

UMA PROPOSTA DE MATERIAL DIDÁTICO PARA O ENSINO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

A PROPOSAL FOR TEACHING MATERIAL FOR TEACHING THE FUNDAMENTAL
CONCEPTS OF GEOMETRIC OPTICS

Lucas Lourenço Barbosa Gonçalves[†]
Clóves Gonçalves Rodrigues[‡]

RESUMO: Este trabalho tem como principal objetivo apresentar um texto que sirva como material didático para o ensino dos conceitos fundamentais da óptica geométrica, trazendo à tona a utilidade da óptica geométrica no cotidiano, atribuindo ênfase aos conceitos estabelecidos da óptica geométrica. Neste sentido são abordados os seguintes temas: fontes de luz; meios de propagação da luz (transparentes, translúcidos, opacos); raios, feixes e pincel de luz; os princípios da óptica geométrica; a reflexão da luz; as leis da reflexão da luz; espelhos planos e esféricos; formação de imagens; refração; índice de refração; refração; dióptro plano; reflexão interna total; lentes esféricas (convergentes e divergentes).

Palavras-chave: Óptica Geométrica. Espelhos. Lentes. Ensino de Física.

ABSTRACT: The main objective of this paper is to present a text that serves as didactic material for teaching the fundamental concepts of geometric optics, bringing to light the usefulness of geometric optics in everyday life, giving emphasis to established concepts of geometric optics. In this sense, the following topics are addressed: light sources; light propagation media (transparent, translucent, opaque); rays, beams and light brush; the principles of geometric optics; the reflection of light; the laws of light reflection; flat and spherical mirrors; image formation; refraction; refractive index; refraction; flat diopter; total internal reflection; spherical lenses (converging and diverging).

Keywords: Geometric Optics. Mirrors. Lenses. Physics Teaching

INTRODUÇÃO

A investigação do mundo natural e a busca pelas leis que o governam sempre foram uma atividade fundamental do ser humano. A observação do mundo ao ser redor, desde a matéria minúscula (átomos, partículas, subpartículas) até a matéria maiúscula (planetas, galáxias etc.) sempre instigou o homem. E esta especulação sobre tudo que existe no universo aliada à exploração de suas potencialidades fundamentou os avanços científicos e

[†]Graduado em Licenciatura Plena em Física pela Escola de Formação de Professores e Humanidades da Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

[‡]Professor Titular da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Doutor em Ciências pelo Instituto de Física “Gleg Wataghin”, Unicamp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0140-9847>

tecnológicos das sucessivas civilizações. E a habilidade do homem em utilizar esses conhecimentos adquiridos ao longo dos tempos tem influenciado de forma decisiva o curso da história de várias maneiras (BORGES, 2022a).

No sentido de explicar e compreender os fenômenos presentes na natureza destaca-se a Física. A Física é uma ciência capaz de explicar desde simples acontecimentos cotidianos até a compreensão do funcionamento de sistemas biológicos, astronômicos, quânticos, complexos, nanométricos etc.

Assim, a Física abrange uma gama de conteúdos, os quais são indispensáveis para o desenvolvimento científico e humano (MARTINS; RODRIGUES; ANDRADE, 2022). Por motivos didáticos o ensino da Física costuma ser dividido em mecânica, eletromagnetismo, termodinâmica e óptica.

A óptica é uma área da Física responsável por estudar os fenômenos da interação da luz com a matéria possuindo diversas aplicações em nosso cotidiano. Dentre elas podemos citar: espelhos, óculos, lentes etc. O estudo da óptica pode ser dividido em “óptica ondulatória”, que se encarrega do estudo do comportamento ondulatório da luz, e na “óptica geométrica” que estuda o comportamento geométrico da luz, isto é, não leva em consideração o comportamento ondulatório da luz, fazendo uso dos princípios da geometria plana.

89

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar um texto que sirva como material didático para o ensino dos conceitos fundamentais da óptica geométrica, trazendo à tona a utilidade da óptica geométrica no cotidiano, atribuindo ênfase aos conceitos estabelecidos da óptica geométrica. Neste sentido são abordados os seguintes temas: fontes de luz; meios de propagação da luz (transparentes, translúcidos, opacos); raios, feixes e pincel de luz; os princípios da óptica geométrica; a reflexão da luz; as leis da reflexão da luz; espelhos planos e esféricos; formação de imagens; refração; índice de refração; refringência; dioptra plano; reflexão interna total; lentes esféricas (convergentes e divergentes). Salientamos que neste trabalho tratamos somente sobre a óptica geométrica. Ao leitor interessado sobre a ótica ondulatória recomendamos a referência (RODRIGUES, 2020).

1 FONTES DE LUZ

Quanto às fontes de luz, os corpos são classificados em dois tipos: 1) fontes de luz primária, e 2) fontes de luz secundária.

- **Fontes de Luz Primária:** são corpos capazes de emitir luz própria. Exemplos: Uma lâmpada acesa (Figura 1(a)), a chama de uma vela, as estrelas (como o Sol), entre outros.
- **Fontes de Luz Secundária:** são corpos que não emitem luz própria, ou seja, apenas refletem a luz recebida. Podemos citar como exemplos, um vaso de planta, um lápis, uma parede, entre muitos outros presentes no dia a dia. Em nosso cotidiano, os objetos são iluminados pela luz do Sol, e estes refletem a luz até nossos olhos permitindo enxergá-los. A Lua, Figura 1(b), é uma fonte de luz secundária, pois reflete a luz que recebe do Sol (BORGES, 2022b), (MARTINS, 2022).

Figura 1(a) – Lâmpada acesa.



Figura 1(b) – Lua cheia.



Fonte: (a) <https://images.app.goo.gl/pPXBmdPD5fK58oQX8>. Acessado em: 20 out. 2022.
(b) <https://www.todamateria.com.br/fases-da-lua/amp/>. Acessado em: 20 out. 2022.

2 MEIOS DE PROPAGAÇÃO DA LUZ

Este conceito é referente à influência que os objetos considerados transparentes, translúcidos e opacos exercem na trajetória da luz.

2.1 Meios Transparentes

São objetos que permitem a passagem da luz descrevendo trajetórias bem definidas, Figuras 2(a) e 2(b). Dessa forma possibilita a visualização nítida de um objeto atrás desse corpo. Temos como exemplo o vidro de janelas transparentes, as paredes de vidro de um aquário, etc.

Figura 2(a) – Representação de um meio transparente.

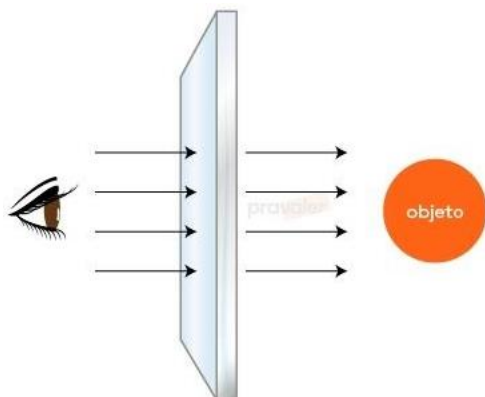


Figura 2(b) – Uma janela de vidro transparente.



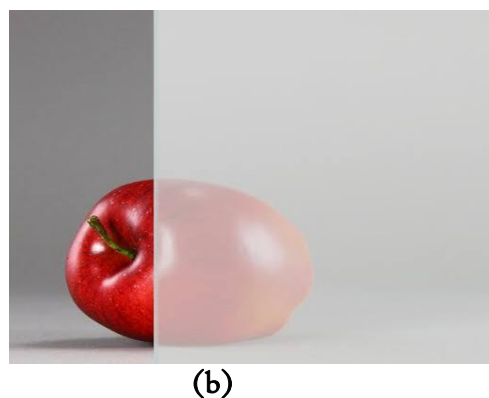
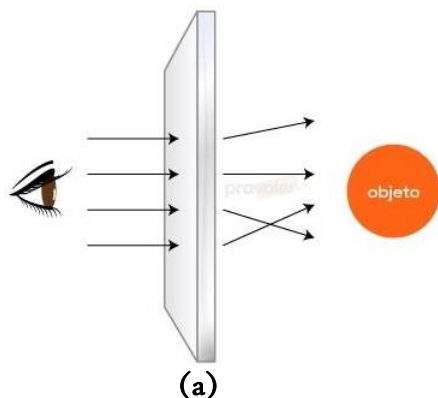
Fonte: (a) <https://www.google.com/amp/s/www.pravaler.com.br/luz-fontes-propagacao-e-principais-fenomenos-opticos/%3famp=true>. Acessado em: 22 out. 2022.

(b) <https://images.app.goo.gl/8PFrDsoMmKmwCbcg6>. Acessado em: 22 out. 2022.

2.2 Meios Translúcidos

São objetos que permitem a passagem da luz com uma trajetória irregular e difusa, comprometendo a nitidez dos objetos posicionados atrás destes corpos, Figuras 3(a) e 3(b). Exemplos: vidro ondulado, neblina, sacola plástica, etc.

Figura 3 – (a) Representação de um meio translúcido. (b) Visualização de uma maçã através de um meio translúcido.



Fonte: (a) <https://www.google.com/amp/s/www.pravaler.com.br/luz-fontes-propagacao-e-principais-fenomenos-opticos/%3famp=true>. Acessado em: 24 de out. 2022.

(b) <https://bendheim.com/product/translucent-white-fritted-architectural-glass/>. Acessado em: 24 out.2022.

2.3 Meios Opacos

São objetos que não permitem a passagem da luz, isto é, quando a luz incide sobre a superfície deste tipo de meio parte da luz incidente é refletida e parte é absorvida, Figura 4(a). Quando parte da luz é absorvida pelo corpo, esta é transformada em outros tipos de

energia, como a térmica (GONTIJO, 2021). Exemplos: uma porta de madeira, a parede de uma casa, metais, entre outros. A Figura 4(b) mostra dois armários de madeira: um fechado e outro aberto. A porta do armário que está fechado não possibilita a visualização de seu interior e se comporta como um objeto opaco.

Figura 4 – (a) Representação de um meio opaco. (b) Um armário como representação de um objeto opaco.



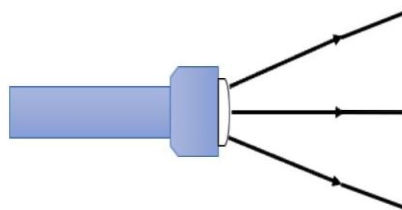
Fonte: (a) <https://www.google.com/amp/s/www.pravaler.com.br/luz-fontes-propagacao-e-principais-fenomenos-opticos/%3famp=true>. Acessado em: 22 de outubro de 2022.

(b) <https://www.carrefour.com.br/armario-multiuso-2-portas-e-6-prateleiras-margarida-henn-branco-mp01416005/p>. Acessado em: 25 de outubro de 2022.

3 RAIOS DE LUZ

É uma representação geométrica da luz, indicando a sua direção e sentido de propagação. Um raio de luz é uma linha orientada que tem origem na fonte de luz. No exemplo representado pela Figura 5 a lanterna é a fonte de luz e as retas representam os raios de luz.

Figura 5 – Representação dos raios de luz.



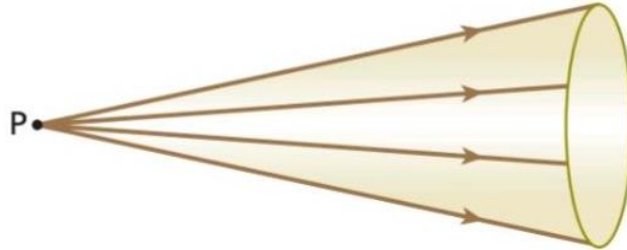
Fonte: Os autores.

4 FEIXES DE LUZ E PINCEL DE LUZ

O feixe de luz é composto de raios de luz provenientes de uma única fonte. A geometria formada pelo feixe de luz é denominada “pincel de luz”. Dessa forma, se classificam em três representações geométricas, a saber:

- **Cônico divergente:** os raios de luz divergem de um ponto P, Figura 6.

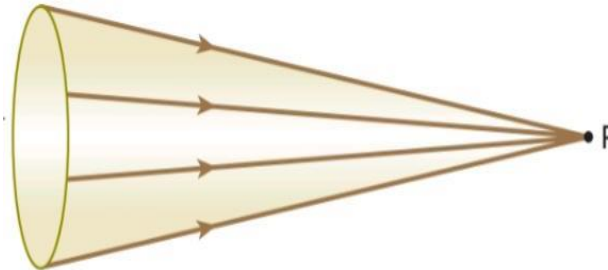
Figura 6 – Representação de um pincel cônico divergente.



Fonte: os autores.

- **Cônico convergente:** os raios de luz convergem para um ponto P, Figura 7.

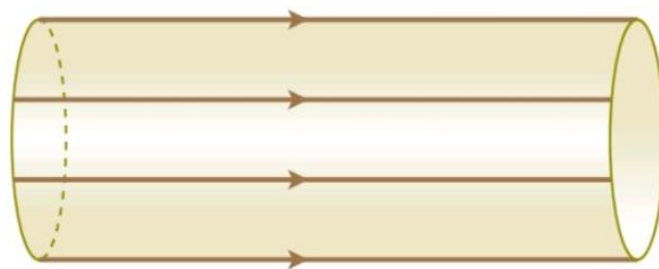
Figura 7 – Representação de um pincel cônico convergente.



Fonte: os autores.

- **Cilíndrico:** os raios de luz são paralelos, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Representação de um pincel cilíndrico.



Fonte: os autores.

5 OS PRINCÍPIOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

1º princípio: propagação retilínea da luz

O princípio da propagação retilínea da luz estabelece que, quando a luz se propaga em meios homogêneos, isto é, que apresentam propriedades iguais em todos os seus pontos, sua trajetória é retilínea. Exemplo: um meio transparente, como o vidro de um aquário,

sendo totalmente homogêneo, permite a trajetória retilínea da luz, possibilitando a visualização nítida do seu interior, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Paredes de vidro de um aquário.



Fonte: <https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/beautiful-fish-aquariumgoldfish-aquarium-on-background-612339296>. Acessado em: 26 out. 2022.

2º princípio: independência dos raios de luz

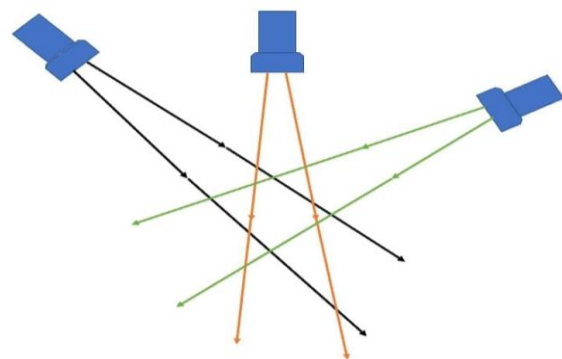
O princípio da independência dos raios de luz afirma que os pincéis de luz são independentes. Isso significa dizer que, quando vários raios de luz estão sendo emitidos de forma simultânea, porém partindo de fontes diferentes, a trajetória de cada pincel de luz não é afetada pelo cruzamento com outro pincel de luz, ou seja, cada um mantém sua trajetória independente da presença do outro. Um exemplo prático deste princípio são os holofotes utilizados em palco de shows, Figura 10(a). O pincel de luz de cada holofote se cruza e mantém suas trajetórias independentes, como vista na Figura 10(b).

94

Figura 10 – (a) Vários holofotes acesos em um show musical. (b) Representação dos raios de luz provenientes de holofotes.



(a)



(b)

Fonte: (a) https://br.freepik.com/fotos-premium/cena-luz-do-palco-com-holofotes-coloridos-e-fumaca_13680550.htm. Acessado em: 26 out. 2022. (b) Os autores.

3º princípio: reversibilidade dos raios de luz

O princípio da reversibilidade dos raios de luz afirma que a trajetória percorrida por um raio de luz não sofre modificação se invertemos o seu sentido de propagação, ou seja, se um raio de luz parte de um ponto A até um ponto B, e depois parte de B até A, possuem a mesma trajetória. O fato de um motorista dentro de um carro enxergar um passageiro no interior do carro através do espelho retrovisor e o passageiro enxergar o motorista da mesma forma se dá por meio deste princípio de reversibilidade dos raios de luz, Figura 11.

Figura 11 – Motorista visualizando o passageiro através do espelho retrovisor.



Fonte: <https://images.app.goo.gl/27Vzk9sacBzzBrmE6>. Acessado em: 26 out. 2022.

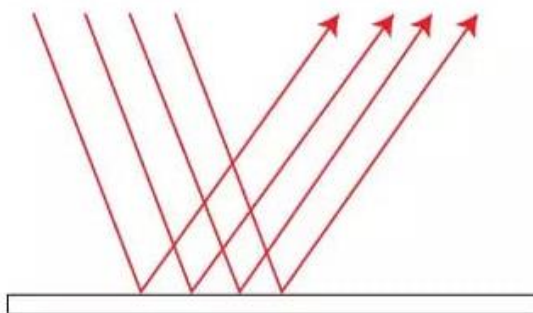
6 REFLEXÃO DA LUZ

A reflexão da luz é um fenômeno que ocorre quando raios de luz incidem sobre uma superfície e retornam para o seu meio de origem. O fato de podermos enxergar os objetos ao nosso redor se deve a esse fenômeno. Os raios de luz incidem nos objetos e são refletidos até que cheguem aos olhos. No estudo da reflexão da luz temos dois tipos de reflexão: a regular e a difusa.

6.1 Reflexão Regular

Esse tipo de reflexão faz com que os raios incidentes em uma superfície polida e lisa, sejam refletidos mantendo-os paralelos um em relação ao outro e numa única direção. Um exemplo prático dessa reflexão é a incidência de luz sobre um espelho, o qual permite a formação de imagens nítidas, Figura 12.

Figura 12 – Representação da reflexão regular.

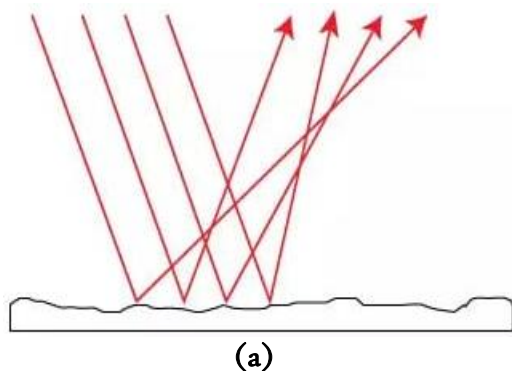


Fonte: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/reflexao-da-luz>. Acessado em: 28 out. 2022.

6.2 Reflexão Difusa

Ao contrário da reflexão regular, a reflexão difusa ocorre quando os raios de luz incidem em uma superfície irregular e os raios refletidos se espalham cada qual seguindo uma direção diferente, como mostra a Figura 13(a). Um exemplo é a formação da imagem distorcida na superfície da água de um lago em que a superfície da água não está completamente imóvel e lisa, Figura 13(b).

Figura 13 – (a) Representação da reflexão difusa. (b) Formação da imagem de um cão na superfície da água de um lago.



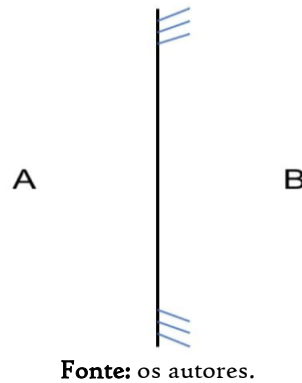
Fonte: (a) <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/reflexao-da-luz>. Acessado em: 28 out. 2022.

(b) <https://images.app.goo.gl/BWBgcQBhryeHDRKS9>. Acessado 28 out. 2022.

7 AS LEIS DA REFLEXÃO DA LUZ

Para representar um espelho plano, em geral, utiliza-se o esquema de acordo com a Figura 14: uma reta representando o espelho plano onde seu lado A é a parte espelhada e o lado B é a parte de trás do espelho onde as bordas da reta possuem a simbologia de traços.

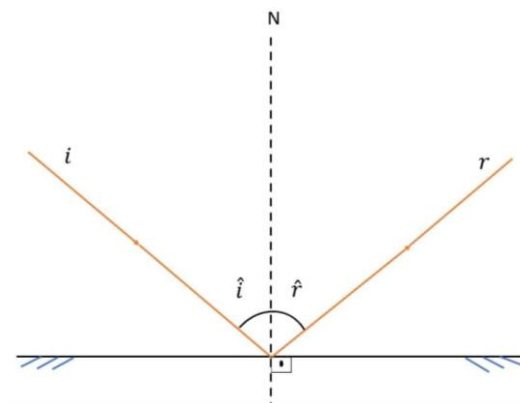
Figura 14 – Representação esquemática de espelho plano.



Fonte: os autores.

A Figura 15 representa um espelho na horizontal com a sua parte espelhada para cima. Um raio de luz i incide sobre o espelho formando um ângulo \hat{i} com a reta normal N (reta tracejada na vertical). Este ângulo \hat{i} é chamado de ângulo de incidência. Após incidir no espelho plano o raio de luz é refletido sendo denotado na Figura 15 pelo raio de luz r que possui um ângulo em relação à reta normal que é chamado de ângulo de reflexão \hat{r} .

Figura 15 – Raio incidente i e raio refletido r por um espelho plano.



Fonte: os autores.

Dessa forma, as leis da reflexão da luz são:

- **1ª lei:** o raio incidente i , o raio refletido r , e a reta normal N , são coplanares, isto é, pertencem ao mesmo plano. No exemplo da Figura 15, este é o plano da página.
- **2ª lei:** o ângulo de incidência \hat{i} e o ângulo refletido \hat{r} medidos em relação à normal N são iguais.

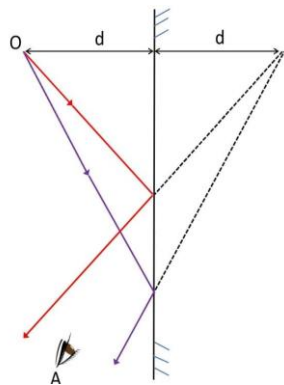
8 ESPELHO PLANO

8.1 Definição

Um espelho plano é um sistema óptico capaz de refletir os raios de luz incidentes. Geralmente o espelho é constituído de uma lâmina de vidro transparente e um composto metálico de prata que recobre uma de suas faces. Este tipo de espelho é muito utilizado no cotidiano, como em porta de guarda-roupas, armários de banheiro, etc.

Ao posicionar um objeto O frente ao espelho plano, os raios de luz que partem do objeto O sofrem reflexão obedecendo às leis da reflexão da luz. Após serem refletidos, chegam até o olho do observador A . De acordo com a Figura 16, a formação da imagem se dá no ponto I e se configura como uma imagem virtual pelo fato de ser formada pelo prolongamento dos raios de luz refletidos, representados pelas retas tracejadas. Em relação ao olho do observador A , a imagem no ponto I se comporta como objeto real, isto é, como se a luz fosse proveniente desse ponto.

Figura 16 – Formação da imagem no espelho plano.



Fonte: os autores.

Nos espelhos planos a propriedade de simetria é sempre obedecida. A distância d entre o objeto e a imagem em relação ao espelho, sempre terá as mesmas dimensões. Por conta disso, ocorrendo um afastamento ou uma aproximação do espelho, essa simetria se mantém para cada caso. A imagem no espelho plano é reversa, isto é, a imagem corresponde ao avesso do objeto posicionado frente ao espelho. Observando a Figura 17, nota-se que a mão direita da mulher corresponde à mão esquerda da sua imagem no espelho.

Figura 17 – Imagem reversa de uma pessoa num espelho plano.



Fonte: <https://www.wallpaperflare.com/500px-long-hair-mirror-reflection-giovanni-zacche-women-wallpaper-pgzjp/download/1082x1922>. Acessado em: 29 out. 2022.

Quando uma pessoa está observando a imagem de um objeto formado no espelho, nota-se que quanto mais distante o objeto estiver do espelho, menor será a sua imagem, mas isto não implica na diminuição do seu tamanho real, o que ocorre é a diminuição do ângulo visual de observação ser cada vez menor.

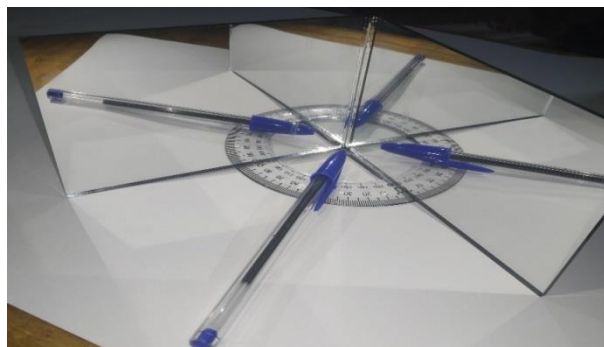
8.2 Associação de Espelhos Planos

Quando dois espelhos planos são colocados com uma de suas extremidades conectadas possibilitando a variação do ângulo θ entre estes dois espelhos, obtêm-se um número de imagens que pode ser determinado pela seguinte relação:

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1, \quad (1)$$

sendo n o número de imagens formadas na associação para dois espelhos planos. Se em alguma hipótese o número de imagens não for inteiro, deve ser feito o arredondamento. A Figura 18 apresenta a associação de dois espelhos planos com um ângulo θ de 90° entre si, formando, neste caso, três imagens.

Figura 18 – Formação de imagens em uma associação de espelhos.



Fonte: os autores.

Outro caso interessante, é quando se dispõe de dois espelhos planos posicionados paralelamente. Neste caso a imagem formada em um espelho serve de objeto para o outro espelho. Isso implica numa formação infinita de imagens. A Figura 19 mostra dois espelhos planos em paralelo e, como dito, percebe-se a formação de infinitas imagens.

Figura 19 – Formação de imagem em uma associação de espelhos paralelos.



Fonte: <https://tonocosmos.com.br/o-modelo-dos-espelhos-paralelos>. Acessado em: 22 out. 2022.

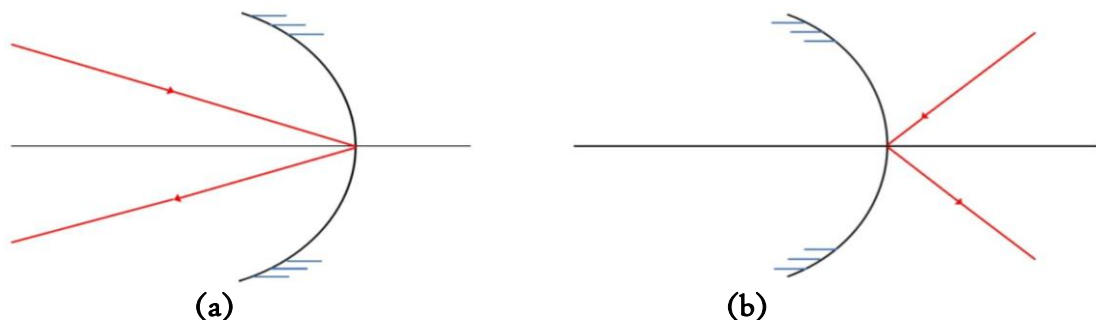
9 ESPELHOS ESFÉRICOS

Assim como o espelho plano possui inúmeras aplicações os espelhos esféricos também são muito úteis. Os espelhos esféricos são mais utilizados quando se deseja a produção de imagens ampliadas/reduzidas e um maior alcance do campo visual. Os espelhos esféricos são obtidos a partir do corte de uma superfície esférica, produzindo a chamada calota esférica, e dependendo da sua construção, pode-se produzir um espelho côncavo ou convexo.

100

Quando a superfície interior da calota esférica for espelhada, teremos um espelho côncavo, como ilustrado na Figura 20(a). Quando a superfície externa da calota esférica for espelhada, teremos um espelho convexo, como mostra a Figura 20(b).

Figura 20 – (a) Representação de um espelho esférico côncavo. (b) Representação de um espelho esférico convexo.



Fonte: os autores.

9.1 As Características dos Espelhos Esféricos

É importante aqui definir alguns termos técnicos de interesse quando se trata sobre os espelhos esféricos. São eles:

- **Centro de curvatura:** é o centro da superfície esférica que deu origem ao espelho. É representado pela letra C .
- **Vértice:** é o centro geométrico da calota esférica, representado pela letra V .
- **Foco principal:** o foco principal de um espelho esférico está no ponto médio entre o centro de curvatura C e o vértice V , e é representado pela letra F .
- **Distância focal:** é a distância entre o foco principal e o vértice do espelho, representado pela letra f , sendo o seu módulo dado por:

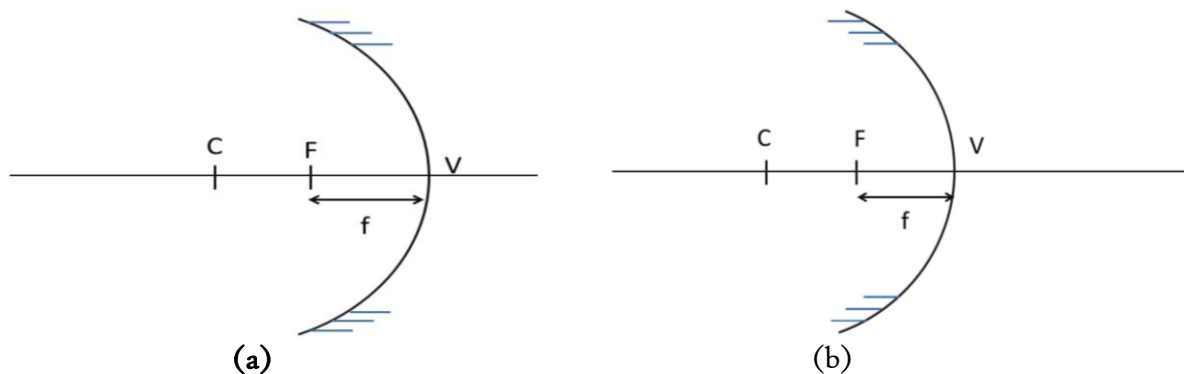
$$f = \frac{R}{2} \quad (2)$$

onde R é o raio da esfera que deu origem ao espelho esférico.

101

No espelho esférico côncavo, Figura 21(a), a distância focal f é positiva e no espelho esférico convexo, Figura 21(b), é negativa.

Figura 21 - (a) Características dos espelhos esféricos côncavos. (b) Características dos espelhos esféricos convexos.



Fonte: os autores.

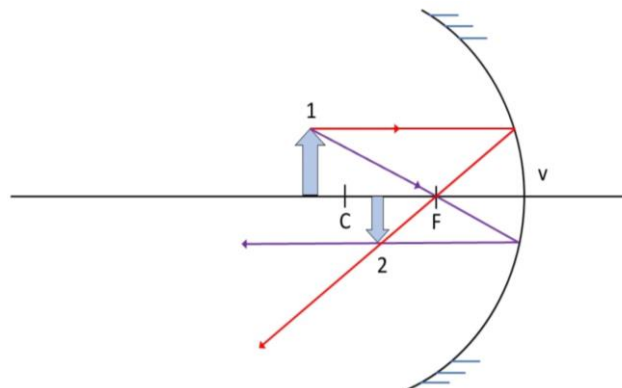
9.2 Espelho Côncavo

No espelho côncavo a construção da imagem depende da posição do objeto em relação ao espelho. Dessa forma, admite cinco configurações.

1º caso: objeto posicionado antes do centro de curvatura

O objeto (1) na Figura 22 antes do centro de curvatura, após traçar dois raios de luz. O primeiro em vermelho segue paralelo com o eixo principal, e após incidir no espelho é refletido e passa pelo foco principal F do espelho. O segundo raio de luz em roxo segue direto para o foco e após se refletir no espelho, se cruza com o primeiro raio de luz refletido, formando um ponto de cruzamento, o qual representa a formação de uma imagem real (2), invertida e menor que o objeto, Figura 22.

Figura 22 – Objeto situado antes do centro de curvatura.

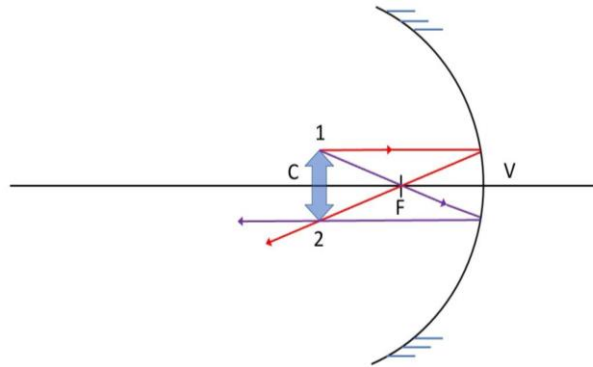


Fonte: os autores.

2º caso: objeto posicionado no centro de curvatura

O objeto (1) na Figura 23 no centro de curvatura. O primeiro raio de luz, em vermelho, é projetado paralelamente com o eixo principal e refletido passando pelo foco F. O segundo raio de luz roxo passa diretamente pelo foco sendo refletido pelo espelho, cruzando com o primeiro raio de luz. Nesta situação a formação da imagem (2) é real, invertida e do mesmo tamanho do objeto, Figura 23.

Figura 23 – Objeto no centro de curvatura.

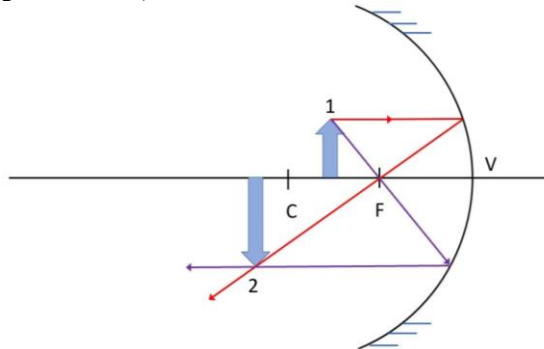


Fonte: os autores.

3º caso: objeto posicionado entre o centro de curvatura e o foco principal

Objeto (1) na Figura 24 entre o centro de curvatura e o foco. O raio de luz vermelho, paralelo ao eixo principal, é refletido e passa pelo foco F. O segundo raio de luz, em roxo, passa pelo foco e é refletido se cruzando com o primeiro raio de luz. Neste caso temos uma imagem real (2), invertida e maior que o objeto, Figura 24.

Figura 24 – Objeto entre o centro de curvatura e o foco.

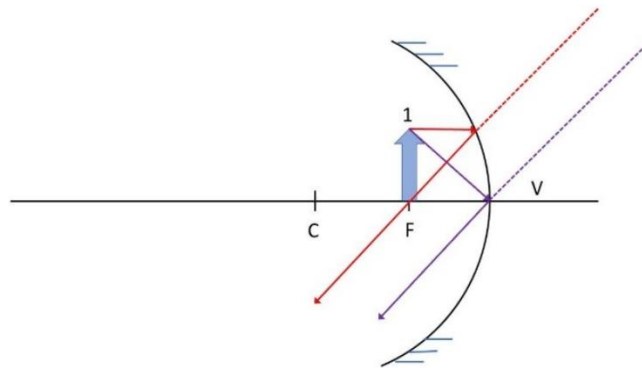


Fonte: os autores.

4º caso: objeto posicionado sobre o foco principal

O objeto (1) na Figura 25 no foco principal. Neste caso, tem-se o raio de luz vermelho paralelo ao eixo principal e passando pelo foco F. O raio de luz roxo passa diretamente pelo vértice e é refletido, mas neste caso os raios de luz não se cruzam, gerando assim uma imagem produzida no infinito, isto é, uma imagem que é dita “imagem imprópria”, Figura 25.

Figura 25 – Objeto no foco.

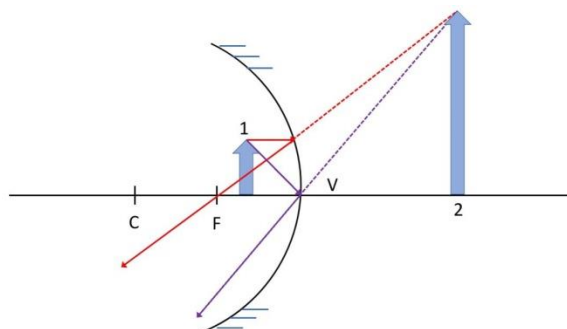


Fonte: os autores.

5º caso: objeto entre o foco principal e o vértice

O objeto (1) na Figura 26 entre o foco principal e o vértice. O raio de luz vermelho paralelo ao eixo principal é refletido pelo espelho e passa pelo foco principal. O segundo raio de luz, em roxo, incide diretamente no vértice e é refletido. Neste caso temos o prolongamento dos raios de luz refletidos, formando uma imagem virtual (2), direita e maior que o objeto, Figura 26.

Figura 26 – Objeto entre o foco e o vértice.



Fonte: os autores.

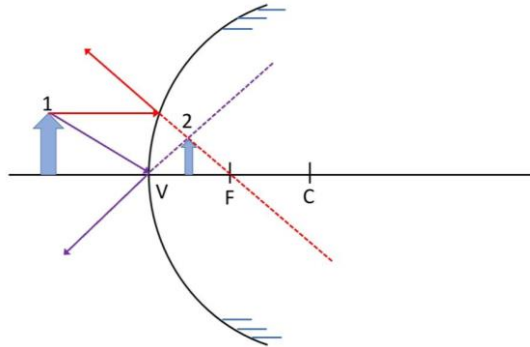
9.3. Espelho Convexo

O espelho convexo possibilita apenas a formação de imagens virtuais, direitas e menores que o objeto.

Objeto (1) na Figura 27 posicionado frente ao espelho convexo. O raio de luz vermelho paralelo ao eixo principal incide no espelho e é refletido. Em seguida, o raio de luz roxo incide diretamente no vértice e é refletido. Neste caso, o prolongamento do raio de luz vermelho refletido passará pelo foco, enquanto o raio roxo refletido será prolongado até cruzar com o primeiro raio de luz prolongado. Neste ponto de cruzamento dos

prolongamentos dos raios refletidos, ocorrerá a formação de uma imagem virtual (2), direita e menor que o objeto, Figura 27.

Figura 27 – Objeto frente a um espelho convexo.



Fonte: os autores.

10 A EQUAÇÃO DOS PONTOS CONJUGADOS

Costuma-se chamar de “equação dos pontos conjugados” a relação entre a posição do objeto p , a posição da imagem p' e a distância focal do espelho f . Essa equação é:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \quad (3)$$

Essa equação implica na utilização de um sistema de referência que tem como objetivo atribuir o sinal positivo ao que for real e negativo ao que for virtual. A região à frente do espelho corresponde a valores positivos, é onde se localizam objetos e imagens reais.

105

A região atrás do espelho corresponde a valores negativos, onde se localizam objetos e imagens virtuais. Como já mencionado, a distância focal f do espelho esférico côncavo é positiva e, no espelho esférico convexo é negativa.

11 REFRAÇÃO

A refração da luz é o fenômeno em que a luz incidente sobre uma superfície passa a se propagar em outro meio. Conseqüentemente a sua velocidade de propagação irá mudar. Este fenômeno consegue explicar a profundidade aparente dentro de uma piscina, o arco-íris, entre outros fenômenos.

11.1 Índice de Refração

O índice de refração é uma grandeza adimensional característico de cada meio material em que a luz se propaga. O índice de refração estabelece uma proporção entre a

velocidade de propagação da luz no meio, v , e a velocidade de propagação da luz no vácuo, c . Desse modo, o índice de refração n é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da luz no meio v , isto é:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4)$$

Se um raio luminoso sofre refração de um meio A para um meio B, e se a velocidade da luz no meio A é maior que a velocidade no meio B, o índice de refração do meio A é menor que o do meio B. Logo dizemos que o meio A é menos refringente que o meio B. Assim o meio B possui velocidade de propagação da luz menor que A, e conseqüentemente tem índice de refração maior que A, então dizemos que ele é mais refringente que o meio A. Este é o caso, por exemplo, da luz refratada do ar para a água.

Assim como a reflexão da luz, a refração da luz possui duas leis:

- **1ª lei:** o raio incidente, o raio refratado e a reta normal à superfície de separação são coplanares.
- **2ª lei:** para cada raio de luz refratado, vale a lei de Snell-Descartes:

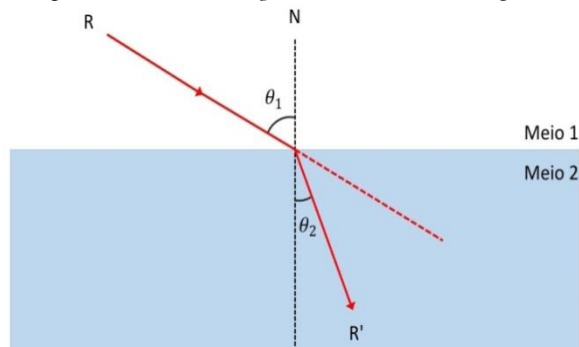
$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (5)$$

11.2 Refração da Luz Para Um Meio Mais Refringente

Neste caso, a relação entre o índice de refração do meio 1 e do meio 2 é a seguinte: $n_2 > n_1$, e segundo a lei de Snell-Descartes, os ângulos formados em relação à reta normal serão: $\theta_2 < \theta_1$.

Observando a Figura 28, o raio de luz R incidente formando um ângulo θ_1 é refratado do meio 1 para o meio 2. O raio de luz refratado é representado por R' . Neste caso devido ao meio 2 possuir índice de refração maior, o raio irá se aproximar da reta normal à superfície, formando um ângulo θ_2 . A reta tracejada indica a trajetória retilínea do raio incidente caso não sofresse refração.

Figura 28 – Refração para meio mais refringente.



Fonte: os autores.

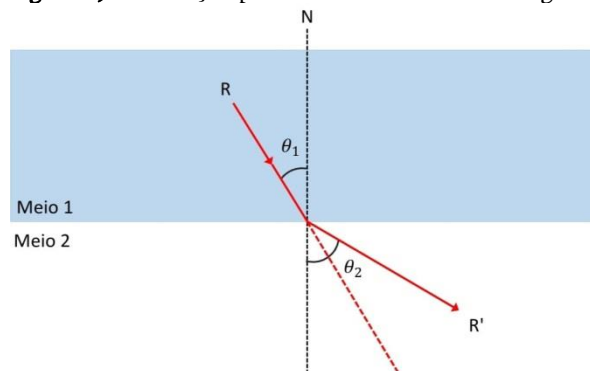
11.3 Refração da Luz Para Um Meio Menos Refringente

Neste caso, a relação entre o índice de refração do meio 1 e do meio 2 é a seguinte: $n_2 < n_1$, e pela lei de Snell-Descartes, os ângulos formados em relação à reta normal será: $\theta_2 > \theta_1$.

Observando a Figura 29, o raio de luz R incidente formando um ângulo θ_1 é refratada do meio 1 para o meio 2. O raio de luz R' é o raio refratado. Neste caso devido ao meio 2 possuir índice de refração menor, o raio irá se distanciar da reta normal à superfície formando um ângulo θ_2 . A reta tracejada indica a trajetória retilínea do raio incidente caso não sofresse refração.

107

Figura 29 – Refração para um meio menos refringente.



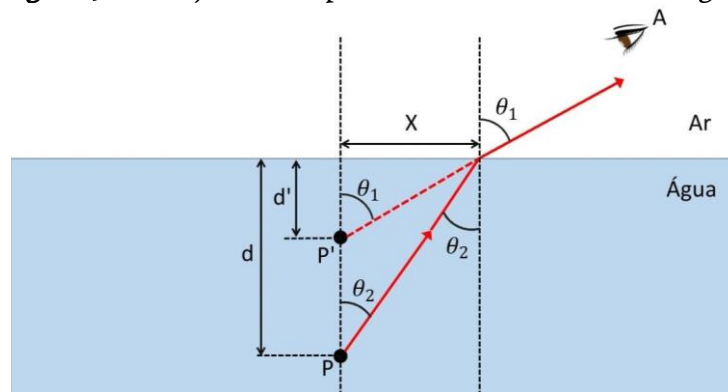
Fonte: os autores.

12 DIOPTRO PLANO

A separação plana entre dois meios é chamada de dioptro plano. Nota-se que ao observar um objeto no fundo de uma piscina um observador do lado de fora terá a sensação

de que este objeto está mais próximo da superfície da água do que realmente está. A isso se dá o nome de “profundidade aparente” que é menor que a profundidade real do objeto. Isso se deve por conta da refração da luz proveniente do objeto imerso. Este é o caso de um dioptro plano, uma vez que temos uma separação plana entre a água e o ar. Para calcular a profundidade aparente ou a profundidade real, considere a Figura 30 e a lei de Snell-Descartes.

Figura 30 – Objeto visto por um observador fora da água.



Fonte: os autores.

Na Figura 30, note que a existência de dois triângulos retângulos PX e P'X. Desse modo tem-se que: $\tan \theta_1 = X/P'$ e $\tan \theta_2 = X/P$. Dividindo $\tan \theta_2$ por $\tan \theta_1$ tem-se:

108

$$\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = \frac{P'}{P}$$

Como P' é representado na Figura 30 por d' a distância da imagem, e P a distância d do objeto, podemos substituir:

$$\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = \frac{d'}{d} \quad (6)$$

Considerando a Lei de Snell e pequenos ângulos, as seguintes relações são válidas:

$$\tan \theta_1 \cong \sin \theta_1 \quad (7)$$

$$\tan \theta_2 \cong \sin \theta_2 \quad (8)$$

Substituindo as expressões (5), (7) e (8) em (6) tem-se:

$$\frac{d'}{d} = \frac{n_1}{n_2} \quad (9)$$

Como o índice de refração n_2 indica a origem do raio de luz na água e n_1 indica o destino do raio de luz para o ar, pode-se escrever a equação do dioptro plano como:

$$\frac{d'}{d} = \frac{n_{destino}}{n_{origem}} \quad (10)$$

e como $n_{destino} < n_{origem}$, tem-se $d' < d$.

Para a situação em que a pessoa está dentro da água, o objeto posicionado fora da água terá uma altura aparente h' maior que a altura real h do objeto. Assim, neste caso a equação do dioptro plano pode ser escrita como:

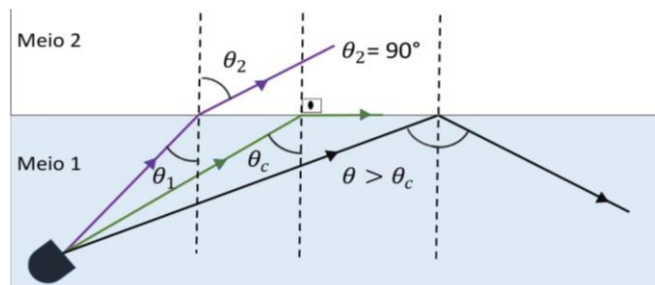
$$\frac{h'}{h} = \frac{n_{destino}}{n_{origem}} \quad (11)$$

13 REFLEXÃO INTERNA TOTAL

A refração é um fenômeno que não acontece isoladamente. Quando um feixe de luz incide sobre um dioptro plano, parte do raio de luz incidente é refratado e outra parte sofre reflexão para seu meio de origem. Entretanto, em certas situações, a luz incidente em um dioptro plano é totalmente refletida e não ocorre o fenômeno de refração. Na Figura 31 é representado um dioptro plano, onde n_1 é o índice de refração do meio 1 e n_2 é o índice de refração do meio 2, sendo $n_1 > n_2$. Um feixe de luz do meio 1 incide na superfície de separação dos dois meios. Na Figura 31 são apresentadas três situações por meio de um raio de luz roxo, um verde e um preto.

Figura 31 – Representação da reflexão interna total.

109



Fonte: os autores.

O feixe de luz roxo incidente possui ângulo θ_1 com a normal e é refratado para o meio 2 com um ângulo θ_2 em relação à normal. O feixe de luz verde não sofre refração, pois o ângulo de incidência está no seu valor máximo no qual possibilita a refração. Desse modo o ângulo θ_2 tende a 90° . Neste caso o ângulo de incidência é chamado de ângulo crítico, θ_c , logo o ângulo θ_2 é perpendicular à reta normal. Nessas condições, o feixe de luz preto incidente forma um ângulo θ com a normal e não sofre refração, sendo totalmente refletido para o seu meio de origem. Nesse caso vale a relação do ângulo crítico, onde o ângulo de incidência do feixe de luz preto é maior que o ângulo crítico θ_c , fazendo com que a refração deixe de existir. Esse fenômeno é chamado de “reflexão interna total”.

14 LENTES ESFÉRICAS

14.1 Definições

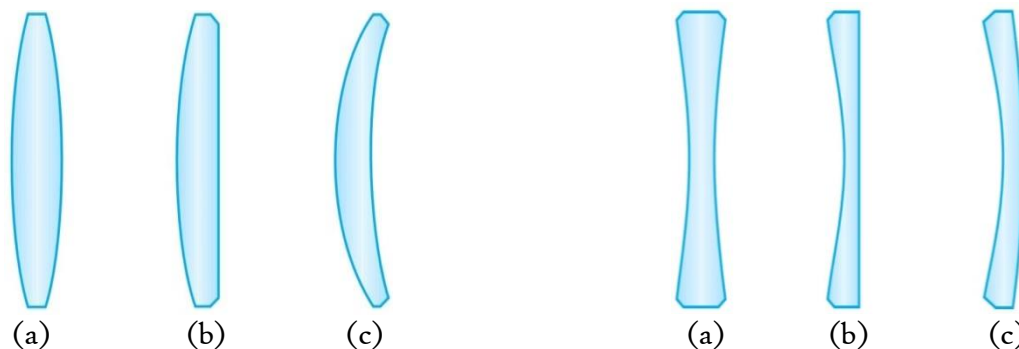
As lentes esféricas estão presentes em vários instrumentos ópticos e desempenham papel essencial em seus mecanismos. Exemplos da utilização de lentes podem ser vistos nas lunetas, binóculos, lupas, câmeras fotográficas, telescópios, microscópios, óculos, etc. Em cada instrumento óptico a lente empregada é feita de forma diferente, podendo ser composta de vidro, cristal ou acrílico. Assim como os espelhos esféricos, as lentes possuem duas categorias: “lentes de bordas finas” e “lentes de bordas grossas”.

As lentes de bordas finas caracterizam-se em três tipos de lentes: lente biconvexa (a), lente plano-convexa (b) e lente côncavo-convexa (c), Figura 32. As lentes de bordas grossas caracterizam-se em três tipos de lentes. Na Figura 33, lente bicôncava (a), lente plano-côncava (b) e lente convexo-côncava (c).

Quando uma lente esférica apresenta espessura desprezível em comparação aos raios de curvatura, são consideradas lentes delgadas. As lentes esféricas além de possuir duas categorias, possuem também dois comportamentos ópticos: o “comportamento convergente” que se refere a lentes convergentes e o “comportamento divergente” que se refere a lentes divergentes, detalhadas a seguir.

110

Figura 32 – Representação das lentes de bordas finas. **Figura 33** – Representação das lentes de bordas grossas.

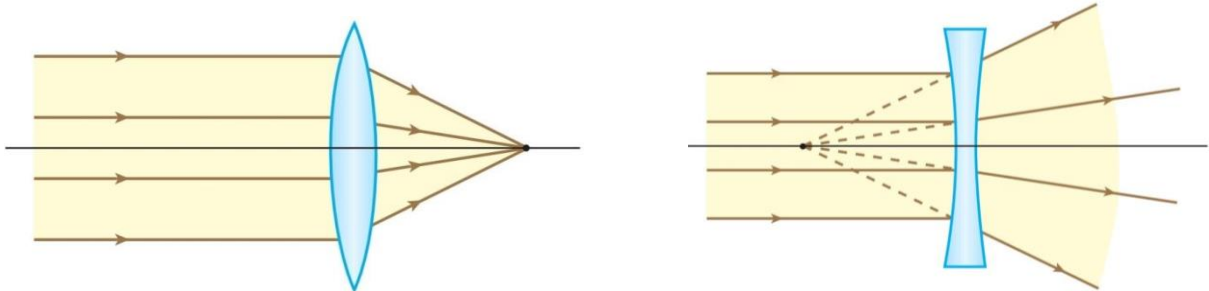


Fonte: os autores.

- **Lentes Convergentes:** quando raios de luz incidem paralelamente sobre a superfície de uma lente convergente, os raios de luz sofrem duas refrações (passando do ar para o vidro e depois do vidro para o ar) e são concentrados em um determinado ponto, Figura 34(a).

- **Lentes Divergentes:** quando raios de luz incidem paralelamente sobre a superfície de uma lente divergente, os raios de luz sofrem refrações com direções que divergem de um mesmo ponto, Figura 34(b).

Figura 34 – (a) Comportamento de uma lente convergente. **(b)** Comportamento de uma lente divergente.



Fonte: os autores.

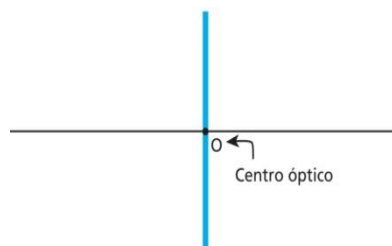
14.2 Elementos das Lentes Esféricas

Estes elementos são fundamentais no estudo das lentes, pois a partir dessas definições é possível a compreensão da construção de imagens em cada lente.

111

- **Centro óptico:** o ponto onde a representação da lente é perpendicular ao eixo principal é chamado de centro óptico da lente O, Figura 35.

Figura 35 – Representação do centro óptico de uma lente.



Fonte: os autores.

- **Representação simplificada para as lentes esféricas:** é a representação gráfica da lente. A Figura 36(a) mostra a representação para as lentes convergentes e a Figura 36(b) para as lentes divergentes.

Figura 36(a) – Lente convergente.

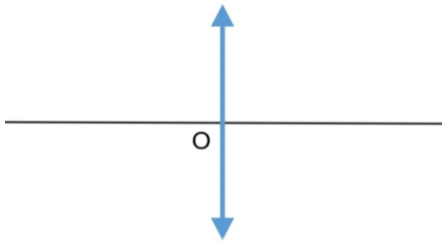
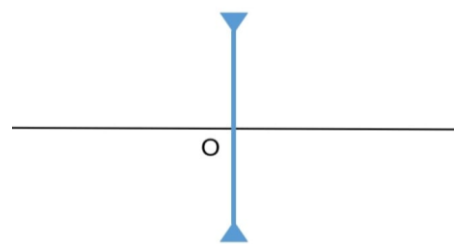


Figura 36(b) – Lente divergente.



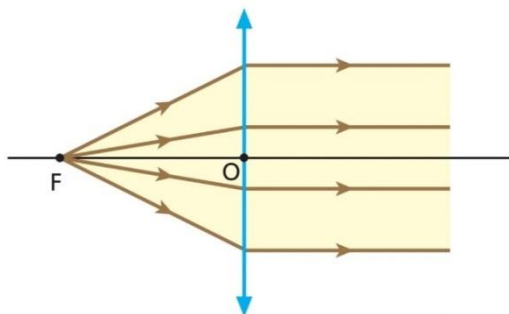
Fonte: os autores.

- **Foco da lente:** as lentes possuem dois focos simetricamente localizados em relação à lente: o foco principal objeto e o foco principal imagem. Em cada lente convergente e divergente, os focos estão posicionados de acordo com o seu comportamento óptico. Na lente convergente os focos são determinados pelos raios de luz. Desse modo seus focos são reais, enquanto na lente divergente os focos são determinados pelos prolongamentos dos raios de luz. Isso implica que seus focos são virtuais.

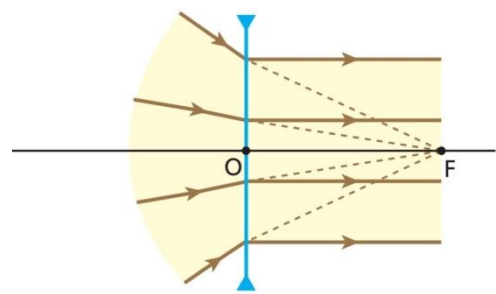
- **Foco principal objeto:** é o ponto localizado no eixo principal onde os raios de luz que incidem sobre a lente se alinham. É representado pela letra F . A Figura 37(a) mostra F para uma lente convergente e a Figura 37(b) para uma lente divergente.

112

Figura 37 – (a) Foco principal objeto: lente convergente.



(b) Foco principal objeto: lente divergente.

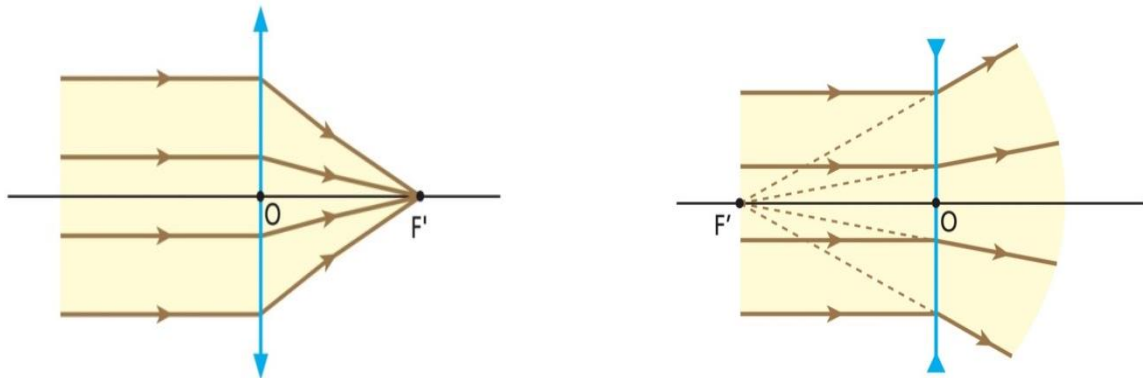


Fonte: os autores.

- **Foco principal imagem:** é o ponto localizado no eixo principal onde os raios de luz que emergem da lente se alinham. É representado por F' . A Figura 38(a) mostra F' para uma lente convergente e a Figura 38(b) para uma lente divergente.

Figura 38 – (a) Foco principal imagem: lente convergente.

(b) Foco principal imagem: lente divergente.

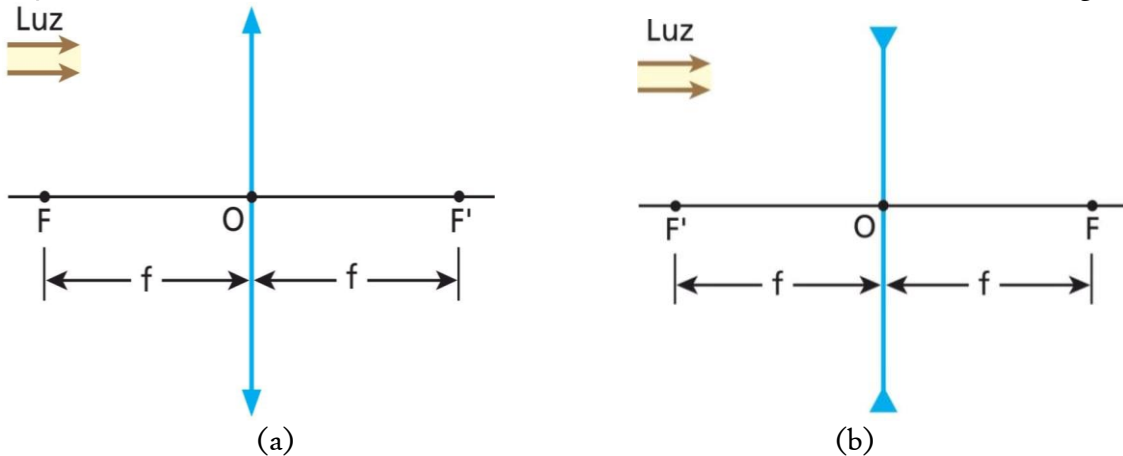


Fonte: os autores.

- **Distância focal:** é a distância entre o centro óptico e o foco principal objeto ou o foco principal imagem. É denominado de distância focal representado por f . A Figura 39(a) mostra f para uma lente convergente e a Figura 39(b) para uma lente divergente.

Figura 39 – (a) Distância focal: lente convergente.

(b) Distância focal: lente divergente.

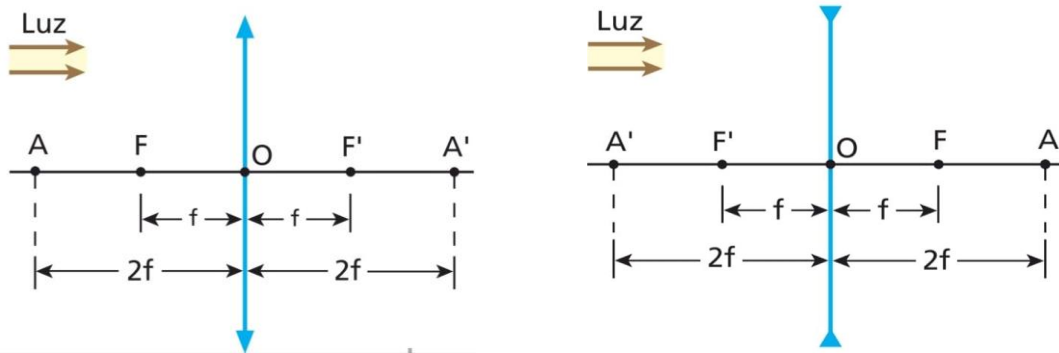


Fonte: os autores.

- **Pontos antiprincipais:** é a distância que corresponde a duas vezes a distância focal, ou seja, $2f$. Desse modo é configurado em ponto antiprincipal objeto A e ponto antiprincipal imagem A'. A Figura 40(a) mostra A e A' para uma lente convergente e a Figura 40(b) para uma lente divergente.

Figura 40 – (a) Pontos antiprincipais: lente convergente.

(b) pontos antiprincipais: lente divergente.



Fonte: os autores.

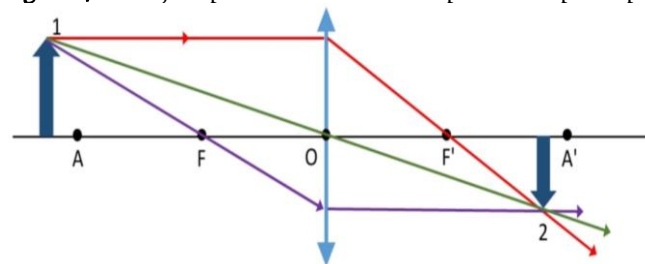
14.4. Construção de imagens nas lentes convergentes

1º caso

Objeto posicionado antes do ponto antiprincipal objeto (A). Posição indicado pelo número 1 (objeto) na Figura 41. O raio de luz vermelho incide paralelamente ao eixo óptico sendo refratado e emerge da direção do foco imagem (F'). O raio de luz verde incide no centro óptico e mantém sua direção. O raio de luz violeta incide sobre o foco objeto (F) sendo refratado e emerge paralelo com o eixo óptico. O encontro destes três raios de luz indica a posição 2 (imagem) na Figura 41, formando assim uma imagem real, invertida e menor que o objeto, como mostra a Figura 41.

114

Figura 41 – Objeto posicionado antes do ponto antiprincipal.



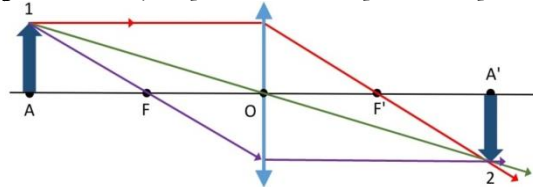
Fonte: os autores.

2º caso

Objeto posicionado sobre o ponto antiprincipal objeto (A). Posição indicada pelo número 1 (objeto) na Figura 42. O raio de luz vermelho incide paralelamente ao eixo óptico sendo refratado e emerge da direção do foco imagem (F'). O raio de luz verde incide no centro óptico e mantém sua direção. O raio de luz violeta incide sobre o foco objeto (F) sendo refratado e emerge paralelo com o eixo óptico. O encontro destes três raios de luz indica a

posição 2 (imagem) na Figura 42, formando assim uma imagem real, invertida e de tamanho igual ao objeto, como mostra a Figura 42.

Figura 42 – Objeto posicionado no ponto antiprincipal.



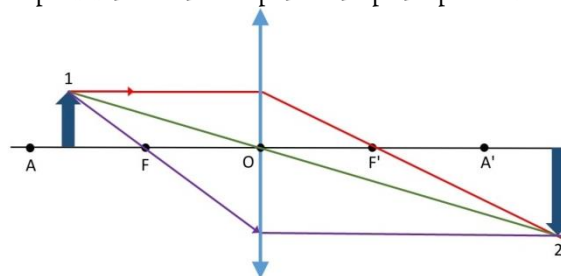
Fonte: os autores.

3º caso

Objeto posicionado entre o ponto antiprincipal objeto (A) e o foco principal objeto (F). Posição indicada pelo número 1 (objeto) na Figura 43. O raio de luz vermelho incide paralelamente ao eixo óptico sendo refratado e emerge da direção do foco imagem (F'). O raio de luz verde incide no centro óptico e mantém sua direção. O raio de luz violeta incide sobre o foco objeto (F) sendo refratado e emerge paralelo com o eixo óptico. O encontro destes três raios de luz indica a posição 2 (imagem) na Figura 43, formando assim uma

115

Figura 53 – Objeto posicionado entre o ponto antiprincipal e o foco principal objeto.

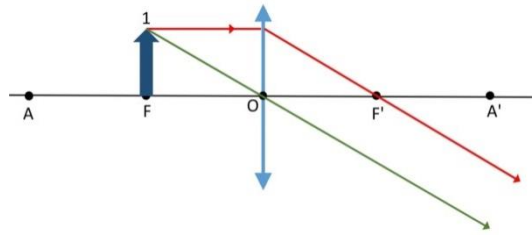


Fonte: os autores.

4º caso

Objeto posicionado sobre o foco principal objeto (F). Posição indicada pelo número 1 (objeto) na Figura 44. O raio de luz vermelho incide paralelamente ao eixo óptico sendo refratado e emerge da direção do foco imagem (F'). O raio de luz verde incide no centro óptico e mantém sua direção. Note que neste caso, os dois raios luminosos emergem paralelos entre si. Desse modo a formação da imagem é imprópria, como mostra a Figura 44.

Figura 44 – Objeto posicionado no foco principal objeto.

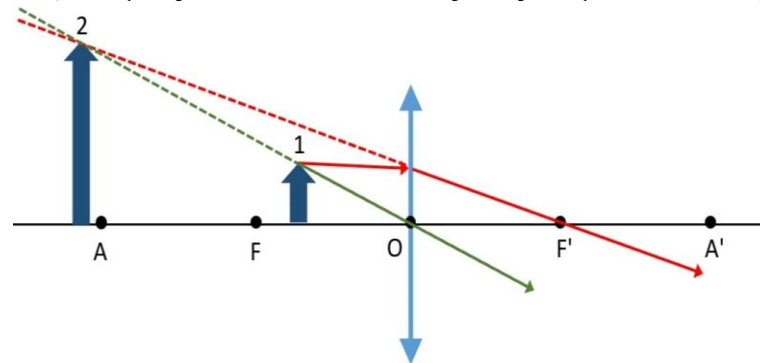


Fonte: os autores.

5º caso

Objeto posicionado entre foco principal objeto (F) e o centro óptico (O). Posição indicada pelo número 1 (objeto) na Figura 45. O raio de luz vermelho incide paralelamente ao eixo óptico sendo refratado e emerge da direção do foco imagem (F'). O raio de luz verde incide no centro óptico e mantém sua direção. Neste caso, os dois raios não seguem paralelos e a formação da imagem se dá pelo cruzamento do prolongamento dos dois raios de luz. Na posição 2 (imagem) da Figura 45, temos uma imagem virtual, direita e maior que o objeto.

Figura 45 – Objeto posicionado entre o foco principal objeto e o centro óptico.

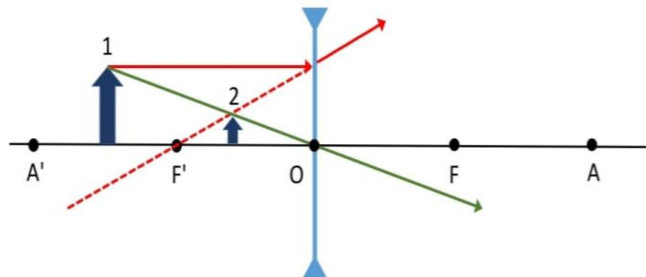


Fonte: os autores.

14.4 Construção de Imagens Nas Lentes Divergentes

Independentemente da posição do objeto frente à lente divergente, terá a construção de uma imagem virtual, direita e menor que o objeto. No caso da Figura 46, o objeto posicionado entre o ponto antiprincipal imagem (A') e foco principal imagem (F'). Posição indicada pelo número 1 (objeto) na Figura 46. O raio de luz vermelho incide paralelamente ao eixo óptico sendo refratado e emerge sem passar pelo foco principal objeto (F). O raio de luz verde incide no centro óptico e mantém sua direção. A imagem irá se formar pelo cruzamento do raio de luz verde e o prolongamento do raio de luz vermelho, indicado pela posição 2 (imagem) na Figura 46.

Figura 46 – Objeto posicionado entre o ponto antiprincipal imagem e o foco principal imagem.



Fonte: os autores.

COMENTÁRIOS FINAIS

A vida do homem moderno é cada vez mais influenciada e determinada pela ciência. O seu domínio e compreensão é então de vital importância para qualquer nação que queira se desenvolver e melhorar a qualidade de vida de seus habitantes. Como ciência a Física é composta por uma demasiada gama de conteúdos que ao longo das épocas foram repassados e aprimorados. A Física permite a descrição das leis da natureza e assim permite avanços tecnológicos, os quais servem para melhorar a qualidade de vida do ser humano. Uma importante área de estudo da física é a dos fenômenos luminosos.

117

Vimos que o tema sobre a óptica geométrica é parte vital em diversos aparelhos ópticos usados no cotidiano. Dessa forma, a compreensão da óptica geométrica é fundamental para a construção, compreensão e aperfeiçoamentos de diversos instrumentos ópticos para os mais variados fins, como diversão, correções da visão, pesquisa científica, etc. Assim, devido à importância que a óptica geométrica presta à sociedade ela se torna uma disciplina de relevância tanto no ensino médio quanto no ensino fundamental II. Dessa forma, a produção de bons textos didáticos e com precisão científica se fazem necessários. Aqui, procurou-se mostrar de maneira simples a aplicação dos conceitos físicos da óptica geométrica ministrada no ensino médio aos instrumentos ópticos.

Ressaltamos que a teoria sobre a óptica geométrica aqui apresentada pode ser exemplificada por meio de experimentos didáticos construídos com de materiais de baixo custo, recicláveis e de fácil acesso, como os apresentados nos seguintes artigos: (BARBOSA, 2022) e (GONÇALVES, 2022).

REFERÊNCIAS

BARBOSA, L. L.; RODRIGUES, C. G. Construção de instrumentos ópticos com materiais de baixo custo: caleidoscópio, periscópio, prisma e imagem na retina. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 6, p. 92-110, 2022.

DOI: [10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/educacao/instrumentos-opticos](https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/educacao/instrumentos-opticos)

BORGES, C. L. S.; RODRIGUES, C. G. Astronomia: breve história, principais conceitos e campos de atuação. **Brazilian Applied Science Review**, v. 6, pp. 545-577, 2022a.

BORGES, C. L. S.; RODRIGUES, C. G. Proposta de Modelos Experimentais Construídos com Materiais de Baixo Custo para o Ensino de Ciências em Temas de Astronomia. **Revista Educação e Linguagens**, 2022b.

GONÇALVES, L. L. B.; RODRIGUES, C. G. Experimentos práticos e didáticos de baixo custo para o ensino de óptica: reflexão, refração e espelhos planos. **Conjecturas**, v. 22, p. 916-935, 2022. DOI: <https://doi.org/10.53660/CONJ-1045-P02>

GONTIJO, L. M. A.; RODRIGUES, C. G. Sobre a Evolução do Conceito de Calor e Energia Térmica. **História da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces**, v. 24, p. 19-51, 2021. DOI: <https://doi.org/10.23925/2178-2911.2021V24P19-51>

MARTINS, J. P. M.; OSÓRIO, F. A. P.; RODRIGUES, C. G. Uma breve história da astrofísica. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, v. 3, p. e3102046, 2022. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i10.2046> [doi:10.47820/recima21.v3i10.2046

118

MARTINS, W. V. A.; RODRIGUES, C. G.; ANDRADE, E. V. O ensino sobre força de empuxo auxiliado por experimentos de fácil acesso. **Revista Mais Educação**, v. 5, pp.1082-1092, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51778/2595-9611.v5i1>

RODRIGUES, C. G. **Ondas, Acústica, Psicoacústica e Poluição Sonora**. Goiânia: do Autor, 2020. ISBN: 9786500068467