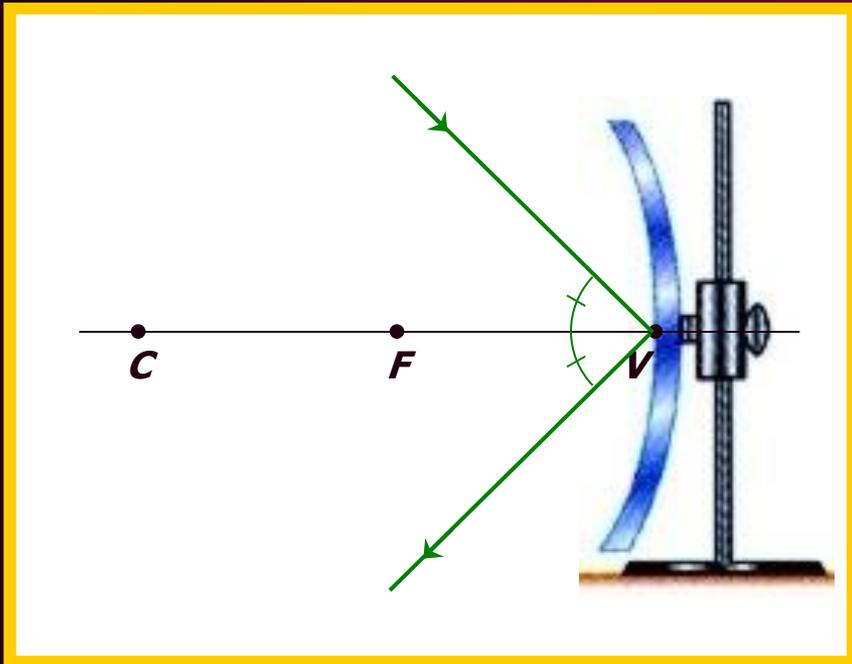
Esp. Esféricos – Formação de imagem

- A imagem é formada pelo encontro dos raios refletidos.

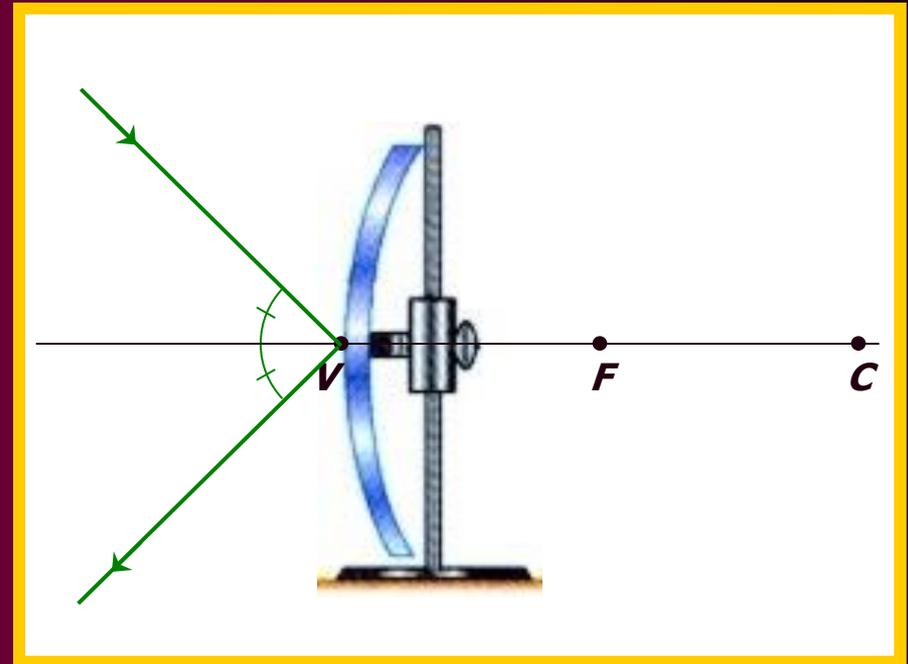


Esp. Esféricos – Raios Notáveis

Esp. côncavo



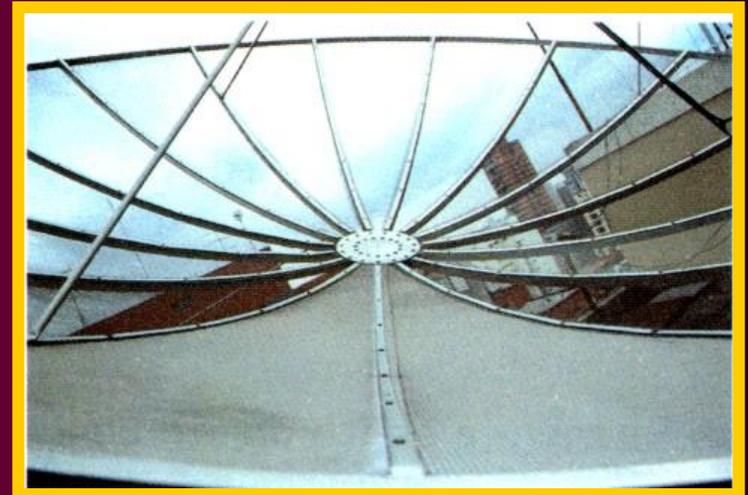
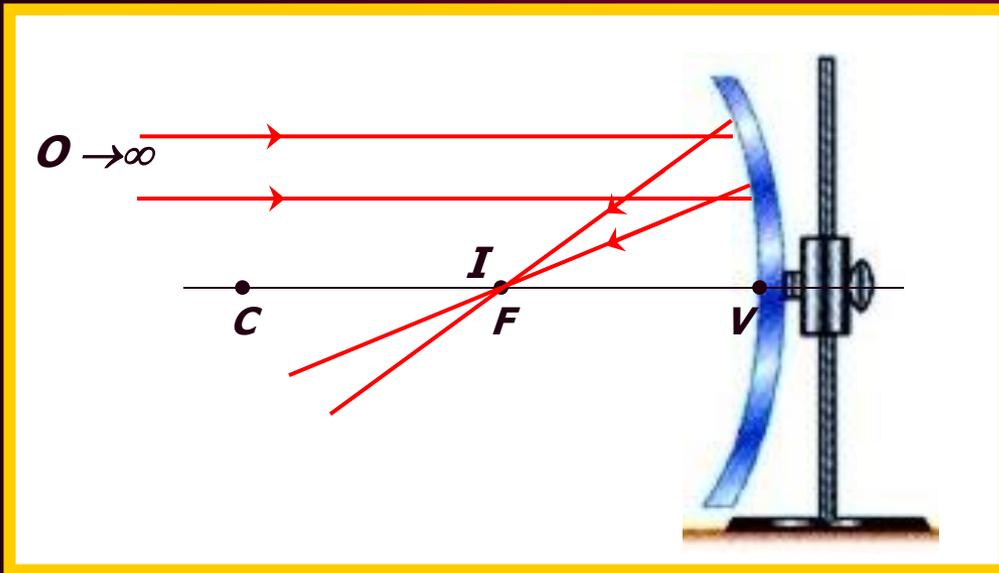
Esp. convexo



- O raio de luz que incide sobre o vértice reflete simetricamente em relação ao eixo principal

Formação das Imagens – Esp. côncavo

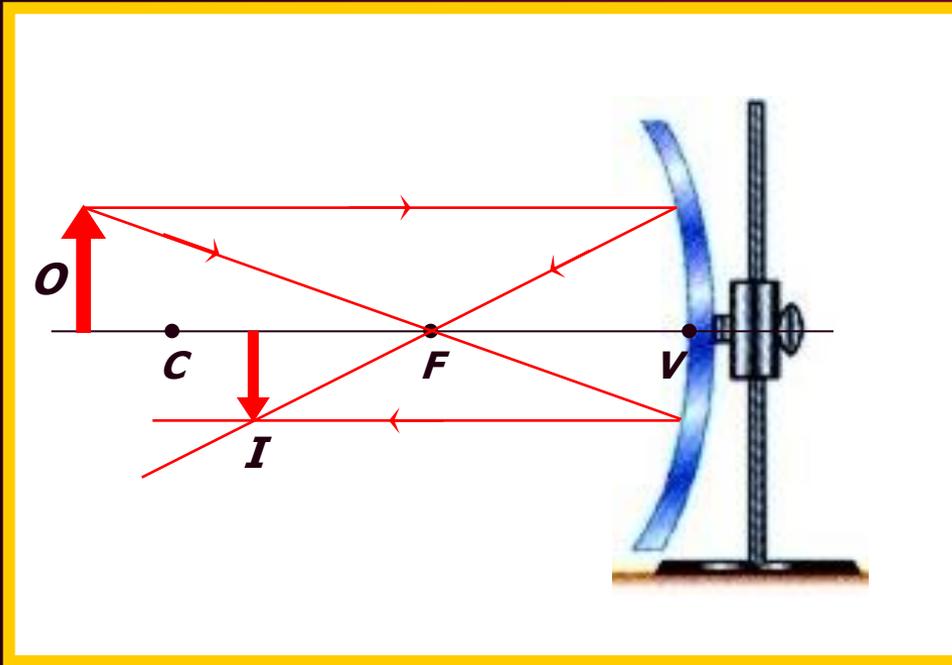
- Objeto real situado no infinito.



- Imagem:
 - ⇒ Real
 - ⇒ em F

Formação das Imagens – Esp. côncavo

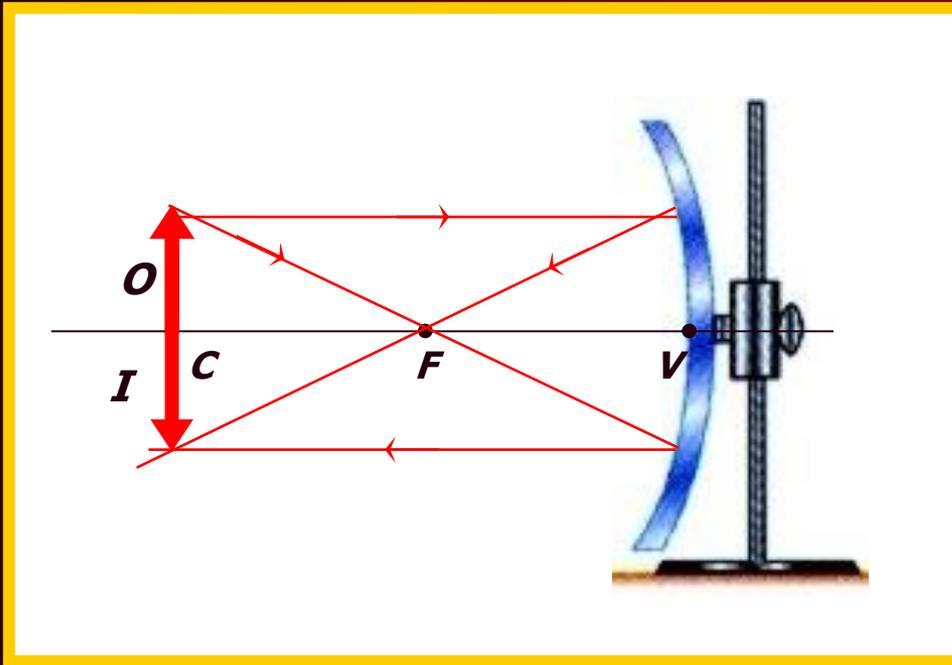
- Objeto real situado antes do centro de curvatura.



- Imagem:
 - ⇒ real, invertida e menor
 - ⇒ Entre C e F

Formação das Imagens – Esp. côncavo

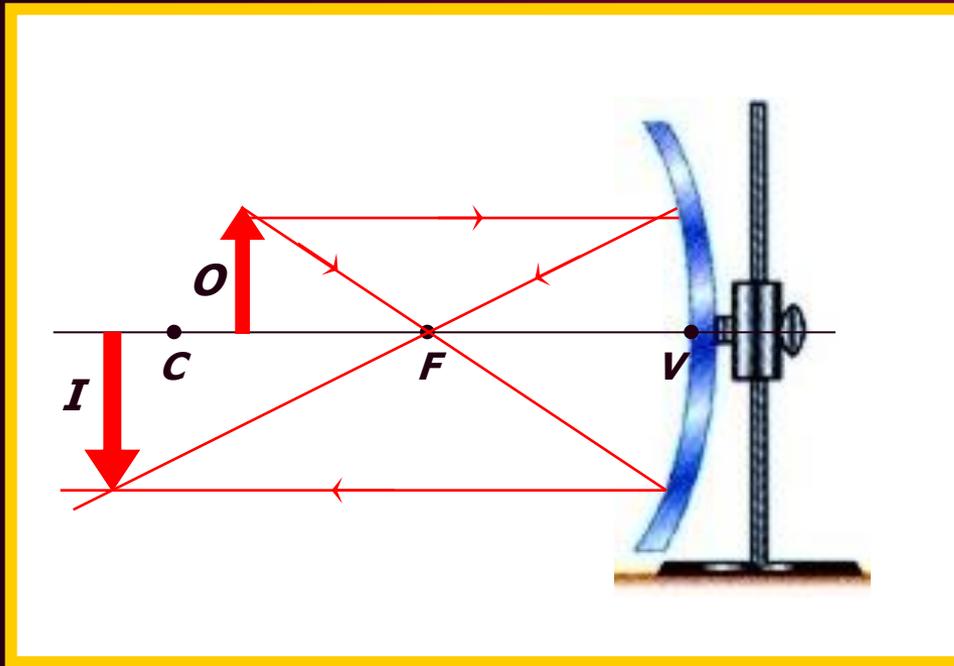
- Objeto real situado sobre o centro de curvatura.



- Imagem:
 - ⇒ real, invertida e igual
 - ⇒ em C

Formação das Imagens – Esp. côncavo

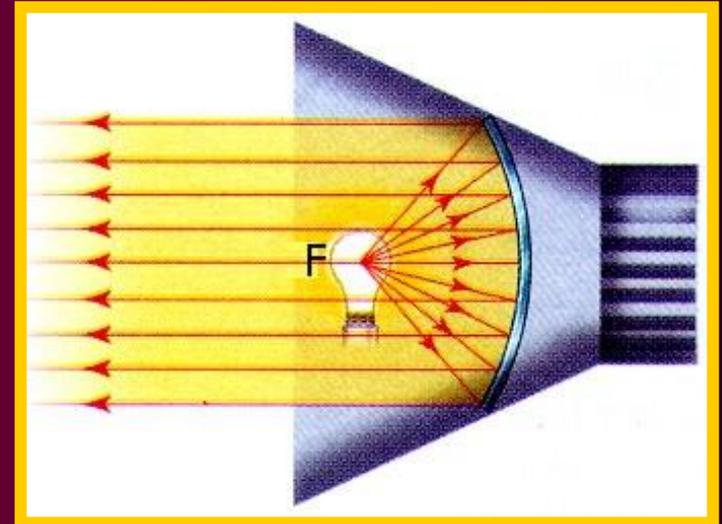
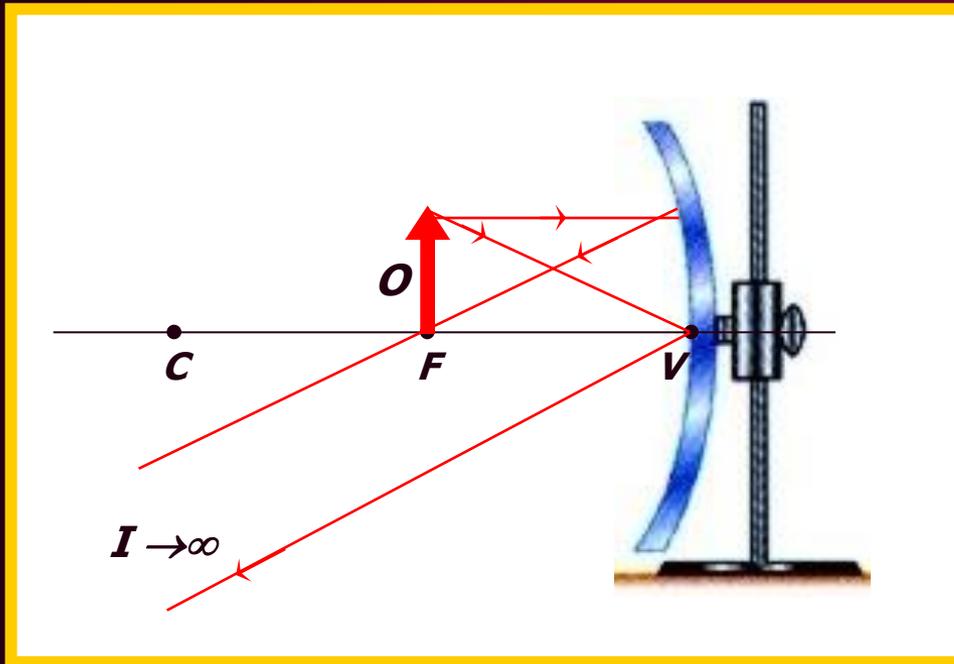
- Objeto real situado entre o centro e o foco.



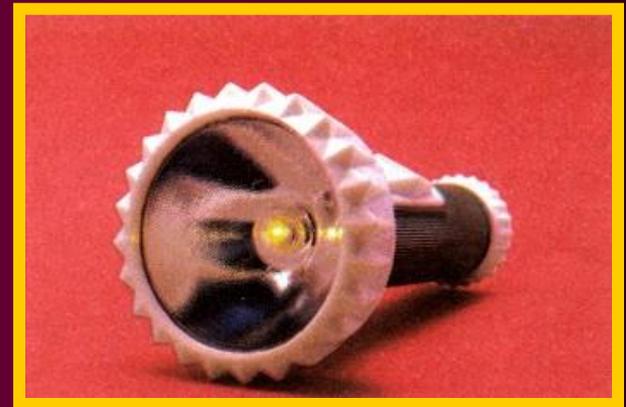
- Imagem:
 - ⇒ real, invertida e maior
 - ⇒ Depois de C

Formação das Imagens – Esp. côncavo

- Objeto real situado sobre o foco.

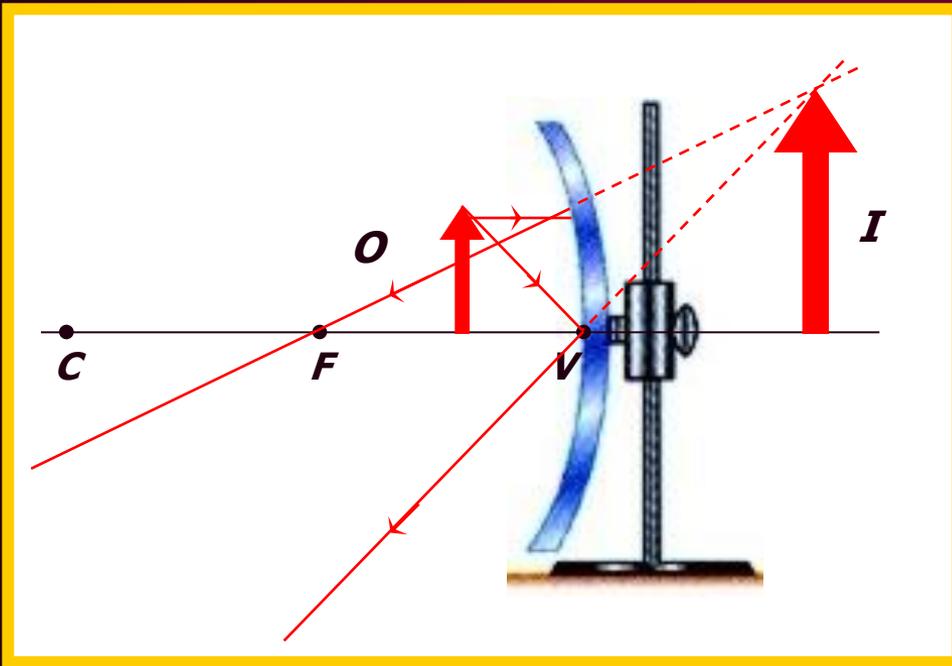


- Imagem:
 - ⇒ imprópria
 - ⇒ No infinito



Formação das Imagens – Esp. côncavo

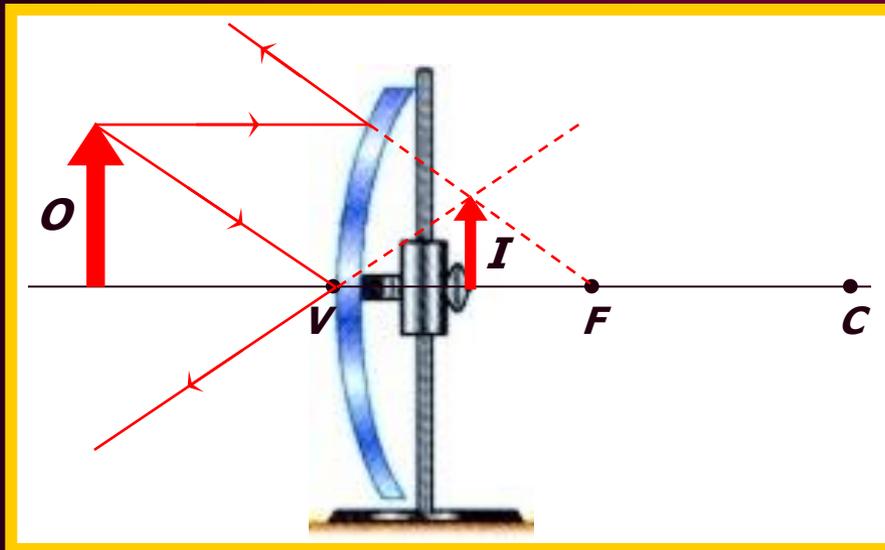
- Objeto real situado entre o foco e o vértice.



- Imagem:
 - ⇒ Virtual, direita e maior
 - ⇒ "atrás do espelho"

Formação das Imagens – Esp. convexo

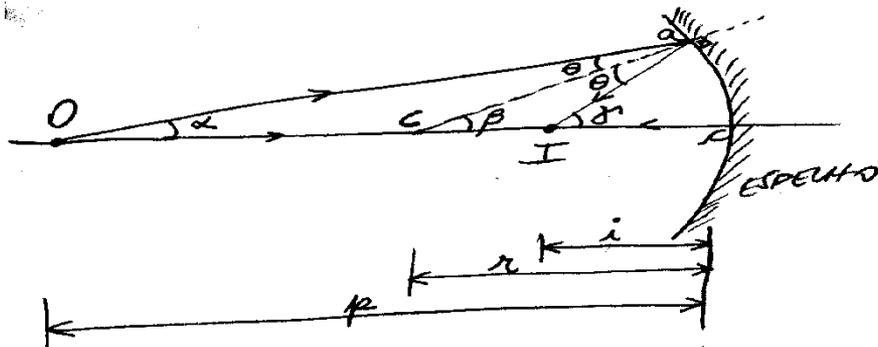
- Objeto real na frente do espelho



- Imagem:
 - ⇒ Virtual, direita e menor
 - ⇒ "atrás do espelho"

Equação do espelho esférico:

NA FIGURA ABAIXO O OBJETO PUNTIFORME O É COLOCADO NO EIXO DE UM ESPELHO ESFÉRICO CÔNCAVO, ALÉM DO SEU CENTRO DE CURVATURA C. UM RAIOS VINDO DE O E QUE FAZ UM ÂNGULO α COM O EIXO, APÓS REFLETIR-SE NO PONTO a DO ESPELHO, INTERCUTA O EIXO EM I. UM RAIOS QUE SAI DE O AO LONGO DO EIXO REFLETE-SE NO PONTO b, AO LONGO DESSE EIXO, PASSANDO TAMBÉM PELO PONTO I. LOGO, I É A IMAGEM DE O, SENDO UMA IMAGEM REAL, PORQUE A LUZ PASSA POR ELE.



PARA OBJETOS DISTANTES:
(ÂNGULOS PEQUENOS)

$$\alpha \approx \frac{\widehat{ac}}{rO} = \frac{\widehat{oc}}{R}$$

$$\beta = \frac{\widehat{ac}}{rC} = \frac{\widehat{oc}}{r} \quad (3)$$

$$\delta \approx \frac{\widehat{ac}}{rI} = \frac{\widehat{oc}}{i}$$

NO ΔOaC

$$\beta = \alpha + \theta$$

NO ΔOaI

$$\delta = \alpha + 2\theta$$

DESTAS DUAS EQUAÇÕES:

$$\boxed{\alpha + \delta = 2\beta} \quad (2)$$

SOMENTE A EQUAÇÃO β / β É EXATA PORQUE C É O CENTRO DE CURVATURA DO ARCO \widehat{ac}

Equação do espelho esférico (cont.):

SUBSTITUINDO AS EQUAÇÕES (3) NA EQUAÇÃO (2):

$$\frac{\widehat{ac}}{R} + \frac{\widehat{ac}}{i} = 2 \frac{\widehat{ac}}{R}$$

$$\boxed{\frac{1}{R} + \frac{1}{i} = \frac{2}{R}}$$

(4)
FÓRMULA DO
ESPELHO ESFÉRICO

USANDO-SE A EQ. (1) TEM-SE:

$$\boxed{\frac{1}{R} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}}$$

(5)
FÓRMULA DO
ESPELHO ESFÉRICO

ESPELHO PLANO: $R \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{1}{R} + \frac{1}{i} = 0$
 $\boxed{i = -R}$ OK

OBJETO NO INFINITO: $R \rightarrow \infty$
 $\frac{1}{i} = \frac{1}{f}$
 $\boxed{i = f}$ OK

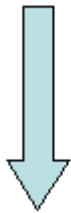
Equação do espelho:

$$\frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o} = \frac{f}{d_o - f}$$

$$d_i(d_o - f) = d_o f$$

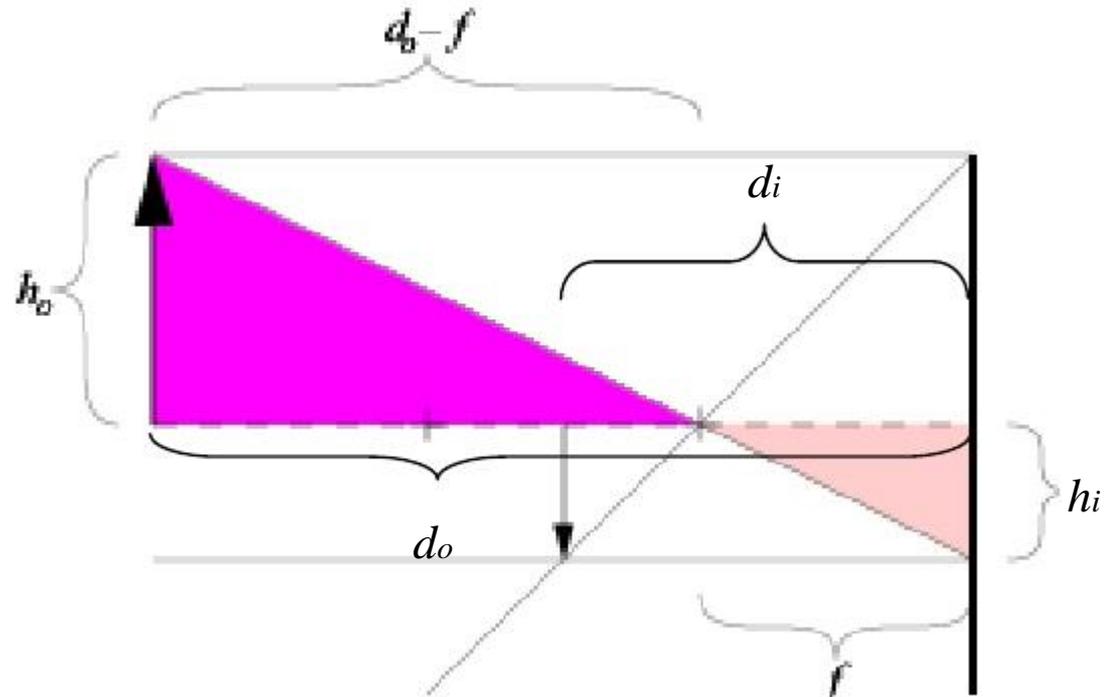
$$d_i d_o - d_i f = d_o f$$

$$d_i d_o = d_o f + d_i f$$



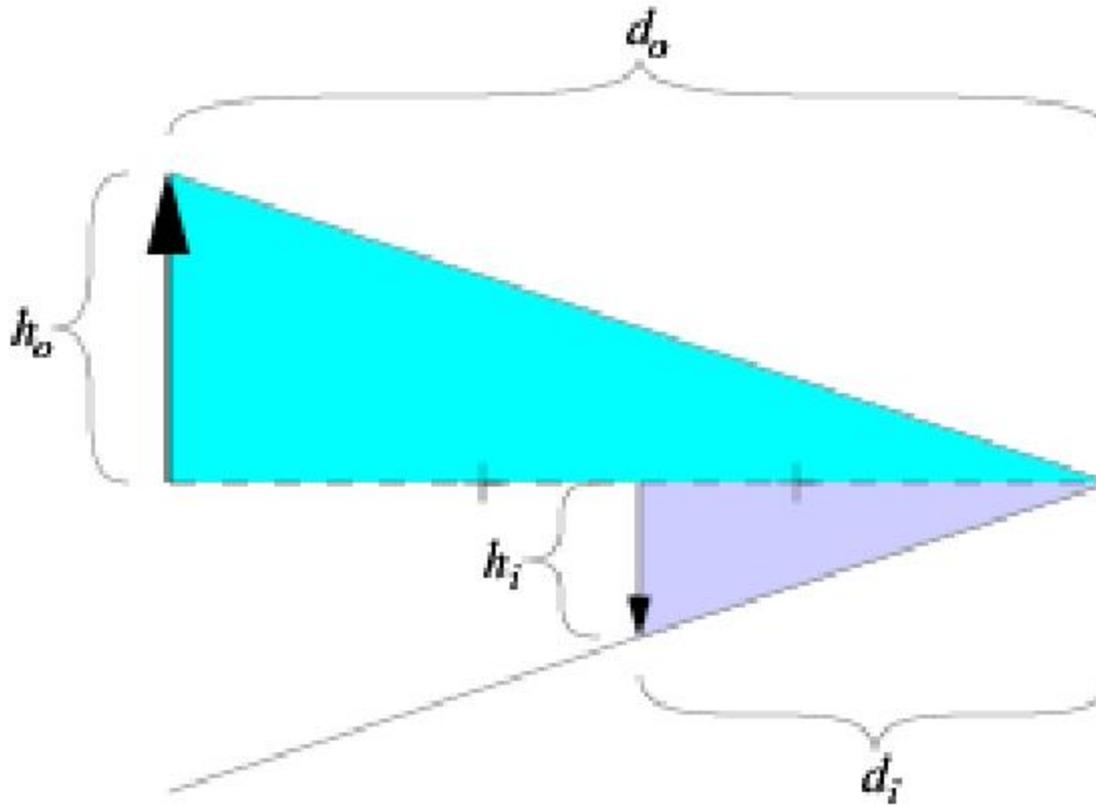
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

$$\text{ou } \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

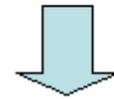


Ampliação e equação do espelho: uma derivação geométrica simples

Ampliação:

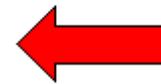


$$\frac{h_o}{d_o} = -\frac{h_i}{d_i}$$



$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{-d_i}{d_o}$$

$$m = -\frac{i}{p}$$



A aproximação usada é de que o espelho tem uma curvatura muito pequena

Capítulo 34: Imagens

p é a distância do objeto ao espelho;
i é a distância da imagem ao espelho;
h' é o tamanho da imagem;
h é o tamanho do objeto.

Regra de sinais

f + → espelho côncavo
f - → espelho convexo

p e **i** + → imagem real
p e **i** - → imagem virtual

h' + → imagem virtual
h' - → imagem real

m + → imagem virtual
m - → imagem real

Equação de Gauss

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{p}$$

Ampliação lateral

$$|m| = \frac{h'}{h} = -\frac{i}{p} = \frac{f}{f - p}$$

Capítulo 34: Imagens

TABELA 34-1

Tabela das Imagens Produzidas por Espelhos

Tipo de Espelho	Posição do Objeto	Imagem			Sinal		
		Posição	Tipo	Orientação	de f	de r	de m
Plano	Qualquer						
Côncavo	M.P.Q.F.						
	M.L.Q.F.						
Convexo	Qualquer						

MPQF: Mais perto do espelho que o foco.

MLQF: Mais longe do espelho que o foco.

Capítulo 34: Imagens

Exemplo 34-1

Uma tarântula de altura h está diante de um espelho esférico cuja distância focal tem valor absoluto $|f| = 40 \text{ cm}$. A imagem da tarântula produzida pelo espelho tem a mesma orientação que a tarântula e altura $h' = 0,20h$.

(a) A imagem é real ou virtual? Está do mesmo lado do espelho que a tarântula ou do lado oposto?

(b) O espelho é côncavo ou convexo? Qual é o valor da distância focal f , incluindo o sinal?

Resposta (a): ver livro (p. 48)

Resposta (b): $f = -40\text{cm}$

Capítulo 34: Imagens

a) Como a imagem tem a mesma orientação que a tarântula (o objeto), é virtual e está localizada do outro lado do espelho (essa conclusão é óbvia para quem preencheu a tabela 34-1).

b) Não podemos saber de que tipo é o espelho pelo tipo de imagem, já que tanto os espelhos côncavos como convexos podem produzir imagens virtuais. Além disso, não podemos saber de que tipo é o espelho a partir do sinal da distância focal f , entretanto, podemos usar a informação a respeito do aumento.

$$|m| = \frac{h'}{h} = 0,20$$

Como o objeto e a imagem tem a mesma orientação sabemos que m é positivo: $m=0,20$. Substituindo esse valor na equação abaixo, encontramos:

$$m = -\frac{i}{p}$$
$$i = -0,2p$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{p} = \frac{1}{-0,2p} + \frac{1}{p}$$
$$f = -\frac{p}{4}$$

Como p é uma grandeza positiva, **f deve ser negativa**, o que significa que o espelho é **convexo**, com **f = - 40cm**.