



## **PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA**

### **PRODUTO EDUCACIONAL**

Sequência de ensino: A Física contemporânea no Ensino Médio: uma proposta utilizando o conceito de refração negativa

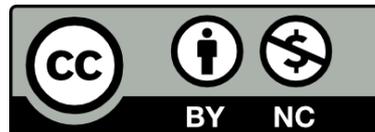
Fernando Grillo Araujo

Gustavo Isaac Killner

São Paulo (SP)

**2016**

Este trabalho está licenciado sob uma Licença Creative Commons Atribuição-  
NãoComercial 4.0 Internacional. Para ver uma cópia desta licença, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.



Produto Educacional apresentado como requisito à obtenção do grau de Mestre em Ensino de Ciências e Matemática pelo Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus São Paulo. Defesa realizada em 29/09/2016.

## AUTORES

**Fernando Grillo Araujo:** Possui Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática, na modalidade física. Atualmente é professor de física no ensino médio da Escola Estadual Prof. Luiza Mendes Correia de Sousa.

**Gustavo Isaac Killner:** Possui graduação em Física (licenciatura e bacharelado) pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) e em Pedagogia pela Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo (FEUSP). Especialização em Ensino Mediado por Computadores pela Universidade de Tsukuba (Japão) e em formação de professores para cursos semipresenciais e EaD pela UNESP. Concluiu mestrado em Ensino de Ciências (ênfase em ensino de física mediado por computadores) e doutorado em Educação (opção: didática, teorias de ensino e práticas pedagógicas), ambos pela Universidade de São Paulo. Atualmente é docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP - SP) e também leciona no Colégio Santa Cruz. Colaborador do INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira), CEESP (Conselho Estadual de Educação de São Paulo) e da CGEB (Coordenadoria de Gestão da Educação Básica do Estado de São Paulo) e consultor da Secretaria Municipal de Educação (SME). Autor de livros didáticos e artigos de divulgação científica e sequências didáticas para revistas. Tem experiência na área de Educação (fundamental, médio e superior), com ênfase em Ensino de Ciências, Didática e Tecnologia Educacional, atuando principalmente nos seguintes temas: Multiculturalismo, Ensino de Ciências, Tecnologia Educacional, EaD; Formação Continuada, Educação Indígena e quilombola e Formação de Professores.

## 9 PRODUTO FINAL

Neste capítulo apresentamos ao leitor o produto gerado através da pesquisa realizada. Trata-se de uma sequência didática sobre refração, com a inserção de elementos da física contemporânea – refração negativa. Esperamos que essa sequência didática seja um passo no sentido de promover um ensino mais inovador, colaborando especialmente com o professor de física, na medida em que pretende oferecer a oportunidade de promover, em sala de aula, discussões a respeito de uma física mais atual, que desperta maior interesse e entusiasmo por parte dos alunos sobre o conceito de óptica.

### 9.1 Introdução

Atualmente, a Física Contemporânea é a física que dá suporte aos avanços tecnológicos, pois trata-se da ciência que se estuda e se desenvolve atualmente, nas universidades, empresas e institutos de pesquisa, públicos e privados. Com isso, acreditamos que a Física Contemporânea, por estar em desenvolvimento, pode proporcionar aos alunos um entusiasmo ainda maior, devido ao fato de não ser algo pronto, já concluído, mas algo que poderia fazê-lo pensar, projetar e refletir – indo além da imaginação – sobre diversos caminhos, aplicações e possibilidades que esta ciência pode nos proporcionar.

Seguindo os PCN+, e levando em consideração a realidade dos alunos, bem como a revolução tecnológica que vivemos nos dias de hoje, observa-se que a Física Clássica, mesmo tendo a sua importância no ensino, não dá conta de explicar algumas tecnologias, principalmente as futuras tecnologias, o que tornaria fundamental a inserção da Contemporânea no ensino médio. Como podemos ler nos PCN+:

A Física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos (BRASIL, 2002, p. 59).

Dessa forma, o ensino de física deve proporcionar ao aluno, uma apropriação do conhecimento, para uso não apenas em seu cotidiano, fazendo uma compreensão do mundo no qual está inserido, mas que também lhe permita compreender as novas tecnologias que o permeiam, bem como refletir sobre as

futuras tecnologias, que mesmo não estando em seu cotidiano, já faz parte da realidade atual, podendo assim construir um pensamento crítico e autônomo, capaz de interferir e contribuir na sociedade a qual faz parte.

Entre os diversos assuntos relacionados à Física Contemporânea, o conceito de luz é um dos mais presentes (comunicação por fibras óticas, televisores, telas de LCD e plasma, sensores de presença, cirurgias a laser entre outros), o que evidencia a importância de aprimorar este conceito, tanto na perspectiva da Física Clássica, como também na perspectiva da Física Contemporânea. No entanto, o conceito de luz, como grande parte dos conceitos de física, é tratado nas escolas de forma abstrata e descritiva – medida de ângulos, memorização de conceitos e fórmulas e princípios de trigonometria (GIRCOREANO, 2001), voltado bem mais para física clássica, e não abordando os conceitos pelo viés da FMC.

Pensando no ensino de óptica através da Física Contemporânea, Santos (2011) menciona que a óptica geométrica deveria ter posição de destaque nos cursos introdutórios de física no ensino médio, pois segundo ele, os princípios da óptica geométrica possibilitam compreender diversos fenômenos naturais, além de outras inúmeras aplicações, o que proporcionaria aos estudantes perceber, de maneira fácil, como os modelos abstratos da matemática são aplicados a descrições de sistemas reais. Porém, o autor também traz um dos motivos pelo qual ele acredita contribuir para a desvalorização do conceito na escola: a falsa ideia de que os princípios da óptica seriam uma área científica esgotada.

Para se contrapor a isso, Santos (2011) destaca os avanços nessa área no século XX, citando como exemplo os raios laser e a óptica quântica, os quais não chegam à sala de aula devido a sua difícil compreensão conceitual. Além desses, também são citados avanços mais recentes e importantes, como os metamateriais com índice de refração negativa. O autor propõe a inserção desse e outros temas, de maneira acessível para o professor de física no ensino médio.

Pensando na importância da tecnologia na sociedade e na necessidade de discuti-la no ensino através da Física Contemporânea, bem como nas condições de ensino das escolas nos dias atuais, propomos trazer neste trabalho uma sequência didática com a inserção de elementos de Física Contemporânea.

Neste trabalho, optou-se pelo campo conceitual de óptica, no qual será destacado o conceito de refração negativa através da óptica geométrica, pois acreditamos que sobre este conceito o professor poderá, através da Física Clássica,

trabalhar com ideias da Física Contemporânea, com uma metodologia acessível às condições de ensino presentes nas escolas, além de trazer para sala de aula discussões sobre novas e futuras tecnologias.

## 9.2 Refração Negativa

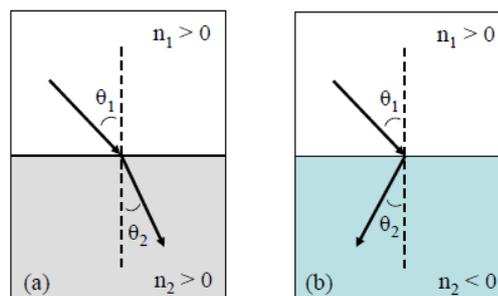
Entende-se sobre refração, um fenômeno ligado ao comportamento da luz quando passa de um meio para outro, onde a luz sofre um desvio em sua trajetória, devido a variação de sua velocidade ao passar de um meio para outro. Essa mudança de velocidade é explicada em razão das diferenças entre as estruturas atômicas de cada meio, oferecendo maior ou menor resistência na passagem da luz, podendo então, provocar na luz uma redução ou um aumento sua velocidade.

A velocidade da luz no meio dependerá da densidade do material, ou seja, quanto mais denso for o material, menor será a velocidade de propagação da luz em seu interior, da mesma forma quanto menor for a densidade do material, maior será a velocidade de propagação da luz no seu interior. Logo, dizemos que cada material possui um índice ( $n$ ) de refração da luz, que é determinado pela razão entre a velocidade da luz ( $c$ ) no vácuo e a velocidade da luz ( $v$ ) no novo meio:

$$n = \frac{c}{v}$$

A refração negativa é um fenômeno que, ao contrário da refração convencional, não é observado na natureza, e sim criado em laboratório, através dos metamateriais, materiais compostos por estruturas artificiais, formadas pelo arranjo regular de minúsculos circuitos elétricos, que podem ser projetados para terem uma propriedade eletromagnética desejada, desempenhando assim, o papel das “moléculas” do material de refração negativa.

A diferença no comportamento da luz, entre a refração convencional e a refração negativado pode ser observada na figura abaixo:

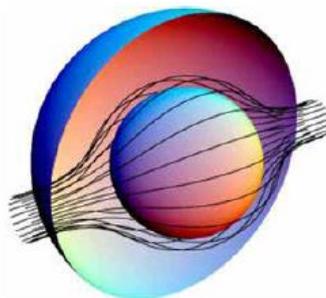


**Figura 9.1:** (a) Refração convencional. (b) Refração negativa

Fonte: Santos, W. (2011)

Conforme observado na figura (b), a luz sofre um desvio como se fosse refletido de volta, porém mesmo para este comportamento da luz a lei de Snell – que explica o índice de refração dos meios – também é válida para este comportamento, com a diferença de que o índice de refração, bem como o ângulo refratado terão valores negativos. Veja na figura abaixo uma imagem fictícia de uma caneta mergulhada em um copo, cujo líquido dentro do copo proporcionaria o fenômeno de refração negativa (à direita) frente ao fenômeno de refração convencional (à esquerda).

Sobre refração negativa, encontramos no trabalho de Santos (2011) alguns avanços com a criação desse fenômeno através dos metamateriais, como a possibilidade já existente de manipular a refração negativa de forma a controlar os desvios sofridos pela luz. Com uma combinação de metamateriais, com índices de refração positivos e negativos, pode-se criar um sistema de camuflagem, podendo fazer com que um determinado objeto fique invisível aos olhos de um observador, seria uma espécie de “manto da invisibilidade”. Nesse sistema de camuflagem a luz contornaria um determinado objeto ao invés de refletir, e com isso a luz não sofreria reflexão deste objeto ficando assim invisível ou transparente.



**Figura 9.2:** *Modelo do comportamento da luz no fenômeno de refração negativa*

*Fonte: Santos, W. (2011)*

Na figura acima, os metamateriais da esfera atuam de diversas formas, fazendo com que as ondas eletromagnéticas contornem a esfera, ao invés de refletir ou refratar. Logo, para um observador a esfera se torna invisível, pois não há o fenômeno da reflexão das ondas eletromagnéticas sobre a esfera chegando a seus olhos para que este possa vê-la. A imagem abaixo nos dá uma ideia da aplicabilidade através do fenômeno de refração negativa.



**Figura 9.3:** *Manto da invisibilidade – Uma das possíveis aplicações do fenômeno de refração negativa.*

*Fonte: <http://www2.joinville.udesc.br/~i9/2014/07/02/o-que-e-um-metamaterial/>*

### 9.3 Sequência didática

**Tema:** Refração – convencional e negativa.

**Público alvo:** 2ª série do ensino médio.

**Pré-requisitos:** conhecimentos sobre os fenômenos ondulatórios, luminosos e espelho plano.

**Material:** giz, lousa.

**Objetivos:** compreensão dos fenômenos luminosos, bem como o comportamento da luz quando propagada entre meios com estruturas atômicas diferentes.

**Nº de aulas:** Oito aulas

#### ***Primeira aula – refração convencional***

O professor inicia a aula com algumas questões a serem respondidas:

- Por que o sol, ao se aproximar do horizonte, sofre uma leve deformação em sua circunferência (aparência oval)?
- Por que quando o sol se põe por completo no horizonte não escurece de imediato, ou antes do nascer do Sol já podemos observar a claridade?
- Por que a Lua fica vermelha quando ocorre um eclipse lunar?
- Como se dá a formação de arco-íris?
- É possível um objeto ficar invisível ao ser imerso em um líquido?

## ***Teoria***

A luz, ao passar por dois meios, sendo cada um com uma estrutura atômica diferente, sofre mudança na sua velocidade e conseqüentemente na sua direção, gerando assim alguns fenômenos observados na natureza: arco-íris, crepúsculo, deformação do Sol no horizonte, entre outros.

A mudança na velocidade pode ser tanto aumentada quanto diminuída, a depender dos dois meios sobre os quais ela incide. Como consequência, observamos uma imagem diferente da que corresponde o objeto observado, esse fenômeno é chamado de **refração**<sup>1</sup>.

A velocidade da luz, por sua vez, poderá ser aumentada – desde que não esteja se propagando no vácuo – ou diminuída de acordo com a densidade dos meios de propagação. No caso de a luz incidir do meio menos denso para o meio mais denso, sua velocidade será reduzida, porém se a incidência da luz se der do meio mais denso para o menos denso, sua velocidade será aumentada.

## ***Respondendo às perguntas***

A luz provinda do Sol, quando atinge nossa atmosfera está incidindo do vácuo para a nossa atmosfera, ou seja, de um meio menos denso para um meio mais denso, provocando uma redução em sua velocidade. Essa redução também provoca mudança na direção da luz, gerando, assim, uma imagem deformada do Sol quando observado próximo do horizonte (aparência oval).

Com esse mesmo raciocínio, também podemos entender o porquê do dia não escurecer de imediato, quando o Sol se põe, ou o porquê do dia já clarear, antes do nascer do Sol; mesmo quando o Sol está abaixo da linha do horizonte, os raios ainda incidem na atmosfera sofrendo desvios para dentro da atmosfera, promovendo uma claridade no céu.

---

<sup>1</sup> Neste momento o professor pode citar alguns fenômenos facilmente observados no cotidiano do aluno: um canudo mergulhado parcialmente num copo com água; o fundo de uma piscina observado de fora; entre outros.

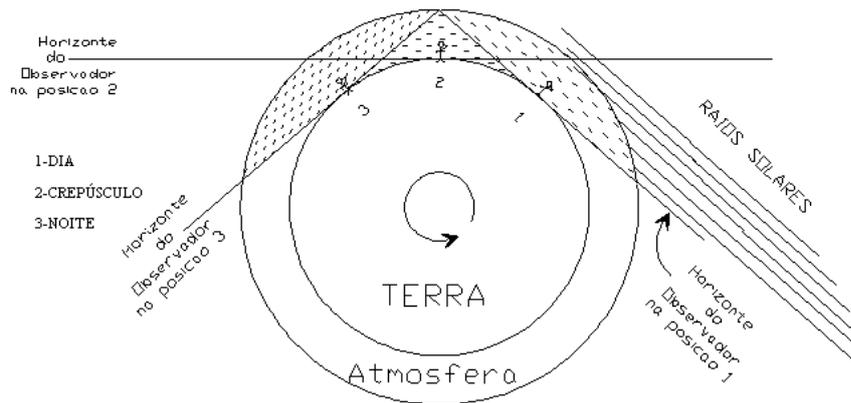


Figura 9.4: Crepúsculo do Sol na posição 2

Fonte: <http://www.cdcc.usp.br/cda/aprendendo-basico/esfera-celeste/esfera-celeste.htm>

Também é importante destacar que, devido à refração da luz na atmosfera, quando observamos o Sol se pondo no horizonte, sua posição real é bem abaixo do que estamos enxergando, ou seja, o Sol já não está mais naquela posição – lembrando que a luz do Sol leva oito minutos para chegar na Terra, logo a imagem que vemos do sol é sempre oito minutos atrasada.

Para o caso da Lua, que fica avermelhada no eclipse lunar, também é devido à refração, pois a velocidade da luz, incidindo na Lua, passa do vácuo para a nossa atmosfera, seguindo de volta para o vácuo. Nessa transição – vácuo-atmosfera-vácuo – os raios solares sofrem uma redução na sua velocidade e com isso, as cores de alta frequência sofrem um espalhamento, prevalecendo apenas as cores de baixa frequência – no caso o vermelho. Esses raios de baixa frequência incidem sobre Lua sendo refletidos de volta, em direção a Terra, gerando a cor avermelhada da Lua<sup>2</sup>.

Assim como observado no eclipse lunar, o mesmo acontece na formação do arco-íris, pois como sabemos, o arco-íris só é formado em situações em que a luz solar atravessa gotículas de água na atmosfera, que por serem mais densas, que a atmosfera, geram uma redução na velocidade da luz, provocando uma dispersão das cores. Logo, as cores que antes não eram distinguíveis pelo olho humano – devido a sua velocidade –, acabam por se “separarem”, diferenciando-se umas das outras.

Para responder a última pergunta, o professor realizará um experimento demonstrativo, onde um pequeno tubo de vidro é mergulhado totalmente na água,

<sup>2</sup> O professor, nesse momento, pode discutir com o aluno a respeito da cor branca, proveniente da união de todas as cores, emitidas nos raios solares e por essa razão quando olhamos para o Sol, em posições bem acima do horizonte, enxergamos a cor branca.

logo depois o mesmo tubo é mergulhado totalmente em um líquido transparente (glicerina), porém não revelado aos alunos. Na primeira situação do experimento, os alunos conseguem ver o tubo imerso na água, já na segunda situação eles não conseguem ver o tubo, o que os deixa intrigados.

Após a demonstração, revela-se qual é o líquido – glicerina – explicando o porquê o tubo fica invisível ao ser imerso na glicerina, uma vez que sabemos que a glicerina tem um índice de refração muito próximo ao do vidro e, por isso, a luz não sofre um desvio perceptível ao olho humano. A partir dessa discussão pode se dar mais ênfase ao conceito de refração, bem como o comportamento da luz em diferentes materiais, e, com auxílio de uma tabela de índices de refração, o professor pode discutir o índice de refração de alguns materiais e quais os efeitos de quando a luz incide sobre eles.

<b>Substância</b>	<b>Índice de refração</b>
Ar (0 °C)	1,000293
Água	1,333
Vidro	1,418
Cloreto de Sódio	1,544
Diamante	2,417
Glicerina	1,470

Tabela 9.1 – Índice de refração de algumas substâncias

Fonte – Keller, *et al.*, 2009 p. 414

Em seguida o professor dará sequência na aula apresentando a fórmula do índice de refração mostrado na equação 9.1:

$$n = \frac{c}{v} \quad (9.1)$$

Onde “c” é a velocidade da luz no ar, “v” é a velocidade da luz no meio refringente e “n” é o índice de refração da luz no meio refringente. Em seguida, o professor pode fazer na lousa um esboço da trajetória da luz ao ser refratada, conforme exemplo sugerido nas figuras 2 e 3:

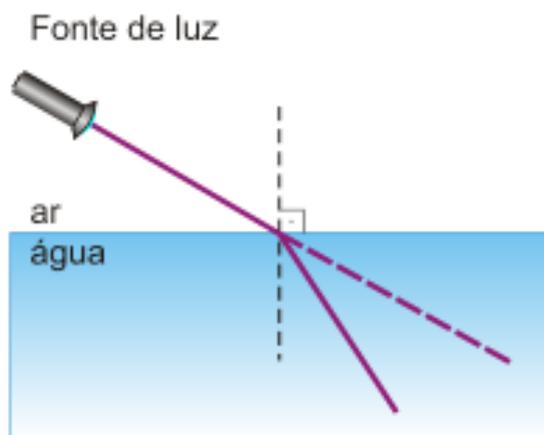


Figura 9.5 – Fenômeno de refração (2).

Fonte: [http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2013/10/preparando-se-para-o-enem\\_19.html](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2013/10/preparando-se-para-o-enem_19.html)

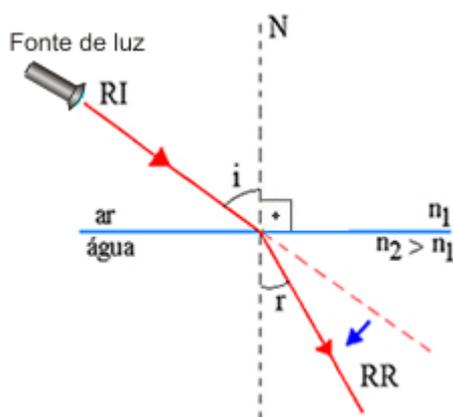


Figura 9.6 – Modelo do comportamento da luz no fenômeno de refração

Adaptado de: <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/leis-refracao.html>

Com base na figura 10.3, e sendo “**RI**” o raio incidente, “**RR**” o raio refratado, “***i***” o ângulo de incidência entre o raio incidente e a reta normal, “***r***” o ângulo de refração entre o raio refratado e a reta normal, “***n*<sub>1</sub>**” o índice de refração no meio 1 e “***n*<sub>2</sub>**” o índice de refração no meio 2, o professor pode discutir a relação trigonométrica existente, e então apresentar a Lei de Snell-Descartes, conforme mostrado na equação 10.2<sup>3</sup>:

$$n_1 \times \text{sen}(\theta_1) = n_2 \times \text{sen}(\theta_2) \quad (9.2)$$

<sup>3</sup> Neste momento o professor pode desenvolver um exercício como exemplo e também discutir a respeito dos peixes, cuja a profundidade observada de fora da água é sempre menor que a sua profundidade real.

## Segunda e terceira aula

Nessas duas aulas seriam trabalhados exercícios de fixação. O objetivo é aplicar uma quantidade de exercícios que permita aos alunos desenvolverem o cálculo em aula, para que assim possam tirar suas dúvidas com o professor<sup>4</sup>.

## Quarta aula

Na quarta, se o professor achar necessário, poderá fazer revisão sobre o que já foi discutido sobre refração, tanto os fenômenos, como os conceitos e as fórmulas. Após a revisão seria aplicado dois exercícios de fixação<sup>5</sup>.

## Quinta aula – refração negativa

Com base no que foi discutido sobre refração convencional, o professor daria início às aulas sobre a refração negativa, cujo princípio do conceito não diverge da refração convencional, apenas apresenta um comportamento na trajetória da luz que, ao incidir sobre um meio com índice de refração negativo, faz com que o raio seja refratado para o mesmo lado no qual foi incidido. O comportamento da luz na refração negativa é mostrado na figura 3:

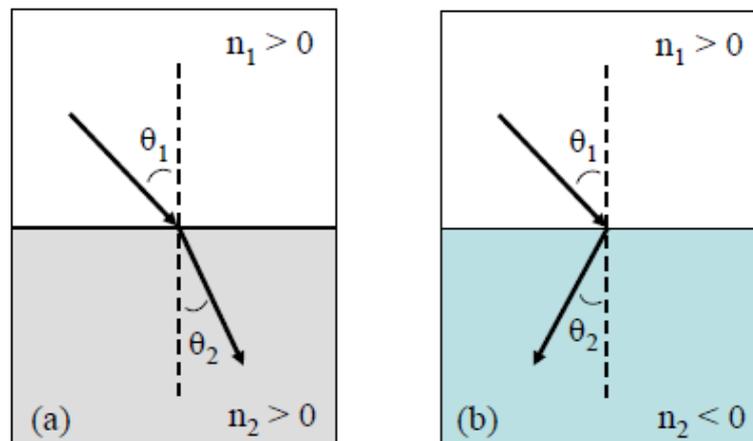


Figura 9.7 – (a) Refração convencional (2). (b) Refração negativa (2)

Fonte: Santos, W. (2011)

Após a explicação, o professor colocaria um exercício como exemplo, resolvendo-o junto com seus alunos, e, na sequência, seriam aplicados alguns exercícios de fixação para que os alunos tentassem resolver<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> Sugestão de exercícios de fixação estão contidos no anexo F.

<sup>5</sup> Exercícios sugeridos para revisão podem ser lidos no anexo G.

<sup>6</sup> Exercícios de fixação, bem como o exemplo sugerido estão contidos nos anexos H e I.

### ***Sexta aula***

Nesta aula seria discutida com os alunos uma possível aplicação para refração negativa, referindo-se à possibilidade de deixar um objeto invisível, uma vez que, através da refração negativa, é possível controlar o desvio sofrido pela luz em um determinado material, gerando um contorno da luz sobre o material, e assim tornando o material invisível ao olho humano.

Após a discussão seria proposto uma atividade – em grupo ou individual – na qual seria colocada a seguinte pergunta: O que você faria se tivesse um manto da invisibilidade? A atividade daria ao aluno total liberdade de pensamento e criatividade para responder a questão.

### ***Sétima aula***

Nesta aula seria proposta uma atividade com dinâmica semelhante a da aula anterior, onde os alunos teriam que responder à seguinte pergunta: De que forma o manto da invisibilidade poderia ser benéfico para a sociedade? Para essa atividade é sugerido que os alunos formem grupos para possam discutir a respeito da pergunta. O professor também pode propor que os alunos mencionem pontos positivos e negativos quanto essa possível aplicação da refração negativa.

### ***Oitava aula***

Nesta aula propomos uma avaliação – em grupo ou individual – para que o professor possa fazer uma análise quanto ao aprendizado dos alunos, bem como a respeito do interesse por temas atuais<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Acessar o anexo J.

## APÊNDICE A – Conceito de refração

Entende-se sobre refração, um fenômeno ligado ao comportamento da luz quando passa de um meio para outro, onde a luz sofre um desvio em sua trajetória, devido a variação de sua velocidade ao passar de um meio para outro. Essa mudança de velocidade é explicada em razão das diferenças entre as estruturas atômicas de cada meio, oferecendo maior ou menor resistência na passagem da luz, podendo então, provocar na luz uma redução ou um aumento sua velocidade.

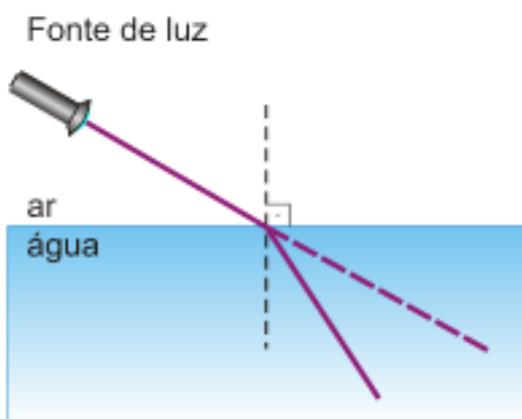


Figura A.1 – Fenômeno de refração.

Fonte: [http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2013/10/preparando-se-para-o-enem\\_19.html](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2013/10/preparando-se-para-o-enem_19.html)

A velocidade da luz no meio dependerá da densidade do material, ou seja, quanto mais denso for o material, menor será a velocidade de propagação da luz em seu interior, da mesma forma quanto menor for a densidade do material, maior será a velocidade de propagação da luz no seu interior. Logo, dizemos que cada material possui um índice de refração sobre a luz, que é determinado pela seguinte fórmula:

### Equação A.1: Índice de refração

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{A.1})$$

Onde **n** refere-se ao índice de refração da luz sobre um material, devido a sua estrutura atômica; **c** é a velocidade da luz no vácuo e **v** é a velocidade da luz sobre um determinado meio.

Na tabela abaixo mostramos o valor de alguns índices de refração de algumas substâncias:

Tabela A.1 – Índice de refração de algumas substâncias

<b>Substância</b>	<b>Índice de refração</b>
Ar (0 °C)	1,000293
Água	1,333
Vidro	1,418
Cloreto de Sódio	1,544
Diamante	2,417
Glicerina	1,470

Fonte – Keller, *et al.*, 2009 p. 414

Este fenômeno, que chamaremos de refração convencional, é facilmente observado na natureza, o crepúsculo observado no fim da tarde ou no amanhecer do dia; um arco-íris no céu; um canudo ou uma colher mergulhada num copo com água; o fundo de uma piscina nos dando a impressão de ter uma profundidade menor do que o real; um peixe na água ou objeto mergulhado num recipiente com água, em que a posição real dentro da água difere da posição observada, fora da água. Por fim, essas e muitas outras situações são exemplos de que podemos observar facilmente o fenômeno de refração na natureza.



Figura A.2 – Fenômeno de refração no copo.

Fonte: Santos, W. (2011)



Figura A.3 – Fenômeno de refração na piscina.

Fonte: Santos, W. (2011)

### Cálculo da refração da luz

Todo material, devido a sua estrutura atômica, provoca um desvio na trajetória da luz, quando esta é incidida sobre ele, considerando que cada material possui uma estrutura atômica diferente, a luz terá um desvio diferente sobre cada material que incidir, podendo ser maior ou menor. Esse desvio da luz é medido através do chamado **ângulo de refração**, que se refere ao ângulo entre o raio de luz refratado e uma reta imaginária, perpendicular ao plano, chamada de **reta normal**. Assim como o raio refratado, o raio incidente também forma um ângulo com a reta normal, a diferença entre esses dois ângulos indica qual meio é mais refringente.

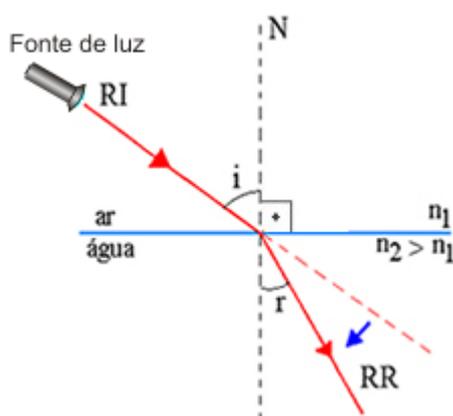


Figura A.4 – Modelo do comportamento da luz no fenômeno de refração

Adaptado de: <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/leis-refracao.html>

A figura acima mostra o comportamento da luz ao incidir do ar para a

água, observa-se que o ângulo de incidência  $i$ , formado pelo raio incidente **RI** e a reta normal – perpendicular ao plano – é maior que o ângulo de refração  $r$ , formado pelo raio refratado **RR** e a reta normal. Logo, o índice de refração da água  $n_2$  é maior que o índice de refração do ar  $n_1$ . Uma linha tracejada, dando continuidade ao raio incidente, mostra a trajetória da luz se não sofresse desvio.

Na figura também pode ser observado que o raio incidente, a reta normal e o raio refratado estão contidos no mesmo plano, uma situação que sempre será observada no fenômeno de refração, nunca de forma diferente, definindo assim a Primeira Lei da Refração.

Através da geometria podemos calcular o índice de refração da luz, bem como o ângulo de refração aplicando a seguinte fórmula definida como Lei de Snell-Descartes:

#### **Equação A.2: Lei de Snell-Descartes**

$$n_1 \times \text{sen}(\theta_1) = n_2 \times \text{sen}(\theta_2) \quad (\text{A.2})$$

Onde  $\text{sen}(\theta_1)$  corresponde ao seno do ângulo de incidência e  $\text{sen}(\theta_2)$  corresponde ao seno do ângulo de refração. A lei de Snell-Descartes é uma lei que estabelece uma constante relação entre o produto do seno do ângulo – que se forma entre o raio e a normal – e o índice de refração do meio correspondente, definindo assim a Segunda Lei da Refração da Luz.

#### **Refração Negativa da Luz**

Santos, W. (2011), no seu trabalho de mestrado profissional, apresenta uma pesquisa iniciada a 10 anos, sobre refração negativa, cuja a ideia original surgira em 1968. Segundo o autor desde 2010 começou a surgir questões nos vestibulares (ENEM e UNICAMP), atraindo assim a curiosidade dos estudantes de óptica sobre essa novidade – refração negativa. Sua motivação sobre esse fenômeno se deu em uma aula quando comentou sobre a possibilidade de criar um material com índice de refração negativa, gerando assim, diversos questionamentos por parte dos alunos, uma vez que os próprios professores afirmam não existir um material com índice de refração negativo (a exceção da possibilidade, já existente de criar esse material em laboratório, algo que muitos professores ainda desconhecem).

A refração negativa é um fenômeno que, ao contrário da refração convencional, não é observado na natureza, é criado em laboratório, sua criação se

dá através dos chamados metamateriais, materiais compostos por estruturas artificiais, formadas pelo arranjo regular de minúsculos circuitos elétricos, que podem ser projetados para terem uma propriedade eletromagnética desejada, desempenhando assim, o papel das “moléculas” do material de refração negativa.

Na refração convencional, a luz sofre um desvio em sua trajetória devido a mudança em sua velocidade, porém seu trajeto continua seguindo no mesmo sentido, atravessando o lado oposto da reta normal. Já na refração negativa, a luz sofre não apenas um desvio, mas também uma mudança no sentido sua trajetória, dessa forma, a luz é desviada para o mesmo lado do qual estava incidindo.

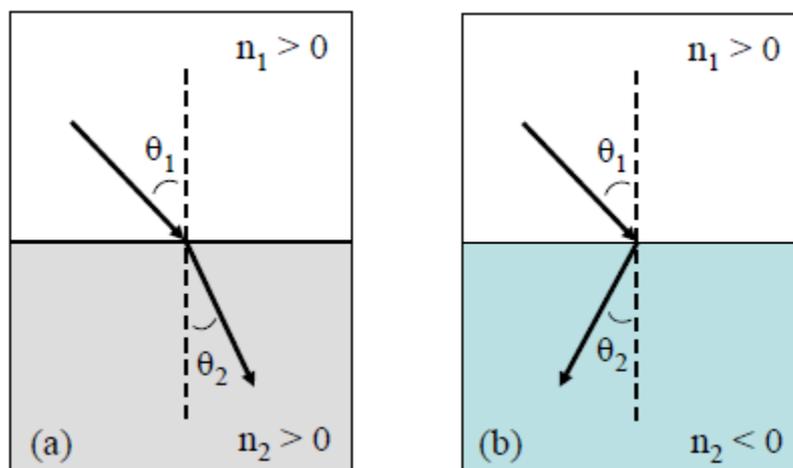


Figura A.5 – (a) Refração convencional. (b) Refração negativa

Fonte: Santos, W. (2011)

Conforme observado na figura (b), a luz sofre um desvio como se fosse refletido de volta, porém mesmo para este comportamento da luz a lei de Snell – que explica o índice de refração dos meios – também é válida para este comportamento, com a diferença de que o índice de refração, bem como o ângulo refratado terão valores negativos. Veja na figura abaixo uma imagem fictícia de uma caneta mergulhada em um copo, cujo o líquido dentro do copo proporcionaria o fenômeno de refração negativa (à direita) frente ao fenômeno de refração convencional (à esquerda).



Figura A.6 – Analogia do fenômeno de refração negativa

Fonte: <http://noticias.uol.com.br/ciencia/album/2013/04/26/objetos-e-materiais-enganam-a-luz-e-ficam-invisiveis.htm#fotoNav=6>

No trabalho de Santos, W. (2011) destaca-se o início desse grande avanço, em 1967, com o físico russo Victor Veselago, sugerindo um material com índice de refração negativo que segundo as leis da física não era impossível de criar. Porém o autor ressalta que somente três décadas depois, em meados da década de 90, o físico britânico John B. Pendry, concluiu, com a colaboração de outros cientistas da empresa britânica Marconi Materials Technology, que seria possível criar, a partir de uma estrutura metálica, um material com índice de refração negativo. A construção do material proposto por Pendry, segundo Santos, W. (2011), se deu somente no ano 2000, com o físico estadunidense, nascido no Japão, David R. Smith, junto com colegas da Universidade da Califórnia.

Por fim, Santos, W. (2011) também destaca alguns avanços, com a criação da refração negativa através dos metamateriais, como a possibilidade já existente de manipular a refração negativa, de forma a controlar os desvios sofridos pela luz. Com uma combinação de metamateriais, com índices de refração positivos e negativos, pode-se criar um sistema de camuflagem, podendo fazer com que um determinado objeto fique invisível aos olhos de um observador, seria uma espécie de “manto da invisibilidade”. Nesse sistema de camuflagem a luz contornaria um determinado objeto ao invés de refletir, e com isso a luz não sofreria reflexão deste objeto ficando assim invisível ou transparente.

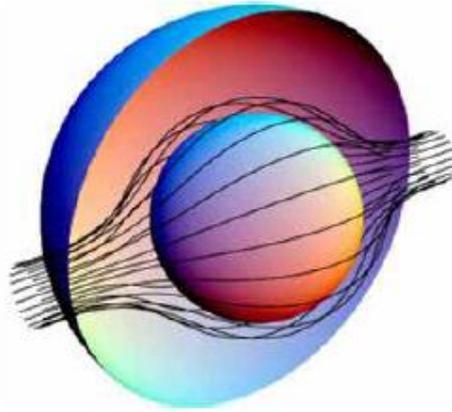


Figura A.7 – Modelo do comportamento da luz no fenômeno de refração negativa

Fonte: Santos, W. (2011)

Na figura acima, os metamateriais da esfera atuam de diversas formas, fazendo com que as ondas eletromagnéticas contornem a esfera, ao invés de refletir ou refratar. Logo, para um observador a esfera se torna invisível, pois não há o fenômeno da reflexão das ondas eletromagnéticas sobre a esfera chegando em seus olhos para que este possa vê-la. A imagem abaixo nos dá uma ideia da aplicabilidade através do fenômeno de refração negativa.



Figura A.8 – Manto da invisibilidade – Uma das possíveis aplicações do fenômeno de refração negativa.

Fonte: <http://www2.joinville.udesc.br/~i9/2014/07/02/o-que-e-um-metamaterial/>



Figura A.9 – Manto da invisibilidade – Uma das possíveis aplicações do fenômeno de refração negativa.

Fonte: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6398-conceito-de-metamateriais/>

## APÊNDICE F – Exercícios sobre reflexão da luz

### 2ª Lei da Reflexão

- 1) Um estudante, querendo obter a altura de um prédio fez o seguinte experimento:

Com uma pequena tigela d'água, colocou-a no chão de forma que a ponta do prédio fosse refletida na tigela. O estudante, a 0,30 m da tigela, conseguia observar o reflexo da ponta do prédio com a cabeça perfeitamente reta. Sabendo que os olhos do estudante estão a 1,70 m do chão e que a distância entre a tigela e o prédio é de 7,5 m, determine a altura do prédio encontrada pelo estudante.

- 2) Com base no exercício anterior, determine a distância entre o estudante e a tigela caso a altura de seus olhos fossem 1,60 m.

- 3) Ainda sobre o exercício anterior, caso o estudante quisesse aproximar a tigela do prédio, reduzindo a distância para 3,5 m. Sendo a altura de seus olhos 1,70 m, qual seria a nova distância entre ele e a tigela?<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> O exercício 3 não seria possível de se realizar na prática, pois o estudante não conseguiria enxergar o reflexo da ponta do prédio na tigela com a cabeça perfeitamente reta.

## APÊNDICE G – Atividade de Campo

### Calculando a altura da telha da escola

Grupos:

De três a quatro alunos.

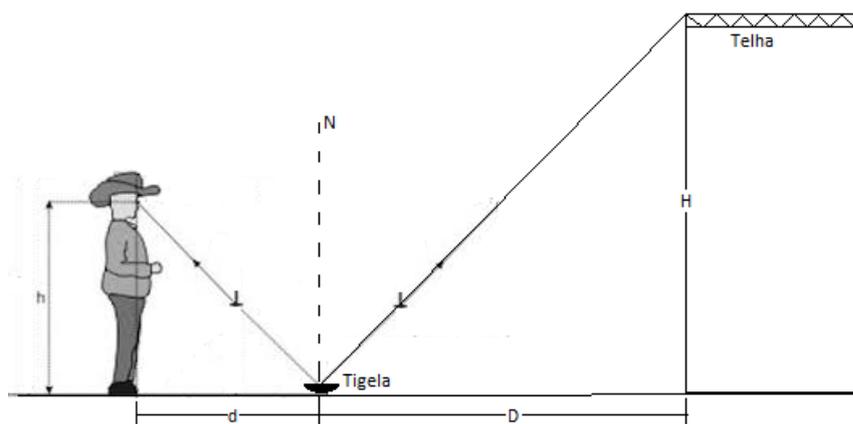
Material:

1 trena

1 tigela de sobremesa

Procedimento

- Encher a tigela com água até a sua borda.
- Posicionar a tigela de forma que um integrante do grupo possa ver o reflexo da ponta da telha sem ter que mexer a cabeça (estar com a cabeça perfeitamente reta).
- Com a trena, medir a altura do olho deste do estudante até o chão.
- A partir de um ponto no chão – alinhado com os olhos do estudante – medir a distância entre a tigela e este ponto (distância horizontal).
- Medir a distância horizontal entre a tigela e a telha.



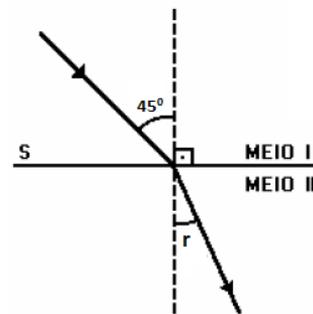
- Com base na segunda lei da reflexão e na relação trigonométrica da semelhança de triângulo, determinar a altura H da telha.

## APÊNDICE H – Exercícios sobre refração da luz

### Refração convencional

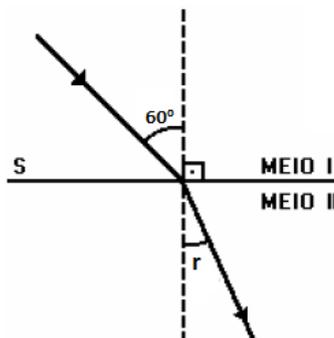
- 1) Calcule a velocidade da luz amarela propagando-se na água, cujo índice de refração vale 1,33. (Dado: Velocidade da luz =  $3 \times 10^8$  m/s).
- 2) A figura mostra dois meios, 1 e 2 com índices iguais a 1 e  $\sqrt{2}$ , respectivamente, calcule a medida do ângulo de refração.

Dado:  $\sin 45 = \frac{\sqrt{2}}{2}$



- 3) Adotando a velocidade da luz no vácuo, igual a  $3 \times 10^8$  m/s, calcule o índice de refração para dois meios em que a luz se propaga com velocidade:
  - a)  $1,15 \times 10^8$  m/s
  - b)  $2,0 \times 10^8$  m/s
- 4) Um raio de luz passa do meio 1 para o meio 2 conforme indica a figura. Sabendo que o meio 1 é o ar ( $n_1 = 1$ ) e o  $n_2 = \sqrt{3}$ , determine:
  - a) A medida do ângulo de refração.
  - b) A velocidade da luz no meio 2.
  - c) O desvio, em graus, sofrido pela luz incidente ao passar para o meio 2.

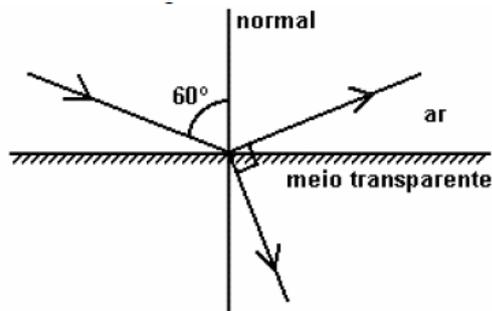
Dado:  $\sin 60 = \frac{\sqrt{3}}{2}$



## APÊNDICE I – Exercícios de revisão sobre refração da luz

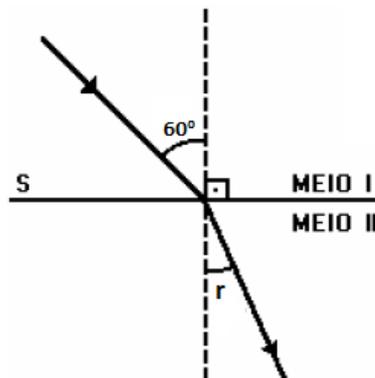
### Revisão

- 1) Um raio luminoso se propaga no ar ( $n = 1$ ) e incide sobre um meio transparente com ângulo de incidência de  $60^\circ$  conforme a figura. Determine o índice de refração no vidro.



- 2) Um raio de luz, proveniente do ar, possui velocidade de  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , quando incide sobre uma superfície plana de vidro formando um ângulo de  $60^\circ$  com a reta normal. Sendo a velocidade da luz, no vidro, igual a  $1,73 \times 10^8 \text{ m/s}$ , determine o ângulo de refração, formado pela luz incidente.

Dado:  $\sin 60 = 0,87$



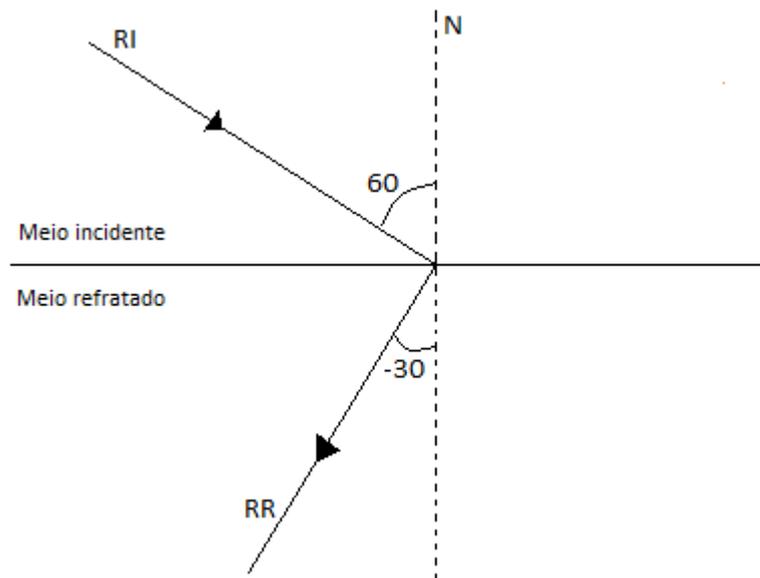
## APÊNDICE J – Exemplo da refração negativa

### Refração negativa

Assim como na refração convencional a Lei de Snell-Descartes é válida, aplicando as mesmas fórmulas:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{v_2}{v_1}$$

Exemplo:



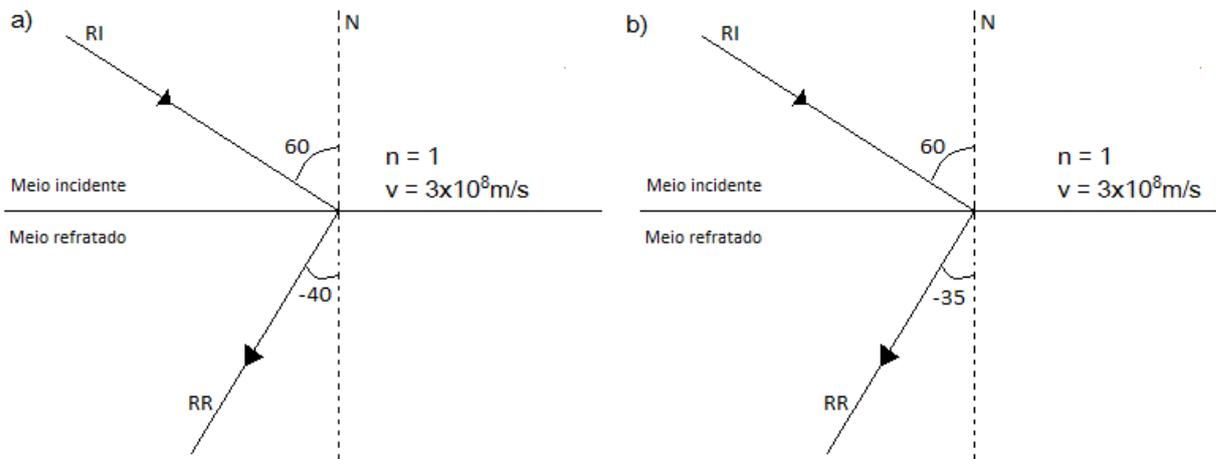
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin r}{\sin i} \rightarrow \frac{1}{n_2} = \frac{\sin -30}{\sin 60} \rightarrow \frac{1}{n_2} = \frac{-0,5}{0,87} \rightarrow -0,57 = n_2$$

## APÊNDICE K – Exercícios sobre refração negativa

### Refração negativa

1) Para as representações abaixo determine:

- Índice de refração do meio
- Velocidade de propagação do meio



2) Dado o índice de refração abaixo determine:

- O ângulo  $r$ .
- A velocidade de propagação do meio incidente.

