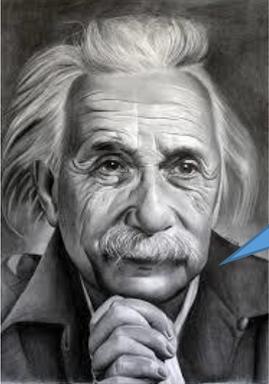


A luz é a entidade mais rápida que conhecemos.

Q. 1 – VELOCIDADE DA LUZ NO VÁCUO

A velocidade da luz é uma grandeza absoluta, isto é, o seu valor é o mesmo independente do referencial (quando medida no vácuo). Assim, a humanidade descobriu que seu valor é constante, portanto usaremos a letra  $c$  para representá-la.



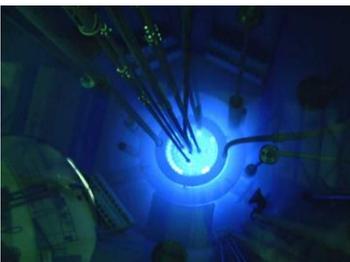
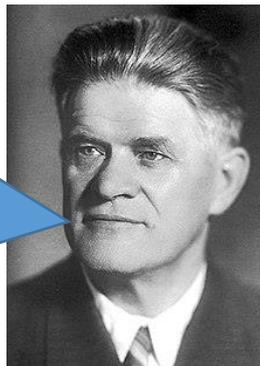
Ta, mas e em outros meios a luz possui a mesma velocidade?

Em um meio material transparente, como a água, por exemplo, dizemos que a luz possui uma velocidade  $v$  e, portanto, que a água possui um índice de refração  $n$ . Veja a seguir como estas grandezas se relacionam.

Q. 2 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Eq. (01)

Você sabia que se um elétron superar a velocidade da luz em um meio o elétron emite uma radiação que leva o meu nome? Chama-se radiação de Cherenkov.



Esta é a luz que vemos em reatores nucleares como em Angra.

Figura 1: A radiação de Cherenkov pode ser observada em reatores nucleares (fonte: <http://cienciaxreligiao.blogspot.com.br/2013/03/o-universo-dos-taquions-parte-3.html>).

MC – REFRAÇÃO – PRIMEIRO ANO – 17/04/2023

Tabela 1: alguns valores de índice de refração, para materiais comuns.

Meio material	Índice de refração (n)
ar	1,00
água	1,33
vidro	1,50
glicerina	1,90
álcool etílico	1,36
diamante	2,42
acrílico	1,49

Q. 3 – RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE REFRAÇÃO E FREQUÊNCIA DA LUZ

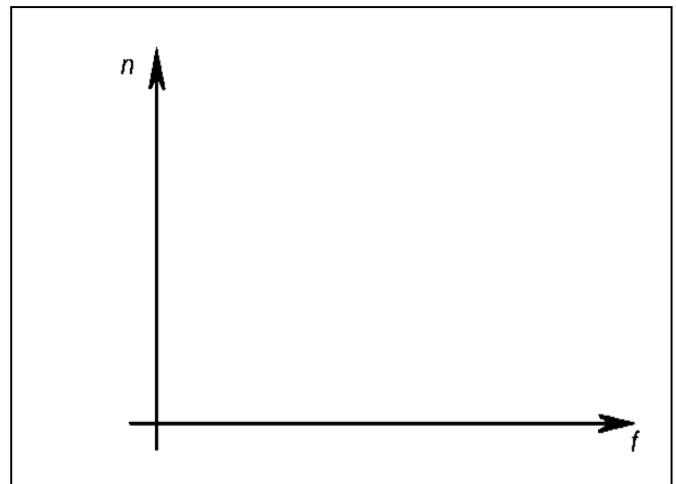


Tabela 2: Alguns valores do índice de refração do vidro crown para diversas cores (frequências) da luz

Índice de refração do vidro crown	
Cor	Índice
Violeta	1,532
Azul	1,528
Verde	1,519
Amarelo	1,517
Alaranjado	1,514
Vermelho	1,513

- Observe que apesar de ter certa dependência, esta não é tão perceptível, porém isso que explica a dispersão da luz, como visto em aulas passadas.
- Dizemos que um meio B é mais refringente que um meio A quando  $n_B > n_A$

• ÍNDICE DE REFRAÇÃO RELATIVO

- Podemos definir um índice de refração de um meio A em relação ao meio B como

$$n_{AB} = \frac{n_A}{n_B} \quad \text{Eq. (02)}$$

PROFESSOR DANILO

Dispersão da luz:

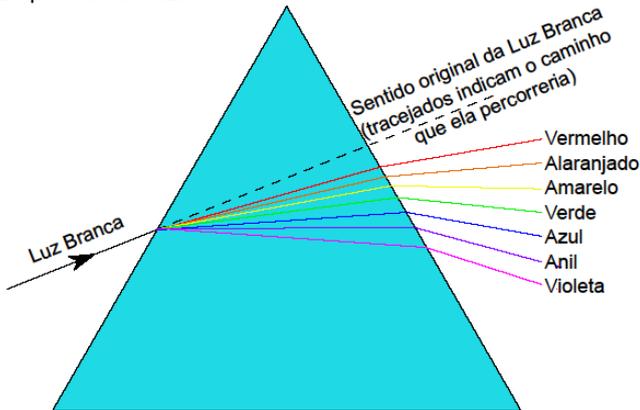


Figura 2: Dispersão da luz quando atravessa um prisma.

**PRINCÍPIO DE FERMAT**

- Lembre-se que a luz procura não o menor caminho, mas o que leva o menor tempo
- Chamamos de dioptra à interface entre dois meios (A e B) homogêneos. Um exemplo disso é o sistema ar-água como a seguir

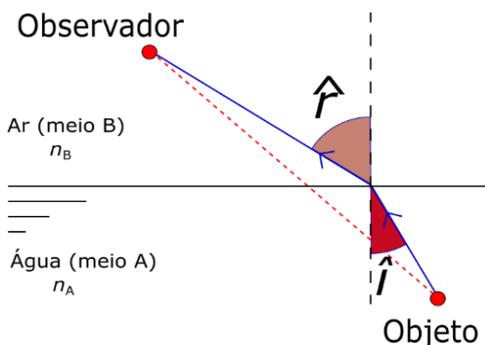


Figura 3: Caminho que a luz percorre ao ir de um meio mais refringente para um meio menos refringente.

- Não faremos aqui, mas é possível demonstrar uma relação entre os índices de refração dos meios e os ângulos de incidência  $\hat{i}$  e de refração  $\hat{r}$ .
- Com isso podemos concluir que
  - Quando um raio vai de um meio menos refringente para um meio mais refringente o raio se aproxima da normal
  - Quando um raio vai de um meio mais refringente para um meio menos refringentes o raio se afasta da normal

**LEIS DA REFRAÇÃO**

**Primeira Lei da Refração**

O raio refratado, a normal e o raio incidente estão situados no mesmo plano.

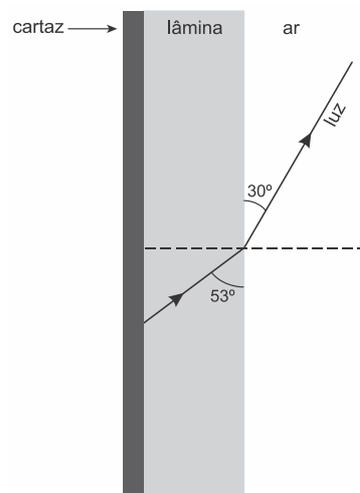
**Segunda Lei da Refração**

Lei de Snell-Descartes:  
 $n_A \cdot \sin \hat{i} = n_B \cdot \sin \hat{r}$  Eq. (03)

MC – REFRAÇÃO – PRIMEIRO ANO – 17/04/2023

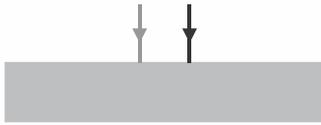
**EXERCÍCIOS**

- (Fmp 2019) A luz do sol, após atravessar a água em um aquário, projeta um arco-íris na parede de uma residência. A decomposição da luz branca do sol, ao atravessar os meios ar – água – ar, ocorre porque cada componente da luz possui, na água, diferentes índices de
  - polarização
  - refração
  - difração
  - interferência
  - coloração
- (Ufr 2019) Um dado meio tem um índice de refração  $n_1$ . Um outro meio tem um índice de refração  $n_2$ . Assinale a alternativa que expressa corretamente a relação entre os módulos das velocidades da luz nos dois meios, quando  $n_2 = 2n_1$ .
  - $v_2 = 4v_1$ .
  - $v_2 = 2v_1$ .
  - $v_2 = v_1$ .
  - $v_2 = \frac{v_1}{2}$ .
  - $v_2 = \frac{v_1}{4}$ .
- (Eear 2019) Considerando as velocidades de propagação da luz em dois meios homogêneos e distintos, respectivamente iguais a  $200.000 \text{ km/s}$  e  $120.000 \text{ km/s}$ , determine o índice de refração relativo do primeiro meio em relação ao segundo. Considere a velocidade da luz no vácuo, igual a  $300.000 \text{ km/s}$ .
  - 0,6
  - 1,0
  - 1,6
  - 1,7
- (Uerj 2019) Em uma estação, um cartaz informativo está protegido por uma lâmina de material transparente. Um feixe de luz monocromático, refletido pelo cartaz, incide sobre a interface de separação entre a lâmina e o ar, formando com a vertical um ângulo de  $53^\circ$ . Ao se refratar, esse feixe forma um ângulo de  $30^\circ$  com a mesma vertical. Observe o esquema ampliado a seguir, que representa a passagem do raio de luz entre a lâmina e o ar. Determine o índice de refração da lâmina.

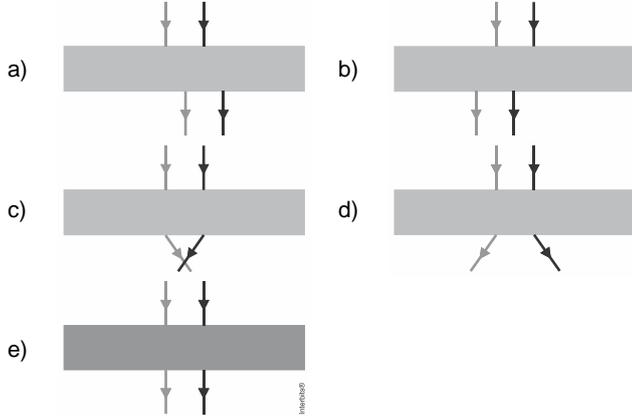


PROFESSOR DANILO

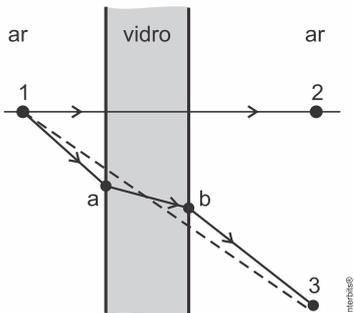
5. (Famerp 2019) Dois raios de luz monocromáticos incidem perpendicularmente em uma das faces de uma lâmina de vidro de faces paralelas, imersa no ar, como mostra a figura.



Assinale a alternativa que representa esses mesmos raios de luz, ao emergirem na face oposta à de incidência.



6. (Ufu 2018) Considere um raio de luz que parte do ponto 1 e vai até o ponto 2, seguindo por um caminho retilíneo, justamente porque é aquele em que tal raio o percorre em menor tempo possível. Na mesma situação, um raio sai do ponto 1 e chega a 3, mas, em vez de fazer o caminho seguindo a linha tracejada, ele atravessa a lâmina de vidro, passando por *a* e *b*.



- Explique por que o raio de luz não segue a linha tracejada, e sim desvia-se, passando por *a* e *b*.
- Sabendo-se que o índice de refração do vidro é 1,5, qual a velocidade com que o raio de luz o atravessa?

**DIOPTRIO PLANO**

A interface entre dois meios com propriedades ópticas diferentes, como água e ar, é chamado de dioptrio. Vamos estudar agora o caso em que essa interface é plana.

Quando o observador em um meio A com índice de refração  $n_A$  olha um objeto dentro de um outro meio com índice de refração  $n_B$  de tal forma que o ângulo de incidência  $\hat{i}$  e de refração  $\hat{r}$  sejam pequenos, podemos encontrar uma equação que relaciona as posições do objeto  $p$  e imagem  $p'$  com os índices de refração. Vejamos como.

Observe primeiramente a figura a seguir onde representamos além das variáveis já mencionadas, uma distância horizontal entre a normal do ponto onde o raio incide na interface e a vertical do objeto.

Aqui é importante mencionar que isso só é certo se o objeto e observador estiverem na mesma vertical, ou seja,  $\hat{i} = \hat{r} = 0$ . Se, no entanto, considerarmos os ângulos  $\hat{i}$  e  $\hat{r}$  muito pequenos podemos assumir que a imagem do objeto e o objeto estão na mesma vertical.

MC – REFRAÇÃO – PRIMEIRO ANO – 17/04/2023

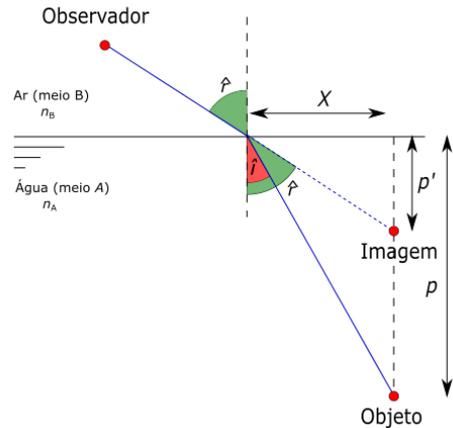


Figura 4: Um raio de luz que sai de um objeto submerso na água e atinge o olho do observador

Para aproximação para pequenos ângulos temos que

$$\begin{cases} \text{sen } \hat{i} \approx \tan \hat{i} \approx \hat{i} \\ \text{sen } \hat{r} \approx \tan \hat{r} \approx \hat{r} \end{cases}$$

desde que estejamos trabalhando com unidades de medidas de ângulos em radianos.

Com estas informações podemos substituir os senos que aparecem na lei de Snell por tangentes, isto é:

$$n_A \cdot \text{sen } \hat{i} = n_B \cdot \text{sen } \hat{r} \Rightarrow n_A \cdot \tan \hat{i} \approx n_B \cdot \tan \hat{r}$$

Mas pela figura anterior podemos encontrar as tangentes:

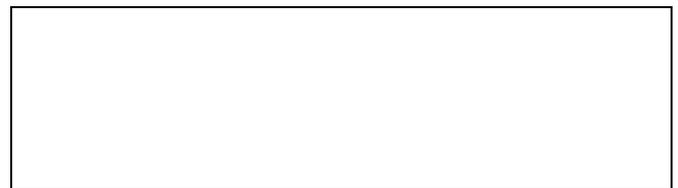
$$\begin{cases} \tan \hat{i} = \frac{X}{p} \\ \tan \hat{r} = \frac{X}{p'} \end{cases}$$

Substituindo as equações do sistema acima na equação da lei de Snell anterior ao sistema temos a relação do dioptrio plano:

$$n_A \cdot \frac{X}{p} \approx n_B \cdot \frac{X}{p'} \Rightarrow \boxed{\frac{n_A}{n_B} \approx \frac{p}{p'}}$$

Esta é a equação do dioptrio plano e você deve ter cuidado ao usá-la, pois ela é válida apenas quando objeto e observador estiverem numa mesma vertical.

**Q. 4 –DIOPTRO PLANO**



**REFLEXÃO TOTAL**

Imagine um raio de luz indo do meio mais para o meio menos refringente.

Aumentando-se o ângulo de incidência aumenta-se o ângulo de refração.

Existe um ângulo chamado de ângulo limite  $\hat{L}$  tal que se o raio incidente refratar e sai formando um ângulo  $\hat{r} = 90^\circ$ . Assim, se  $\hat{i} = \hat{L}$  temos:

$$n_A \cdot \text{sen } \hat{i} = n_B \cdot \text{sen } \hat{r} \Rightarrow n_A \cdot \text{sen } \hat{L} = n_B \cdot \text{sen } 90^\circ \Rightarrow$$

$$\boxed{\text{sen } \hat{L} = \frac{n_B}{n_A}}$$

Observe a figura a seguir, isso deve lhe ajudar:

PROFESSOR DANILO

MC – REFRAÇÃO – PRIMEIRO ANO – 17/04/2023

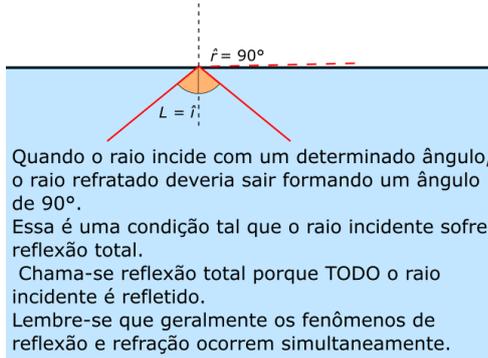
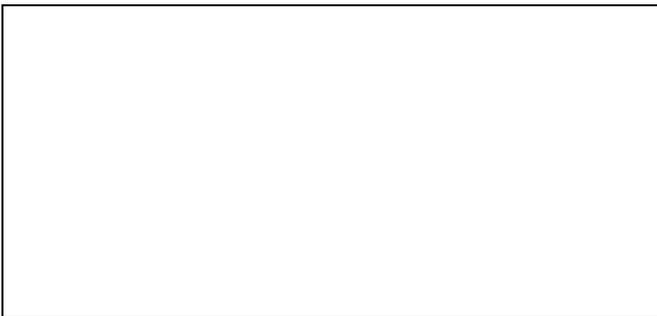


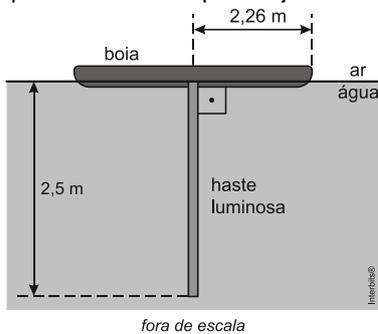
Figura 2: Um raio de luz atinge uma interface plana e sofre reflexão total

Q. 5 – ÂNGULO LIMITE



EXERCÍCIOS

7. (Unesp 2013) Uma haste luminosa de 2,5 m de comprimento está presa verticalmente a uma boia opaca circular de 2,26 m de raio, que flutua nas águas paradas e transparentes de uma piscina, como mostra a figura. Devido à presença da boia e ao fenômeno da reflexão total da luz, apenas uma parte da haste pode ser vista por observadores que estejam fora da água.



Considere que o índice de refração do ar seja 1,0, o da água da piscina  $\frac{4}{3}$ ,  $\sin 48,6^\circ = 0,75$  e  $\tan 48,6^\circ = 1,13$ . Um observador que esteja fora da água poderá ver, no máximo, uma porcentagem do comprimento da haste igual a

a) 70%.    b) 60%.    c) 50%.    d) 20%.    e) 40%.

LÂMINAS DE FACES PARALELAS

Uma lâmina de material transparente, tais como vidros planos de carros, janelas etc. constituem lâminas de faces paralelas. Representamos da seguinte maneira um raio de luz atravessando uma lâmina de faces paralelas

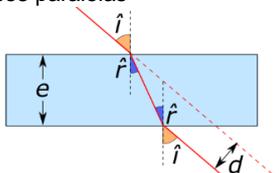


Figura 5: Desvio lateral de um raio ao passar por uma lâmina de faces paralelas de espessura e

Observe que um raio incidente na lâmina sofre um **desvio lateral**  $d$ , ou seja, a direção e o sentido de propagação da luz não mudam quando ela atravessa uma lâmina de faces paralelas. Se soubermos a espessura  $e$  da lâmina e o ângulo de incidência, podemos determinar o desvio lateral.

FIBRA ÓTICA

Atualmente estamos utilizando ondas eletromagnéticas com frequências tão altas que chegaram na frequência do visível. Fibras ópticas são como “fios” que são capazes de direcionar a luz. Para isso a luz deve ser “aprisionada” dentro de um meio óptico. Seja uma fibra óptica imersa em um meio (geralmente o ar) cujo índice de refração é  $n_{ar}$ , com centro tendo índice de refração  $n_{in}$  e revestido por material de índice de refração  $n_{rev}$ . Existe um ângulo de incidência máximo ( $i_{m\acute{a}x}$ ) para que a luz seja guiada.

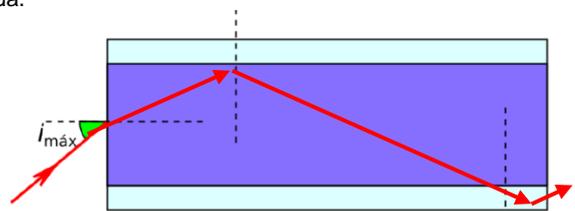


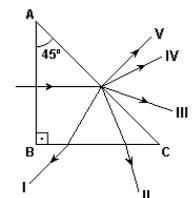
Figura 6: Trajetória de um raio no interior de uma fibra óptica

EXERCÍCIO

8. (Ufjf-pism 2 2019) As fibras ópticas podem ser usadas em telecomunicações, quando uma única fibra, da espessura de um fio de cabelo, transmite informação de vídeo equivalente a muitas imagens simultaneamente. Também são largamente aplicadas em medicina, permitindo transmitir luz para visualizar vários órgãos internos, sem cirurgias. Um feixe de luz pode incidir na extremidade de uma fibra óptica de modo que nenhuma ou muito pouca energia luminosa será perdida através das paredes da fibra. O princípio ou fenômeno que explica o funcionamento das fibras ópticas é denominado:

- a) reflexão interna total da luz.
- b) refração total da luz.
- c) dispersão da luz.
- d) reflexão especular da luz.
- e) independência da velocidade da luz.

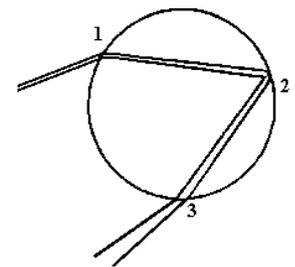
9. (Unesp 2006) Um prisma de vidro imerso em água, com a face AB perpendicular à face BC, e a face AC com uma inclinação de  $45^\circ$  em relação a AB, é utilizado para desviar um feixe de luz monocromático. O feixe penetra perpendicularmente à face AB, incidindo na face AC com ângulo de incidência de  $45^\circ$ . O ângulo limite para a ocorrência de reflexão total na face AC é  $60^\circ$ .



Considerando que o índice de refração do vidro é maior que o da água, a trajetória que melhor representa o raio emergente é

a) I.    b) IV.    c) II.    d) V.    e) III.

10. (Unesp 1996) A figura representa, esquematicamente, a trajetória de um estreito feixe de luz branca atravessando uma gota d'água. É dessa forma que se origina o arco-íris.



- a) Que fenômenos ópticos ocorrem nos pontos 1, 2 e 3?
- b) Em que ponto, ou pontos, a luz branca se decompõe, e por que isso ocorre?

PROFESSOR DANILO

**POSIÇÃO APARENTE DOS ASTROS E MIRAGEM**

**Posição aparente dos astros**

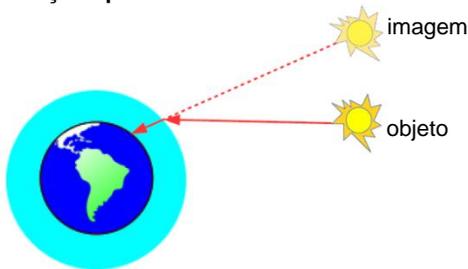
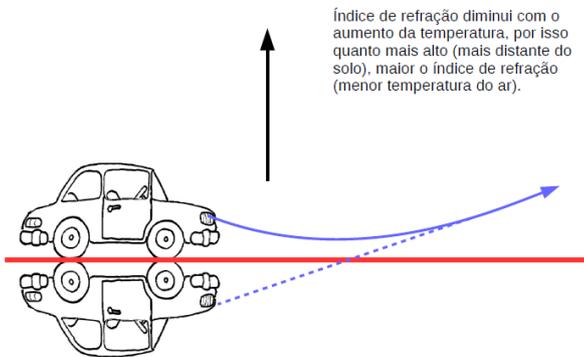


Figura 7: A atmosfera desvia a luz vinda dos astros, por isso eles parecerão mais altos que realmente estão, por isso chamamos este efeito também de elevação aparente dos astros.

Como o índice de refração do ar não é EXATAMENTE igual à 1, a luz proveniente dos astros sofre refração ao entrar na atmosfera, aproximando-se da normal.

**Miragem**

Em dias quentes, temos a impressão de que o asfalto à nossa frente é quase que como um lago



Índice de refração diminui com o aumento da temperatura, por isso quanto mais alto (mais distante do solo), maior o índice de refração (menor temperatura do ar).

Figura 8: A refração, devido à diferença de temperatura, que causa diferença no índice de refração, produz uma imagem que chamamos de miragem.

Como o índice de refração do ar mais quente é menor, a luz é desviada

É importante notar que não ocorre em momento algum a reflexão total tal como vemos anteriormente, já que a direção dos raios muda lentamente

Podemos utilizar então o princípio da reversibilidade da luz para justificar que a luz deve “entortar” para cima, e não sair paralelamente ao solo

Mas, e se o dia for frio, podemos ver miragens? Sim... Vejamos a Fata Morgana

Mas, e se o dia for frio, podemos ver miragens? Sim... Vejamos a Fata Morgana

Índice de refração diminui com o aumento da temperatura, por isso quanto mais alto (mais distante do solo), MENOR o índice de refração (MAIOR a temperatura do ar).

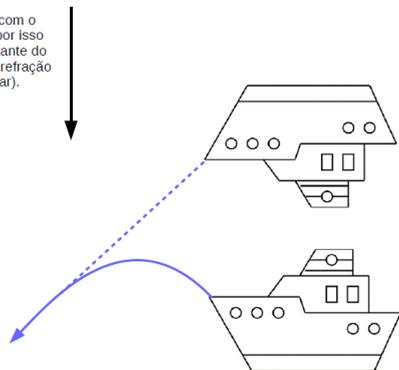


Figura 9: A miragem também pode ocorrer em dias frios. No caso, quando ocorre nos mares, é chamada de fata Morgana (ou fada Morgana).

Vejamos algumas fotos.

MC – REFRAÇÃO – PRIMEIRO ANO – 17/04/2023

**MIRAGEM NO DESERTO (NÃO HÁ ÁGUA A FRENTE):**



Disponível em: <https://thumbs.dreamstime.com/b/miragem-no-deserto-13581435.jpg>



Disponível em: <https://www.fatosdesconhecidos.com.br/wp-content/uploads/2015/02/2113-600x450.jpg>

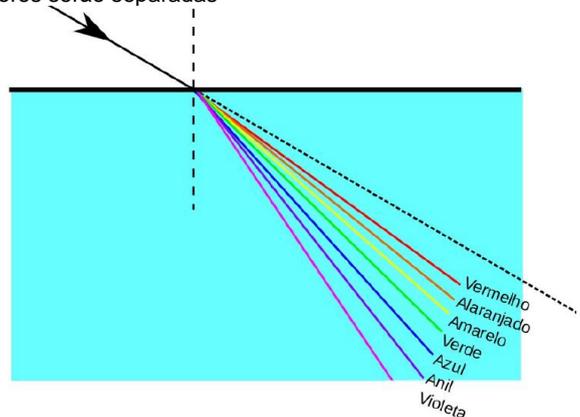
**FATA MORGANA:**



Disponível em <https://mgtvwhm.files.wordpress.com/2015/05/mirage1.jpg?w=650>

**DISPERSÃO CROMÁTICA**

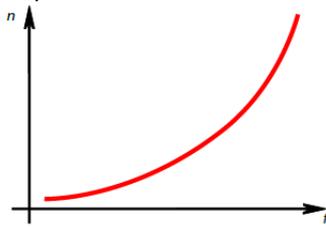
Se a luz branca atravessar um dióptro ela irá se dispersar, isto é, as cores serão separadas



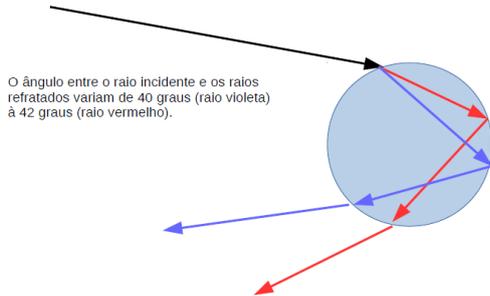
Lembre-se que a velocidade da luz para todas as frequências é a mesma no vácuo.

PROFESSOR DANILO

Mas quando as ondas se propagam em meios materiais, quanto maior a frequência menor a velocidade. Então, segundo a Lei de Snell, podemos ver que a onda mais lenta sofre maior desvio.



Por fim, isso explica os arco-íris



Explique por que, ao olhar o arco-íris, vemos a parte vermelha acima e a azul em baixo. Isso não parece ser contraditório com o que foi apresentado aqui?

Resposta parcial: não é contraditório. Tente entender fazendo um desenho

**PRISMAS**

**Prisma – introdução**

O que é um prisma?

CLASSIFICAÇÃO

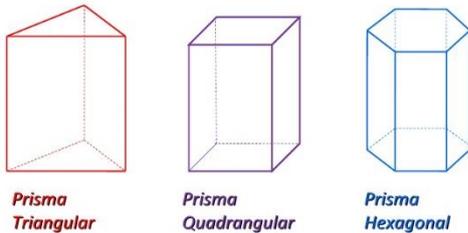


Figura 10: disponível em: <https://3.bp.blogspot.com/-NdqnlIPVzMU/V7XxLTS9wI/AAAAAAAAAL8/r1rmj5EqbMMPoOrS6ffqgevGxrlr72mfQCLcB/s1600/prismas-3-728.jpg>

Na física vamos trabalhar apenas com o prisma de base triangular e o representaremos por um simples triângulo

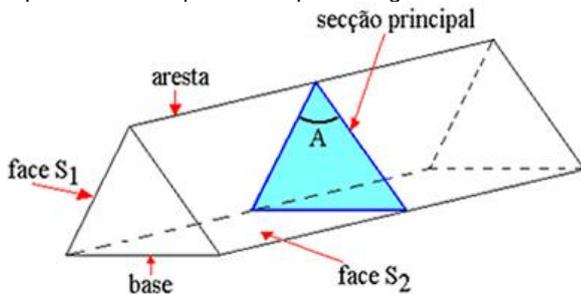
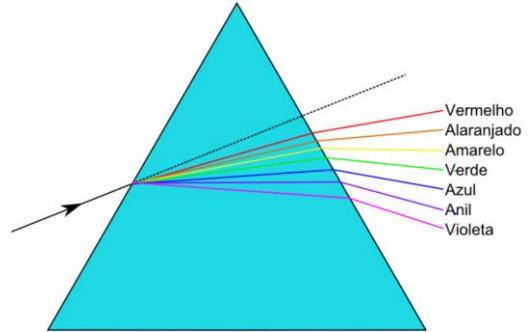


Figura 11: Disponível em: <http://alunosonline.uol.com.br/upload/conteudo/images/prisma-triangular.jpg>

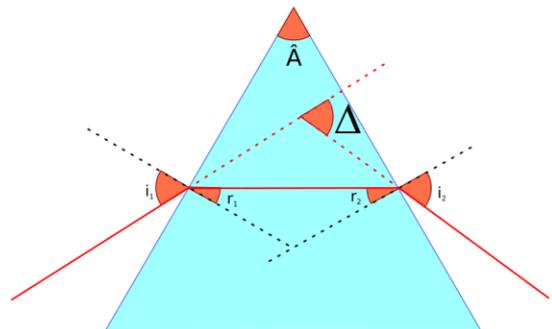
Chamaremos o ângulo de abertura  $\hat{A}$  do prisma de ângulo de refração do prisma

MC – REFRAÇÃO – PRIMEIRO ANO – 17/04/2023

**Dispersão**



**Desvio mínimo**



Chamamos de desvio  $\Delta$  o desvio angular sofrido pelo raio incidente ao atravessar o prisma

$$\Delta = i_1 - r_1 + i_2 - r_2$$

$$A + (90^\circ - r_1) + (90^\circ - r_2) = 180^\circ \Rightarrow A = r_1 + r_2$$

Se variarmos o ângulo de incidência,  $\Delta$  poderá ter um valor mínimo que chamaremos de  $\delta$

Na condição de desvio mínimo, temos que

$$\begin{cases} i_1 = i_2 = i \\ r_1 = r_2 = r \end{cases}$$

Portanto, para a situação de desvio mínimo:

$$\begin{cases} A = 2r \\ \delta = i_1 - r_1 + i_2 - r_2 = 2i - 2r \end{cases} \Rightarrow \delta = 2i - A$$

**EXERCÍCIOS**

11. (Upf 2018) Conta a história que Isaac Newton, trabalhando no polimento de algumas peças de vidro, conseguiu obter um prisma triangular, o qual utilizou para a sua famosa experiência da dispersão da luz branca, ilustrada na figura a seguir.



(Fonte: Luz, A. M. R. Física 2: contexto & aplicações. Scipione, 2011)

Utilizando-se da palavra latina *spectrum*, ele descreveu o conjunto de cores que resultou dessa dispersão da luz branca ao atravessar o prisma. A explicação para o observado por Newton encontra-se associada ao fato de que cada cor que compõe o *spectrum* sofre um desvio diferente em virtude

- a) da sua polarização.
- b) da sua difusão.
- c) do seu índice de refração.
- d) da sua velocidade no vácuo.
- e) da sua interferência.

PROFESSOR DANILO

12. (Uem 2017) O livro *Óptica*, de Isaac Newton, apresenta experimentos que tratam da decomposição da luz branca usando prismas. Sobre um prisma de vidro colocado no ar, sendo atravessado por raios luminosos, assinale o que for **correto**.

01) O desvio do raio luminoso produzido por um prisma depende de pelo menos três fatores: o ângulo de incidência do feixe na primeira face, o ângulo de refração do prisma e o índice de refração do vidro.

02) Quando um feixe de luz branca incide sobre um prisma, a cor vermelha é a que menos sofre desvio enquanto a violeta é a que apresenta maior desvio.

04) O índice de refração do vidro não depende da frequência da luz que o atravessa.

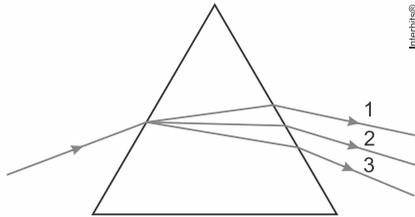
08) Quando a luz passa de um meio menos refringente (o ar) para um meio mais refringente (o vidro), o raio luminoso se aproxima da normal.

16) O índice de refração de um meio indica quantas vezes a velocidade da luz (no vácuo) é maior que a velocidade da luz no meio.

TEXTO PARA A PRÓXIMA QUESTÃO:

Um feixe de luz branca incide em uma das faces de um prisma de vidro imerso no ar. Após atravessar o prisma, o feixe emergente exibe um conjunto de raios de luz de diversas cores.

Na figura abaixo, estão representados apenas três raios correspondentes às cores azul, verde e vermelha.



13. (Ufrgs 2016) A partir dessa configuração, os raios 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, às cores

- a) vermelha, verde e azul.      b) vermelha, azul e verde.  
c) verde, vermelha e azul.      d) azul, verde e vermelha.  
e) azul, vermelha e verde.

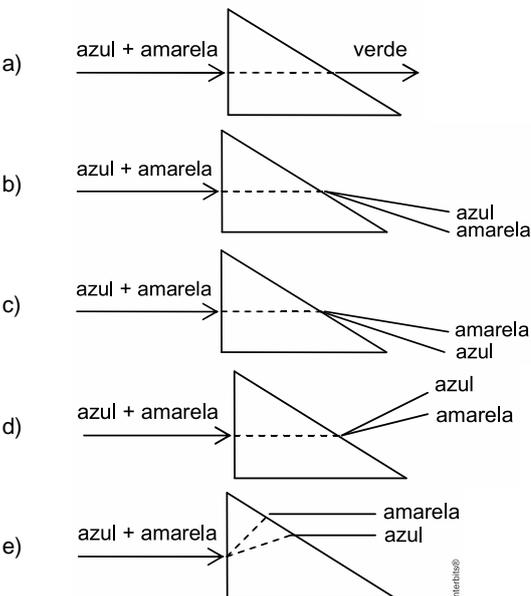
14. (Fgvjrj 2015) Um feixe de luz composto pelas cores azul e amarela incide perpendicularmente a uma das faces de um prisma de vidro. A figura que melhor pode representar o fenômeno da luz atravessando o prisma é

Dados:

índice de refração da luz amarela no vidro do prisma = 1,515;

índice de refração da luz azul no vidro do prisma = 1,528;

índice de refração da luz de qualquer frequência no ar = 1.



MC – REFRAÇÃO – PRIMEIRO ANO – 17/04/2023

15. (Udesc 2015) Com relação aos fenômenos da reflexão e da refração da luz branca, analise as proposições.

I. A transparência dos vidros é explicada pelos fenômenos de refração e reflexão.

II. A dispersão da luz branca em um prisma de vidro é devida à reflexão na face de incidência do prisma.

III. A luz branca dispersa em um prisma é composta somente pelas cores primárias vermelha, verde e azul.

Assinale a alternativa **correta**.

- a) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.  
b) Somente a afirmativa I é verdadeira.  
c) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.  
d) Somente a afirmativa III é verdadeira.  
e) Todas afirmativas são verdadeiras.

**RESPOSTAS**

1. B      2. D      3. A      4.  $n_{\text{lâm}} = 1,45$       5. E

6. a) Devido à diferença entre os índices de refração entre o vidro e o ar, pela Lei de Snell-Descartes, o raio de luz que incide com ângulo não nulo sofre desvio que pode ser observado pela mudança entre os seus ângulos de incidência e refração.

b)  $v = 2 \cdot 10^8$  m/s.

7. D      8. A      9. E

10. a) Ponto 1 - refração e dispersão da luz branca

Ponto 2 - reflexão total da luz

Ponto 3 - refração da luz

b) Ponto 1 porque a luz sofre desvios de refração diferentes conforme sua cor (frequência). A velocidade da luz na água depende de sua frequência.

11. C

12.  $01 + 02 + 08 + 16 = 27$ .

13. A      14. C      15. B