

Material teórico – Óptica Geométrica IV

Propriedades básicas e comportamento óptico de lentes

Segundo Ano do Ensino Médio

Autor: Thales Azevedo

Revisor: Lucas Lima



**Portal
da Física
OBMEP**

1. Introdução às lentes delgadas

Agora que já estudamos em detalhe os diversos aspectos da refração luminosa, podemos aplicar nossos conhecimentos ao estudo das **lentes**. Uma lente é um sistema óptico feito de material homogêneo e transparente à luz, cujo funcionamento é baseado na refração. De fato, podemos dizer que as lentes estão para a refração assim como os espelhos estão para a reflexão, e é possível traçar alguns paralelos entre os dois sistemas ópticos, como veremos.

As lentes possuem muitas aplicações do dia a dia, estando presentes em óculos, lupas, microscópios, telescópios, projetores, dentre vários outros exemplos.



Figura 1: Uma lupa consiste essencialmente de uma lente presa a uma haste.

Nos nossos estudos, vamos nos concentrar em uma classe particular de lentes, chamadas de **lentes delgadas**. Tais lentes são caracterizadas por possuírem uma espessura muito menor que seu raio de curvatura típico. Além disso, podemos classificar as lentes como **convergentes** ou **divergentes**, dependendo do seu formato e da relação entre o índice de refração do material de que é feita a lente e o índice de refração do meio no qual a lente está inserida.

1.1 Formatos e tipos de lentes delgadas

Para classificar uma lente delgada como *convergente* ou *divergente*, precisamos analisar o seu formato. Mais especificamente, é necessário avaliar se a lente em questão possui *borda fina* ou *borda grossa* (em relação à espessura da região central da lente). A figura a seguir ilustra a diferença entre os dois formatos de lente.



Figura 2: Do lado esquerdo, temos uma lente de borda fina (note que as extremidades são menos espessas que a região central). Do lado direito, temos uma lente de borda grossa (note que as extremidades são mais espessas que a região central).

De acordo com a convenção mais comum, lentes de borda fina ou grossa são representadas esquematicamente como mostrado na figura 3.



Figura 3: Do lado esquerdo, temos a representação de uma lente de borda fina (note que as setas apontam para fora da lente). Do lado direito, temos a representação de uma lente de borda grossa (note que as setas apontam para dentro da lente).

Finalmente, a classificação da lente também depende do seu índice de refração (n_L) e do índice de refração do meio no qual ela está inserida (n_M), como mencionado na introdução. Na situação mais comum, temos $n_L > n_M$. Neste caso, lentes de borda fina são convergentes, enquanto lentes de borda grossa são divergentes. Se $n_L < n_M$, então a classificação é invertida. Tais informações estão resumidas na tabela abaixo. Note que um mesmo objeto pode funcionar como uma lente convergente ou uma lente divergente, dependendo do meio no qual está inserido.

	$n_L > n_M$ (mais comum)	$n_L < n_M$ (menos comum)
Borda fina	Lente convergente	Lente divergente
Borda grossa	Lente divergente	Lente convergente

Tabela 1: Classificação de lentes de acordo com seu formato e índice de refração.

Mas o que significa, na prática, uma lente ser convergente ou divergente? O fato de a lente ser *convergente* implica que, quando raios luminosos incidem sobre a lente paralelamente ao seu eixo de simetria (chamado de *eixo principal* ou *eixo focal*), aqueles raios sofrem refração e *convergem para um único ponto*. Por outro lado, se a lente é *divergente*, aqueles raios paralelos sofrem refração e *divergem, como se tivessem partido de um único ponto*. A figura abaixo, na qual supomos $n_L > n_M$, ilustra essas duas possibilidades.

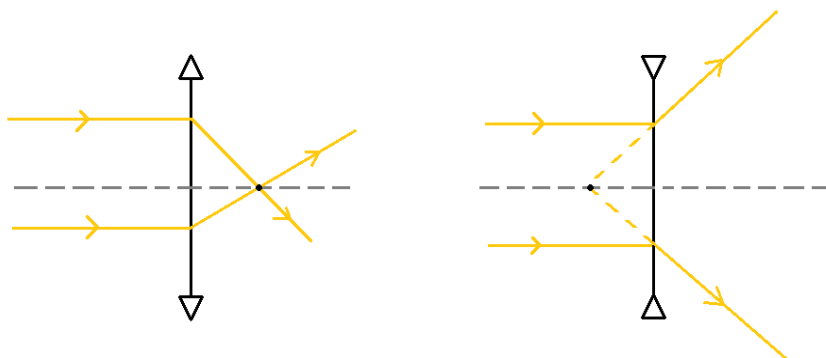


Figura 4: Do lado esquerdo, temos a representação de raios luminosos incidindo paralelamente sobre uma lente convergente. Do lado direito, temos a representação de raios luminosos incidindo paralelamente sobre uma lente divergente. (Note que estamos supondo $n_L > n_M$).

1.2 Propriedades geométricas das lentes delgadas

Para concluir esta seção introdutória, vamos definir algumas propriedades geométricas importantes das lentes delgadas, sejam elas convergentes ou divergentes. Observe a figura 5, abaixo. Nela, está representada uma lente genérica (omitimos propositalmente a informação sobre a borda da lente, que não é relevante aqui), bem como seu eixo de simetria e alguns pontos importantes.

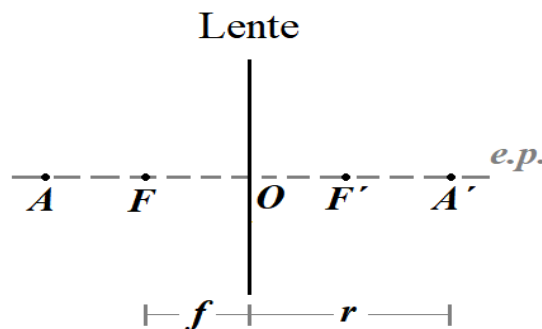


Figura 5: Propriedades geométricas de uma lente delgada.

Como já adiantamos no final da seção anterior, o eixo de simetria recebe o nome de *eixo principal* ou *eixo focal*. O ponto O onde esse eixo intercepta a lente é chamado de *centro óptico* da lente. Os pontos F e F' são os focos da lente, enquanto os pontos A e A' são chamados de pontos antiprincipais.

A distância f entre O e F (que é igual à distância entre O e F'), é a distância focal da lente; já a distância entre O e A (que é igual à distância entre O e A') é o raio da lente, denotado por r . Assim como nos espelhos esféricos, vale a relação $r = 2f$, o que resulta numa analogia entre o ponto antiprincipal da lente e o centro de curvatura de um espelho esférico. De fato, esse é um dos paralelos que podemos traçar entre lentes e espelhos esféricos. Veremos mais alguns nas próximas seções.

2. Tipos e nomenclatura de lentes esféricas

Até aqui, temos classificado os formatos das lentes que estudamos de forma genérica, como *lentes de borda fina* ou *lentes de borda grossa*. Vimos também que, na situação (mais comum) em que o índice de refração do material de que a lente é feita é maior que o índice de refração do meio no qual ela está inserida, uma lente de borda fina é convergente, enquanto uma lente de borda grossa é divergente.

Aprofundando nosso estudo das lentes delgadas, vamos agora discutir alguns formatos específicos de lentes, conhecidas como **lentes esféricas**. Nessas lentes, pelo menos uma parte da sua superfície tem o formato de uma calota esférica, como ficará mais claro no decorrer deste texto. Veremos que as lentes esféricas de borda fina ou grossa podem ser de seis tipos diferentes: **biconvexa**, **plano-convexa**, **côncavo-convexa**, **bicôncava**, **plano-côncava** ou **convexo-côncava**. Tal nomenclatura será explicada nas próximas subseções.

2.1 Tipos de lentes esféricas de borda fina

Lentes esféricas de borda fina possuem o formato da região compreendida entre duas calotas esféricas, ou da região compreendida entre uma calota esférica e um plano (note que este pode ser entendido como uma calota esférica de raio infinito).

Se uma parte da superfície da lente corresponde à parte externa de uma calota esférica, dizemos que essa parte da lente é convexa. Por outro lado, se uma parte da lente corresponde à parte interna de uma calota esférica, dizemos que essa parte da lente é côncava. Tal nomenclatura é análoga àquela dos espelho esféricos.

Se a superfície completa de uma lente é formada pela união de duas superfícies convexas, a lente é chamada de *biconvexa*. Um exemplo de lente biconvexa é dado na figura a seguir. Note que os raios das calotas esféricas que dão formato à lente não precisam ser iguais.

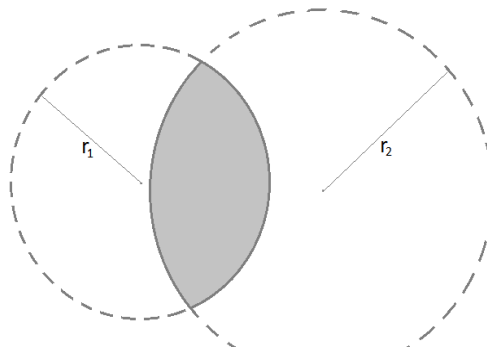


Figura 6: Exemplo de lente esférica *biconvexa*.

Quando a lente tem o formato da região compreendida entre o interior de uma calota esférica e um dado plano, como ilustrado na figura abaixo, ela recebe o nome de *plano-convexa*.

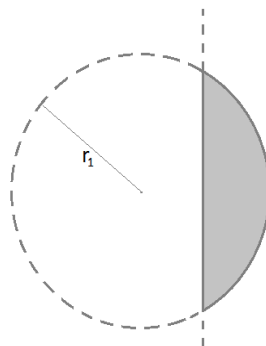


Figura 7: Exemplo de lente esférica *plano-convexa*.

Finalmente, uma lente de borda fina pode ter sua superfície completa formada pela união de uma superfície convexa com uma superfície côncava. Nesse caso, é necessário que o raio de curvatura da superfície côncava seja maior que o raio de curvatura da superfície convexa, e dizemos que a lente é *côncavo-convexa*. Veja um exemplo na figura abaixo.

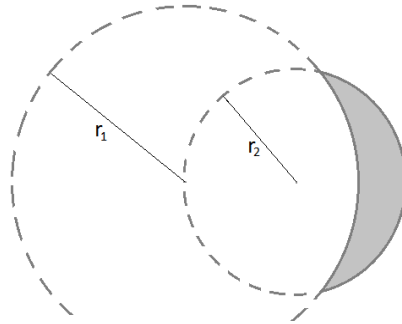


Figura 8: Exemplo de lente esférica *côncavo-convexa* (note que $r_1 > r_2$).

Uma pergunta bastante natural que pode surgir aqui é: por que chamamos essa lente de *côncavo-convexa* e não de *convexo-côncava*? A razão é que, por convenção, a primeira palavra que compõe a expressão corresponde à superfície de maior raio de curvatura (note que isso também é consistente com a expressão “plano-convexa”). De fato, *convexo-côncava* denota um tipo de lente esférica de borda grossa, como veremos na próxima subseção.

2.2 Tipos de lentes esféricas de borda grossa

Lentes esféricas de borda grossa possuem o formato da região compreendida entre duas calotas esféricas, ou da região compreendida entre o exterior de uma calota esférica e um plano, e delimitada por dois outros planos paralelos. Aplicam-se os adjetivos “côncava” e “convexa” da mesma maneira que vimos para as lentes esféricas de borda fina.

Se a superfície completa de uma lente é formada pela união de duas superfícies côncavas, além dos planos paralelos que sempre estão presentes em lentes de borda grossa, a lente é chamada de *bicôncava*. Um exemplo de lente bicôncava é dado na figura a seguir. Também nesse caso, os raios das calotas esféricas que dão formato à lente não precisam ser iguais.

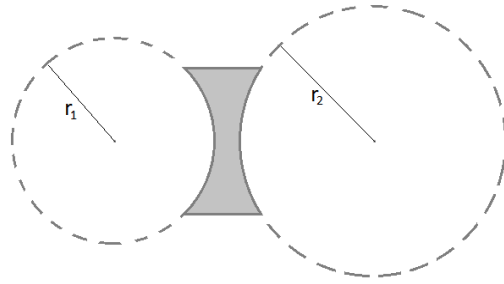


Figura 9: Exemplo de lente esférica *bicôncava*.

Quando a lente tem o formato da região compreendida entre o exterior de uma calota esférica e um dado plano, como ilustrado na figura abaixo, ela recebe o nome de *plano-côncava*.

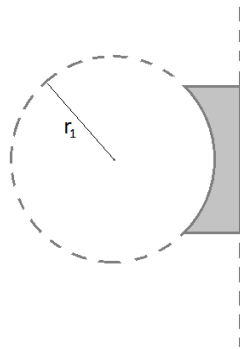


Figura 10: Exemplo de lente esférica *plano-côncava*.

Finalmente, uma lente de borda grossa pode ter sua superfície completa formada pela união de uma superfície convexa com os planos paralelos e uma superfície côncava. Nesse caso, é necessário que o raio de curvatura da superfície convexa seja maior que o raio de curvatura da superfície côncava, e dizemos que a lente é *convexo-côncava*, como adiantamos no final da seção anterior. Veja um exemplo na figura abaixo.

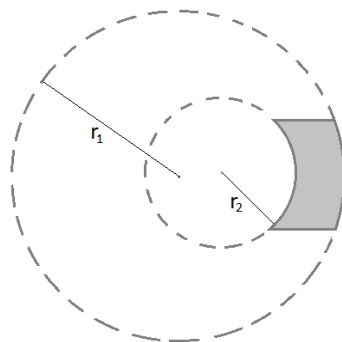


Figura 11: Exemplo de lente esférica *convexo-côncava* (note que $r_1 > r_2$).

2.3 Comportamento das lentes esféricas

Podemos agora justificar as afirmações feitas na seção 1 sobre lentes delgadas, ou seja, que uma lente de borda fina é convergente, enquanto uma lente de borda grossa é divergente (supondo que o material de que a lente é feita seja mais refringente que o meio no qual está inserida; senão, vale o contrário).

Analisando raios luminosos que incidem paralelamente ao eixo de simetria das lentes esféricas, usando as leis da refração da luz, verificamos os comportamentos esperados, como ilustra a figura a seguir para o caso das lentes plano-convexa e plano-côncava. Deixamos os casos envolvendo os outros tipos de lentes esféricas como exercícios para quem tiver interesse.

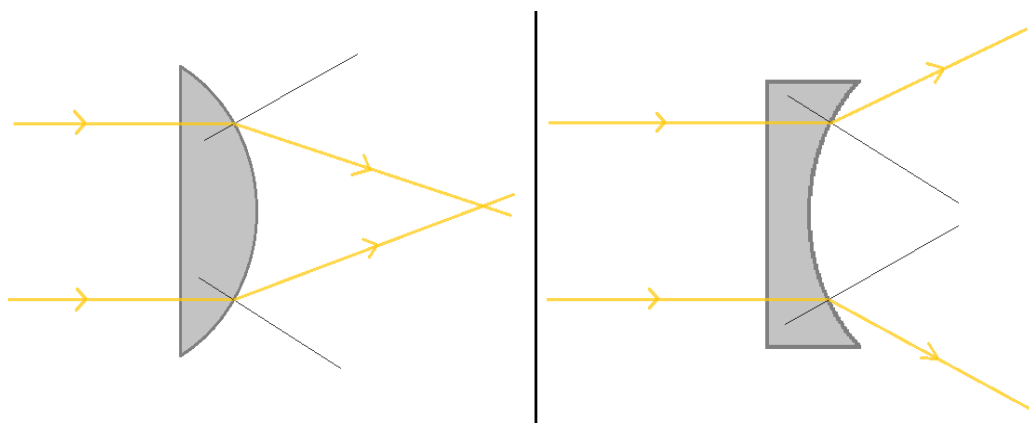


Figura 12: Comportamento de raios luminosos que incidem paralelamente ao eixo de simetria de uma lente plano-convexa (convergente) e de uma lente plano-côncava (divergente). As retas normais foram incluídas na figura para facilitar a determinação dos raios refratados.

3. Refração de raios particulares em lentes delgadas

Nesta seção, continuaremos o estudo das lentes delgadas, iniciado nas seções anteriores. Em particular, analisaremos os comportamentos de alguns **raios particulares** que incidem sobre as lentes convergentes e divergentes, que são essenciais para compreender a formação de imagens por tais lentes, conforme veremos mais adiante.

Os raios particulares que estudaremos têm propriedades muito semelhantes às dos raios particulares estudados no contexto dos espelhos esféricos. A principal diferença é

que, enquanto os raios luminosos são *refletidos* pelos espelhos, eles sofrem *refração* ao entrar em contato com as lentes.

3.1 Refração de raios particulares nas lentes convergentes

Para compreender a formação de imagens por lentes delgadas, é importante conhecer os comportamentos de alguns raios particulares ao serem refratados por aquelas lentes. Esses são os raios incidentes que passam (ou cujos prolongamentos passam) por um dos pontos especiais sobre o eixo focal da lente: os *pontos antiprincipais*, os *focos* ou o *centro óptico*. Ao longo desta seção, suporemos sempre que o índice de refração do material de que é feita a lente é maior que o índice de refração do meio do qual aquela está inserida.

Apresentamos abaixo uma tabela com um resumo dos raios particulares e seu comportamento após sofrerem refração em uma lente *convergente*. Note as semelhanças com os raios particulares estudados no contexto dos espelhos esféricos.

Raio incidente passa pelo:	Raio é refratado:
Ponto antiprincipal	Na direção do ponto antiprincipal imagem (atrás da lente).
Foco	Paralelo ao eixo principal.
Centro óptico	Sem mudar de direção.

Tabela 2: Resumo do comportamento dos raios particulares após sofrerem refração em uma lente *convergente*.

Repare que, de acordo com o princípio da reversibilidade dos raios luminosos, o comportamento apresentado na terceira linha da tabela implica que os raios que incidem paralelamente ao eixo principal são refratados na direção do foco, como já havíamos comentado no texto anterior. Além disso, os comportamentos apresentados acima nos permitem traçar um claro paralelo entre os pontos antiprincipais da lente e o centro de curvatura de um espelho esférico, enquanto o centro óptico é análogo ao vértice.

A figura abaixo ilustra a refração dos raios particulares no caso de uma lente convergente.

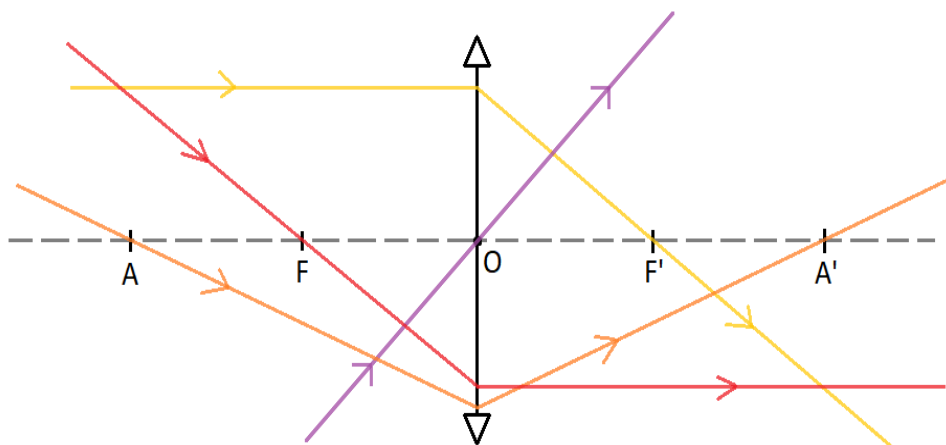


Figura 13: Raios particulares sendo refratados por uma lente *convergente*.

Note que a determinação do comportamento dos raios particulares acima não envolve traçar seus prolongamentos. Neste sentido, as lentes convergentes são análogas aos espelhos côncavos. Como veremos a seguir, a situação é bem diferente no caso das lentes divergentes.

3.2 Refração de raios particulares nas lentes divergentes

Uma vez concluída a análise dos raios particulares na presença de uma lente convergente, vamos agora discutir o comportamento de alguns raios particulares ao serem refratados por uma lente *divergente*.

Podemos começar com o caso que é idêntico nos dois tipos de lente. De fato, assim como ocorre na lente convergente, raios luminosos que incidem sobre centro óptico O da lente divergente também são transmitidos sem alterar sua direção. Os demais raios particulares são definidos não pelos pontos onde cruzam o eixo focal, mas pelos pontos pelos quais os seus prolongamentos passam.

Apresentamos abaixo uma tabela com um resumo dos raios particulares e seu comportamento após sofrerem refração em uma lente *divergente*.

Prolongamento do raio incidente passa pelo:	Raio é refratado:
Ponto antiprincipal imagem (atrás da lente)	Na direção do ponto antiprincipal objeto (na frente da lente).

Foco imagem (atrás da lente)	Paralelo ao eixo principal.
Centro óptico	Sem mudar de direção.

Tabela 3: Resumo do comportamento dos raios particulares após sofrerem refração em uma lente *divergente*.

Mais uma vez, o princípio da reversibilidade dos raios luminosos permite-nos concluir que o comportamento apresentado na terceira linha da tabela implica que os raios que incidem paralelamente ao eixo principal são refratados na direção do foco objeto, como já havíamos comentado no texto anterior.

A figura abaixo ilustra a refração dos raios particulares no caso de uma lente divergente.

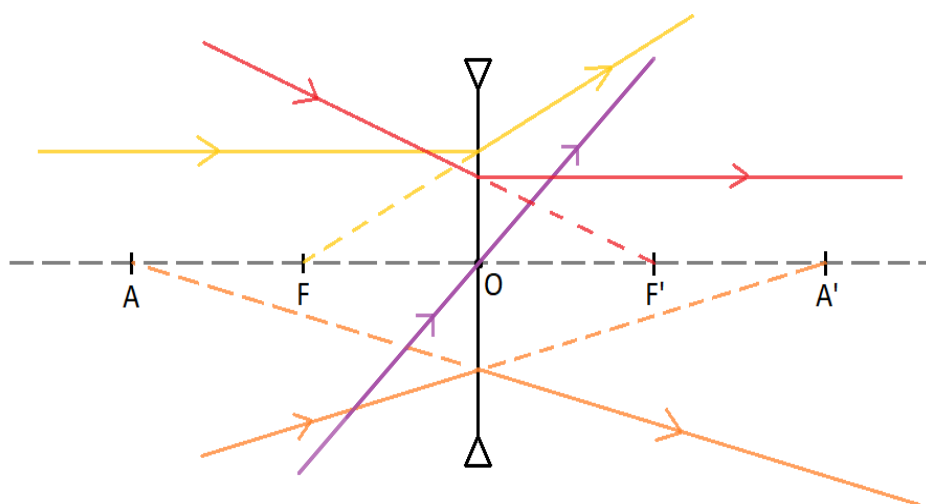


Figura 14: Raios particulares sendo refratados por uma lente *divergente*.

Note que a determinação do comportamento dos raios particulares acima envolve traçar seus prolongamentos. Neste sentido, as lentes divergentes são análogas aos espelhos convexos.

Como veremos mais adiante, essas analogias entre espelhos côncavos e lentes convergentes e entre espelhos convexos e lentes divergentes também se farão presentes no estudo da formação de imagens por lentes delgadas, onde a análise dos raios particulares é fundamental.

4. Referências

[1]

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/Magnifying_Glass_Photo.jpg

(Figura 1, acesso em 20/02/2021)

