



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

FABIOLA GONZAGA DO NASCIMENTO

**REFRAÇÃO E REFLEXÃO INTERNA TOTAL DA LUZ: ESTUDO REALIZADO A
PARTIR DA OBSERVAÇÃO DE UM RAIOS LUMINOSO EM MEIOS HOMOGÊNEO
E HETEROGÊNEO.**

**ARARUNA/PB
2022**

FABIOLA GONZAGA DO NASCIMENTO

REFRAÇÃO E REFLEXÃO INTERNA TOTAL DA LUZ: ESTUDO REALIZADO A PARTIR DA OBSERVAÇÃO DE UM RAIOS LUMINOSO EM MEIOS HOMOGÊNEO E HETEROGÊNEO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação/Departamento do curso de graduação em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Mário César Soares Xavier.

**ARARUNA
2022**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

N244r Nascimento, Fabiola Gonzaga do.

Refração e reflexão interna total da luz [manuscrito] : estudo realizado a partir da observação de um raio luminoso em meios homogêneo e heterogêneo / Fabiola Gonzaga do Nascimento. - 2022.

31 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2023.

"Orientação : Prof. Dr. Mário César Soares Xavier, Coordenação do Curso de Física - CCTS. "

1. Óptica . 2. Propagação da luz. 3. Refração da luz. I.
Título

21. ed. CDD 530.124

FABIOLA GONZAGA DO ANSCIMENTO

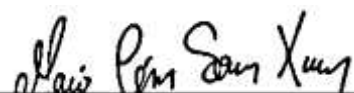
REFRAÇÃO E REFLEXÃO INTERNA TOTAL DA LUZ: ESTUDO REALIZADO A
PARTIR DA OBSERVAÇÃO DE UM RAIOS LUMINOSO EM MEIOS HOMOGÊNEO E
HETEROGÊNEO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Coordenação/Departamento do curso de
graduação em Física da Universidade Estadual
da Paraíba, como requisito parcial à obtenção
do título de licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Aprovada em: 14 /12 / 2022.

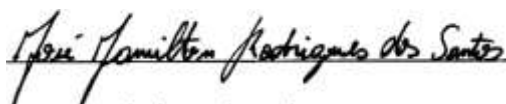
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Mário César Xavier Soares (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Robson Vieira Silva
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente ao meu Deus que me ajudou a chegar até aqui, sem ele eu não sou nada, peço que sua mão me guie por onde quer que eu vá. Quero agradecer também por ele ter enviado nossa princesa Valentina Emanuely, que chegou como benção em nossas vidas.

A meu esposo Edvan que sempre está do meu lado, que me compreende, me incentiva e me dá todo apoio e principalmente acredita em mim. Aos meus sogros que sempre me dão apoio em tudo.

A meu orientador Prof. Dr. Mário Cesar, que sempre nos incentiva a estudar e conseguir alcançar nossos objetivos, obrigada professor, por me dar a oportunidade de fazer parte do grupo do Fotônica, e me proporcionar o meu espaço de estudo no laboratório.

Ao meu professor, Me. Robson Vieira que me ajudou a concluir meu trabalho, e me deu todo suporte na orientação.

Ao meu pai Manoel, a minha mãe Paula, aos meus irmãos Fabiana, Gustavo e Adriano, por sempre acreditarem em mim e na minha capacidade de concluir mais esta etapa em minha vida.

Em nome da minha tia Sil, quero agradecer a todas minhas tias e tios, pelo carinho que têm por mim. Aos meus sobrinhos que são tudo que tenho.

Aos professores do Curso de licenciatura em Física da UEPB, em especial, a Dr. Jamilton. Me. Aline Faustino e Me. Thiago, que contribuíram ao longo desses anos, por meio das disciplinas, para o desenvolvimento da minha vida acadêmica e profissional.

Aos amigos, em especial Joedson, Josenaldo, Erivania, Aldaisa, Mileny, por terem ficado comigo e me ajudado em tudo que eu precisava, sem vocês não teria conseguido chegar até aqui!

As minhas amigas Williane, Vitória que são como irmãs, me apoiaram, me incentivaram e sempre estiveram comigo.

RESUMO

O fenômeno da refração ocorre quando um feixe de luz monocromática atravessa a interface de separação que divide, por exemplo, dois meios transparentes. Consequentemente, ocorre uma variação na velocidade de propagação da luz, pois cada meio possui o que chamamos de índice de refração. De modo que existe meios mais refringente do que outros, como é o caso do vidro e do ar. Outro fenômeno interessante, envolvendo a propagação da luz, é a reflexão interna total da luz. Esse fenômeno é o princípio básico da fibra ótica. Considerando esses fenômenos fortemente presente em nosso cotidiano, nos motivamos a analisar e observar o comportamento da luz em meios homogêneo e não homogêneo. Para isso, preparamos uma série de experimentos de baixo custo. Alcançamos resultados significativos, os quais estão de acordo com a aquilo que é esperado pela literatura. Além disso, calculamos o índice de refração da água usando a lei de Snell-Descartes. Portando, conseguimos cumprir com os nossos objetivos e construir um trabalho que seja útil para outros que se interessarem pelo tema, ou por professores que queiram levar a prática experimental em suas aulas.

Palavras-Chave: Óptica geométrica. Propagação da luz. Refração da luz. Reflexão interna total.

ABSTRACT

Refraction phenomenon occurs when a monochromatic light beam passes through the separation interface that divides, for example, two transparent mediums. Consequently, there is a variation in the light speed propagation, because each medium possesses what we call refraction index. So that there are more refractive mediums than others, as is the case with glass and air. Another interesting phenomenon involving light propagation is light's total internal reflection. This phenomenon is the basic principle of optical fiber. Considering these phenomena that are strongly present in our daily lives, we were motivated to analyze and observe light's behavior in homogeneous and non-homogeneous mediums. To do so, we have prepared a series of low cost experiments. We have reached significant results, which are in accordance with what is expected by recorded literature. Moreover, we have calculated water's refraction index using Snell-Descartes Law. Therefore, we have achieved our aims and have built a study that is useful to others that are also interested in the theme, or teachers who want to add experimental practice to their classes.

Keywords: Geometric Optics. Light propagation. Light refraction. Total internal reflection.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1	Contexto histórico da Luz	8
2.2	Princípios da óptica geométrica	10
2.3	Fenômeno de refração da Luz	11
2.4	Índice de refração	13
2.5	Leis da refração	14
2.6	Fenômeno da reflexão da luz	16
2.6.1	<i>Reflexão difusa</i>	<i>17</i>
2.6.2	<i>Reflexão regular</i>	<i>18</i>
2.7	Reflexão total	18
2.8	Ângulo limite	19
2.9	Meios homogêneos	20
2.10	Meios heterogêneos	21
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O termo óptica está relacionada com a visão e aborda desde os assuntos mais complexos até os simples, como o estudo da luz e os fenômenos sofridos (refração e reflexão, por exemplo) seus meios de propagação e suas distintas definições, isto é, a capacidade de se comportar como partícula ou onda. É através da óptica geométrica que podem ser explicados e descritos os fenômenos de refração e reflexão da luz.

Segundo Martins e Silva (2013), a definição para a lei da reflexão está relacionada com os ângulos, por eles serem iguais tanto no meio incidente quanto no meio refletido, e a lei da refração considera que, a razão entre os senos dos ângulos (incidente e refratado) é constante.

Existem três tipos de meios ópticos para que luz possa-se propagar: um deles é chamado de meio transparente, onde permite que a luz seja vista de forma clara e bem definida, como exemplo o vácuo. Existem outros meios que também podem ser considerados como meios transparentes, quando contém uma espessura pequena, e que transmitem a imagem ou o objeto nitidamente, sendo eles: água, vidro e o ar.

Ainda retratando dos meios ópticos, temos os meios translúcidos, onde permite que as imagens sejam visualizadas de forma que apareça somente os contornos que sua sombra projeta, também conhecida como silhueta. Já os meios opacos não permitem de forma alguma que a luz se propague.

A óptica é de grande importância para os alunos que estudam física e para a humanidade em geral, pois estuda vários fenômenos ópticos que acontecem no dia a dia, como: refração, reflexão e a interação da luz com os meios. Nesse trabalho daremos continuidade ao trabalho de Geisse Kelly Soares Nery Pontes, a mesma fez parte do grupo Fotônica e teve como orientador o Prof. Dr. Mário Cesar.

O presente trabalho traz discursões sobre os fenômenos citados acima os quais podem ser observados através dos experimentos que aqui serão realizados, tal como a relação entre a teoria e a experimentação, deixando exposto nesse trabalho os resultados alcançados através da prática experimental em meios homogêneo e heterogêneo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

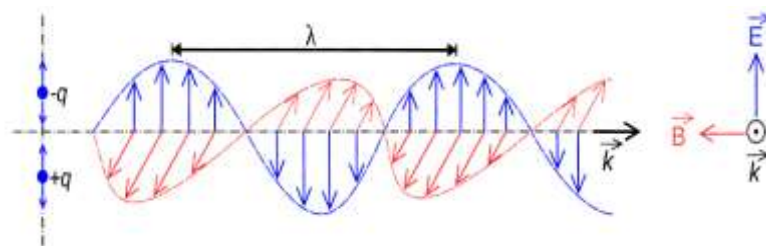
2.1 Contexto histórico da luz

O interesse em compreender a natureza da luz vem desde os filósofos gregos, da antiga Grécia, os quais acreditavam que a luz era constituída de partículas emitidas pelo olho em direção ao objeto, que ao ser atingido por essas partículas era iluminado. Sendo, então, esta forma com que conseguíamos enxergar os objetos. Estas ideias prevaleceram por muitos séculos. Essa percepção iniciou-se com Euclides (325 a.C. a 265 a. C.).

Isaac Newton tinha uma perspectiva diferente dos gregos. Durante o século XVII, ele defendeu que a luz se comportava como corpúsculos (conjunto de partícula) que se propaga em linha reta. Em contraposição a Newton, no mesmo século, Christian Huygens acreditava que a luz tinha um comportamento ondulatório, a qual satisfaz as explicações dos fenômenos de reflexão e refração da luz.

James Clerk Maxwell em 1860, unificou conceitos de Ampere e Faraday (estudavam os campos separadamente) e explicou que a onda eletromagnética é constituída pela propagação em conjuntos de campos elétricos \vec{E} e magnéticos \vec{B} , que oscilam e se propagam em linha reta e perpendicularmente como está demonstrado na Fig. (1).

Figura 1 – Representação do campo elétrico (\vec{E}) e do campo magnético (\vec{B}), em uma onda eletromagnética.

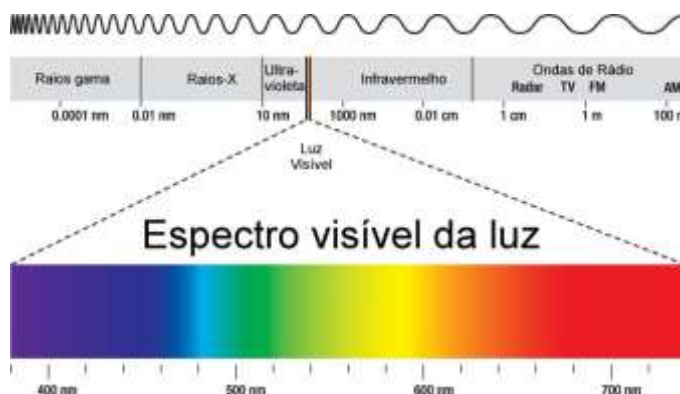


Fonte: <https://sites.google.com/site/ondapatricia/ondas-mecanicas/ondas-electromagneticas>.

A luz visível, isto é, a faixa de cores perceptíveis, está relacionada ao espectro eletromagnético e possui um comprimento de onda capaz de estimular o olho humano, produzindo a visão. Esse espectro, também conhecido como espectro visível possuem ondas que variam de 430 mil a 750 mil giga-hertz (GHz), sendo elas: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raio x, raio gama, o que diferencia uma da outra é sua frequência, energia e seu comprimento de onda. Temos que as ondas de frequência podem ser

vistas e representadas por cores, que variam do vermelho, onde indica que é onda de menor frequência e violeta de maior frequência. Como demonstrado na fig. (2).

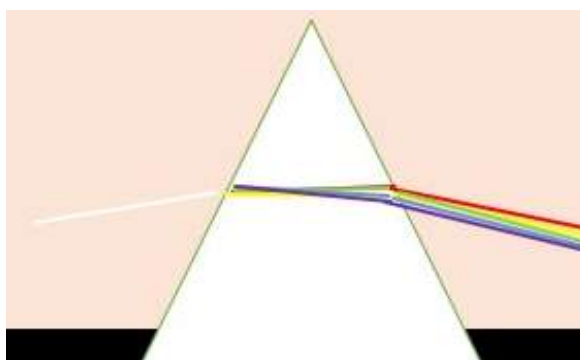
Figura 2 – Espectro eletromagnetismo.



Fonte: <https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico>

Através de um experimento feito por Isaac Newton entre as décadas de 1660 e 1670 usando um prisma, ele conseguiu visualizar a dispersão da luz branca, que é formada por ondas de várias frequências. Quando a luz passa de meio para o outro ocorre o fenômeno de refração, como pode ser visto na Fig. (3).

Figura 3 – Decomposição da luz branca por um prisma.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Podemos visualizar esse fenômeno quando a luz sai do ar entrando no prisma e sai novamente, podendo mudar de direção. Outra coisa que pode acontecer é as ondas se separarem ao emergirem do prisma dando origem a várias outras cores, por se tratar de uma mistura heterogênea de raios (NEWTON, 1672).

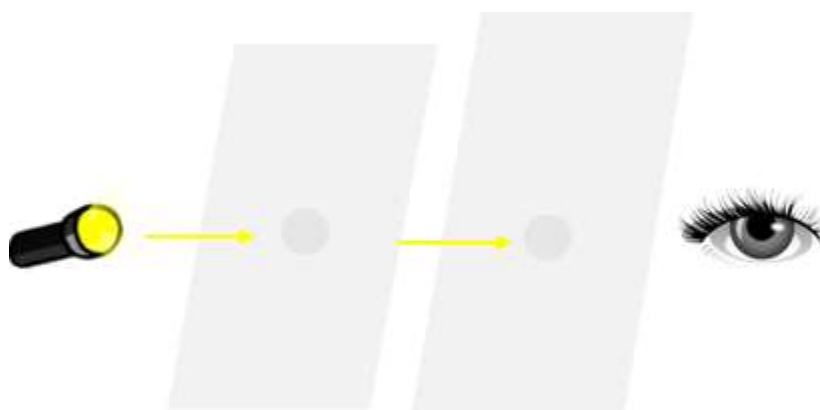
A área da física que é responsável por estudar a luz é chamada de óptica, essa palavra vem do Grego *optikós* que quer dizer: relativo à luz, é subdividida em óptica física que investiga a natureza da luz e óptica geométrica que estuda o comportamento e a propagação da luz, na seção 2.1 estudaremos sobre esse princípio.

2.2 Princípios da óptica geométrica

Há três princípios que norteiam a descrição que a óptica geométrica dá para a propagação da luz, são eles: 1) propagação retilínea da luz; 2) reversibilidade da luz; e 3) independência dos raios (MOYSÉS, 1998). A seguir vamos discutir cada um desses princípios.

No caso do princípio da propagação retilínea da luz, vamos considerar que uma lanterna foi ligada próxima a uma pessoa. Neste caso, podemos desenhar os raios se propagando retilineamente em direção aos olhos da pessoa. A Fig. (4) ilustra esta situação. No entanto, para que possamos, de fato, descrever essa propagação retilínea da luz, temos que levar em consideração que a luz esteja se propagando em um meio transparente. Por exemplo, vácuo, vidro, ar etc.

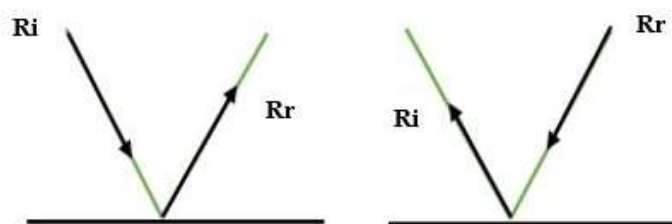
Figura 4 – Propagação retilínea da luz em meios transparente.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Considerando o princípio anterior, se um raio de luz for incidido sobre uma superfície e refletir, segundo o princípio da reversibilidade da luz, ambos os raios, incidido e refletido, percorrem o mesmo caminho, ou seja, não depende do sentido de propagação (ZILIO, 2009), como está ilustrado na Fig. (5).

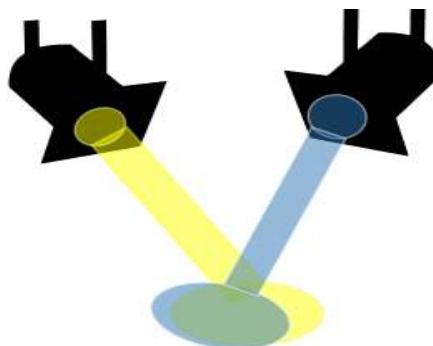
Figura 5 – Princípio da reversibilidade: o raio incidente (Ri) e o raio refletido (Rr) percorrem o mesmo caminho.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Por fim, o princípio da independência diz que se dois raios de luz se cruzarem, não observaremos nenhuma alteração na direção de propagação de ambos os raios, ou seja, elas continuam a se propagarem livremente (ZILIO, 2009). Por exemplo, podemos considerar dois holofotes ligados, os quais podem emitir luz na mesma cor ou em cores diferentes, sem alterar sua direção. Na Fig. (6) temos a emissão nas cores amarela e azul, note que, ao se cruzarem, ambas as luzes continuam a se propagar na direção em que foram emitidas.

Figura 6 – Princípio da independência, representada pelos raios de luzes dos holofotes.



Fonte: Próprio autor, 2022.

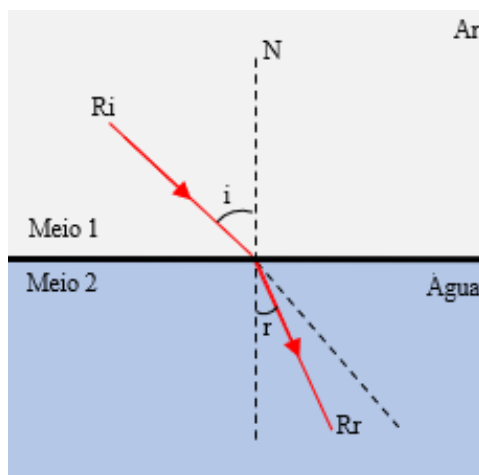
Mediante aos princípios da óptica geométrica, discutiremos nas seções seguintes, os fenômenos que ocorrem quando a luz interage com os meios, que são eles: Refração da luz, reflexão e reflexão interna total.

2.3 Fenômeno de refração da luz

Entendemos por refração da luz o fenômeno pelo qual a luz se propaga de um meio para outro, nesse processo pode ocorrer uma variação tanto na velocidade quanto na direção de propagação, a depender o ângulo de incidência do raio de luz (HALLIDAY e RESNICK,

2009). Para exemplificar, vamos considerar que um raio de luz se propague em dois meios transparentes. Sejam esses meios o ar e a água, como está apresentado na Fig. (7). Note que se o raio luminoso for incidido obliquamente do ar para a água, ele sofre uma refração, ou seja, um desvio na sua direção de propagação e, conseqüentemente, uma alteração na velocidade.

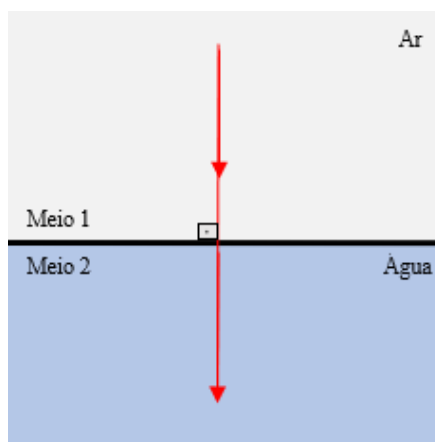
Figura 7 - Trajetória do feixe de luz, saindo do meio 1(ar) para o meio 2 (água), onde, R_i é o raio incidente, R_r é o raio refratado, N é a normal, i é o ângulo de incidência e r é o ângulo refratado.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Porém, se o feixe de luz for incidido perpendicularmente, ou seja, a um ângulo de 90° em relação à superfície de separação dos dois meios, Fig. (8), observaremos que o raio incidente não sofre refração. Ou seja, a luz continua em sua propagação retilínea nos dois meios.

Figura 8 - Raio incidido perpendicularmente.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Embora na Fig. (8) não apresente nenhuma ocorrência de desvio, isso não significa que a velocidade de propagação seja a mesma em ambos os meios. Pelo contrário, a velocidade será diferente. Isso é devido ao que chamamos de índice de refração o qual discutiremos na próxima seção.

2.4 Índice de refração

De acordo com Serway e Jewett (2004) podemos definir o índice de refração, n , ou o índice de refração absoluto, como sendo uma grandeza dada pela razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio. Matematicamente é expressa por,

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo e v a velocidade da luz no meio. Note que quanto maior for velocidade da luz no meio (v), menor será o índice de refração, n . O inverso também é verdadeiro, ou seja, quanto menor for v , maior será n .

Na Tabela 1, apresentamos alguns materiais com seus respectivos índices de refração que já foram apresentados pela literatura.

Tabela 1 - Valores apresentados para cada material.

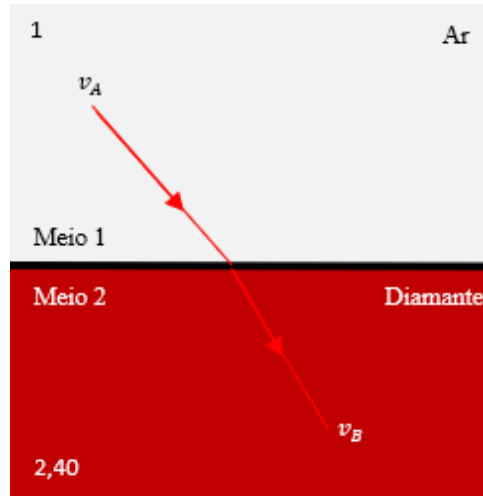
Substância	Índice de refração
Ar	1,00
Água	1,35
Álcool	1,36
Vidro	1,50 a 1,90
Diamante	2,42
Sal de cozinha	1,54
Óleo	1,46

Fonte: brasilecola.uol,2022

Entre os valores apresentados na Tabela 1, o ar possui o menor índice de refração, logo, em qualquer outro meio o índice de refração será maior que 1.

A partir da Eq. (1), podemos calcular o índice dos meios separadamente. Para isso vamos considerar o caso apresentado pela Fig. (9).

Figura 9 - Índice de refração no meio ar, e no meio diamante, onde: v_A é a velocidade da luz no meio ar e v_B é a velocidade da luz no meio diamante.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022

Para calcularmos o índice de refração relativo, tanto para o ar quanto para o diamante, reescrevemos a Eq. (1) para um desses meios,

$$n_A = \frac{c}{v_A} \quad (2)$$

$$n_B = \frac{c}{v_B}, \quad (3)$$

onde, n_A e n_B é o índice de refração dos meios, ou seja, do ar e do diamante, respectivamente. Os termos v_A e v_B são as velocidades da luz nos meios. Se dividimos a Eq. (2) pela Eq. (3), vamos obtermos o índice de refração do meio 1 (ar) relativo ao meio 2 (diamante).

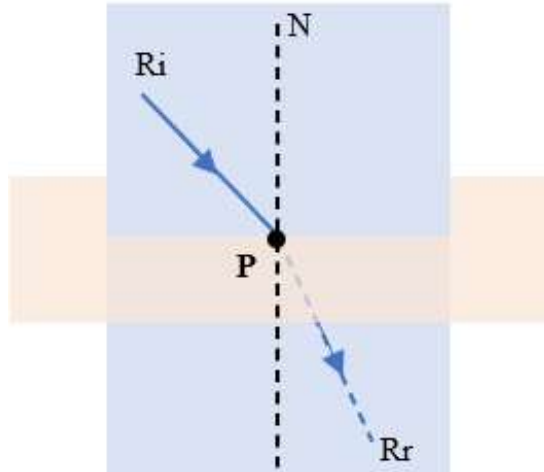
$$\frac{n_A}{n_B} = \frac{c/v_A}{c/v_B} \quad (4)$$

$$n_{A,B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{v_B}{v_A}$$

2.5 Leis da refração

A refração da luz é definida a partir de dois princípios. O primeiro princípio refere-se ao raio incidente, raio refratado e a reta normal, onde todos devem estar contidos no mesmo plano. Fig. (10).

Figura 10 – Raio incidente (Ri), raio refratado (Rr), reta normal (N), pertencente ao mesmo plano (P).



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

O segundo princípio da refração é regido pela lei de Snell–Descartes, onde ele concluiu que os senos dos ângulos incidentes, θ_i , e refratados, θ_r , são dependentes da velocidade da luz no meio. Por exemplo, considerando dois meios, meio 1 e meio 2, as velocidades serão v_1 e v_2 , vejamos

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2} \quad (5)$$

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \Rightarrow \quad v_1 = \frac{c}{n_1} \quad (6)$$

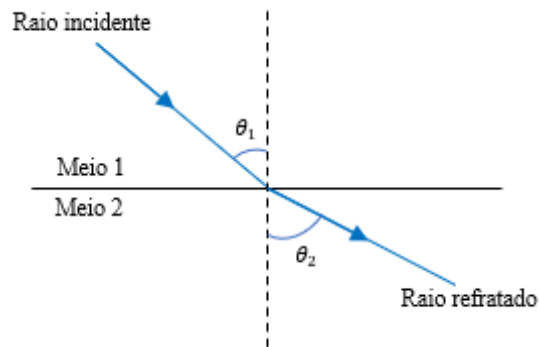
Substituindo a Eq. (6) em (5), obtemos a equação de Snell-Descartes, Eq. (8).

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (7)$$

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \quad (8)$$

Se o índice de refração no meio 1 for maior que o índice de refração do meio 2 ($n_1 > n_2$), consequentemente, o ângulo refratado será maior que o ângulo de incidência ($\theta_1 < \theta_2$). Ao passar de um meio mais refringente para um menos refringente o raio refratado se afasta da normal, Fig. (11).

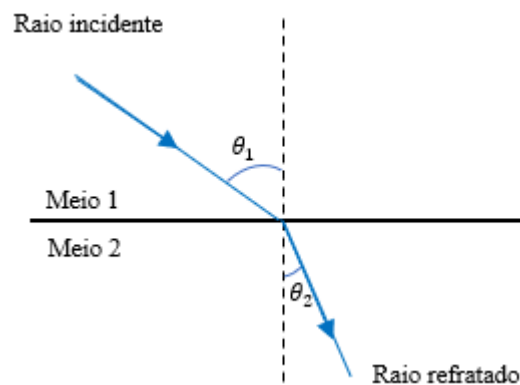
Figura 11 - Fenômeno de refração da luz, para $n_1 > n_2$.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Se o índice de refração no meio 1 for menor que o índice de refração do meio 2 ($n_1 < n_2$), consequentemente, o ângulo refratado será menor que o ângulo de incidência ($\theta_1 > \theta_2$). Como pode ser visto na Fig. (12).

Figura 12 - Fenômeno de refração da luz, para $n_1 < n_2$.



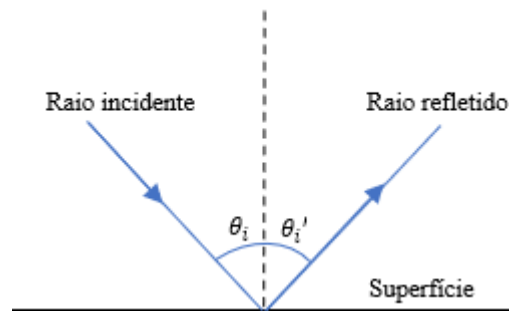
Fonte: Elaborada pela autora, 2022

Note que quando o feixe de luz sai de um meio menos refringente, para um meio mais refringente o raio refratado se aproxima da normal.

2.6 Fenômeno da reflexão da luz

O fenômeno da reflexão da luz ocorre quando o raio luminoso incidido atinge uma dada superfície e retorna ao mesmo meio de propagação. Neste caso, temos que o raio incidente, o raio refletido e a normal estão no mesmo plano (coplanares), como está ilustrado na Fig. (13). Com isso formula-se a primeira lei da reflexão (SERWAY e JEWETT, 2004).

Figura 13 - Fenômeno da reflexão da luz.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Na segunda lei da reflexão o ângulo refletido é igual ao ângulo incidente (MARQUES e MELO, 2011). Podemos demonstrar matematicamente como sendo,

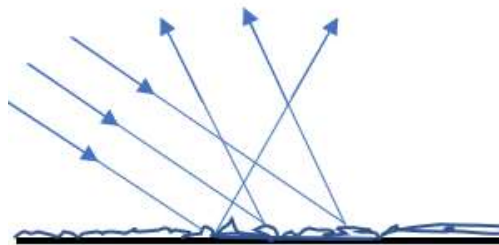
$$\theta_i = \theta_i' , \quad (9)$$

Veja que através da Fig. (13), podemos observar que θ_i é o ângulo incidente formado como a normal e θ_i' é o ângulo refletido formando com a normal. A reflexão da luz é dividida em duas reflexões: Difusa e regular, a seguir discutiremos sobre elas.

2.6.1 Reflexão difusa

A reflexão difusa acontece quando a luz atinge uma superfície, a qual podemos denominar rugosa ou irregular, ou seja, quando a luz bate em uma superfície como esta seus raios se propagam tomando direções distintas, como representa a Fig. (14):

Figura 14 - Comportamento dos raios na reflexão difusa.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Observe que um conjunto de luzes são incididos paralelamente, porém, quando os feixes luminosos atingem a superfície rugosa, os raios refletidos tomam direções diferentes.

Exemplo de difusão: paredes, chapa de metal, a própria lua etc. então podemos concluir que a reflexão difusa ocorre em meios não lisos, porém conseguem refletir luz.

2.6.2 Reflexão regular

A reflexão regular é o oposto da reflexão difusa, pois estar relacionada com a propagação da luz em superfície lisa ou especular, ou seja, quando a luz atinge o meio, os raios incidentes e refletidos formam um conjunto perfeito, observe a Fig. (15).

Figura 15 - Comportamento dos raios na reflexão regular.



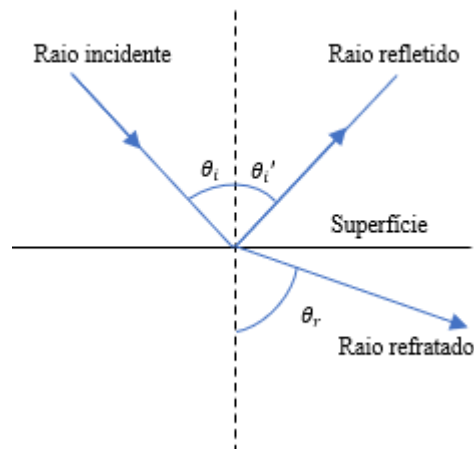
Fonte: Elaborada pela autora 2022.

Note que, um conjunto de raios luminosos incidem paralelos em uma superfície polida (lisa) e refletora, e são refletidos paralelamente, ou seja, têm uma única direção. A exemplo do espelho plano, a qual produz uma imagem perfeita, quando o objeto é posicionado em sua frente.

2.7 Reflexão total

Como foi visto na seção 2.3, o fenômeno de refração ocorre quando o raio incidente passa de um meio para outro meio, logo, sabemos que parte desse raio incidente também será refletido, como demonstra a Fig. (16).

Figura 16 - Fenômeno de reflexão, quando parte do raio incidente é refratado e refletido.



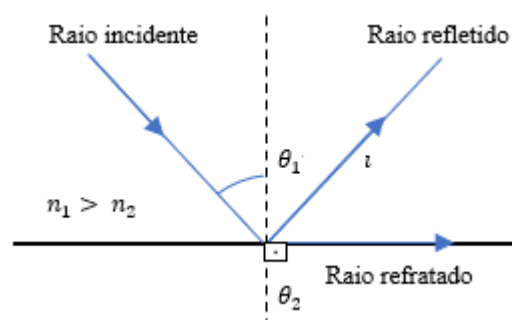
Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Podemos visualizar o raio luminoso incidente saindo de um meio mais refringente para um menos refringente o que implica que o ângulo refratado é maior que o ângulo de incidência, e se afasta da normal, sendo assim, quanto mais refringente for o meio de incidência, maior será o ângulo de refração, até que ele ultrapasse o limite 90° e deixe de ocorrer, existindo apenas os raios refletidos (BAUER, WESTFALL e DIAS, 2013). Na física chamamos de reflexão interna total.

2.8 Ângulo limite

Como foi descrito na seção 2.7, para que ocorra o fenômeno de reflexão total é preciso que o raio incidente atinja o ângulo limite ι , até que o ângulo refratado ultrapasse 90° com a interface que divide os dois meios, observe a Fig. (17).

Figura 17 - Ângulo refratado atingindo 90° com a interface.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Por conseguinte, para calcular o ângulo limite ι é necessário usarmos a Eq. (8), que faz referência a segunda lei do fenômeno de refração, lei de Snell-Descartes.

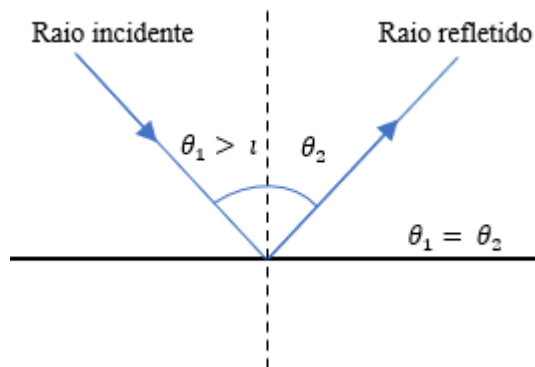
$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 ,$$

levando em consideração que $\text{sen } \theta_2$ é igual 90° e que θ_1 equivale a ι , podemos substituir na Eq. (8).

$$\begin{aligned} n_1 \cdot \text{sen } \iota &= n_2 \cdot \text{sen } 90^\circ \\ n_1 \cdot \text{sen } \iota &= n_2 \cdot 1 \\ \text{sen } \iota &= \frac{n_2}{n_1} \end{aligned} \quad (9)$$

Através da Eq. (9), podemos concluir que n_2 será sempre menor que n_1 , para que o seno seja menor que 1. Quando o ângulo formado pelo raio incidente for maior que o ângulo limite, não teremos passagem de luz para outro meio o que resulta em uma reflexão total. Fig. (18).

Figura 18 - Reflexão total, para $\theta_1 > \iota$.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

2.9 Meios homogêneos

Os meios homogêneos são aqueles os quais apresentam uma única fase de mistura e que é possível observar a olho nu, ou seja, meios que conseguimos visualizar um único material, o qual o feixe de luz faz movimentos retilíneos e não faz curvas, logo, é constante. Para fazer a linearização das medidas e determinar o índice de refração usaremos a Eq. (11).

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{1}{n} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}} \quad (10)$$

$$n = \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{x}$$

$$z = x \cdot \sqrt{n^2 - 1} \quad (11)$$

No meio homogêneo e transparente separamos dois experimentos. Na seção 3.1 listaremos os materiais utilizados para a execução deles.

2.10 Meios heterogêneos

O meio é heterogêneo é aquele em que existe a presença de mais de uma substância, logo, por serem substâncias diferentes elas não se misturam, ou seja, não ficam uniforme, dificultando a passagem da luz, por conta de variações no meio, podendo ocorrer o fenômeno da refração. Segundo a literatura veremos que o índice de refração cresce muito lento de acordo com a profundidade. Logo, temos a seguinte expressão:

$$n_y = n_0 + ky, \quad (12)$$

onde, n_0 é o índice de refração a altura inicial, y é a profundidade e k a constante.

No meio não homogêneo separamos dois experimentos. Na seção 3.1 listaremos os materiais utilizados para a execução deles.

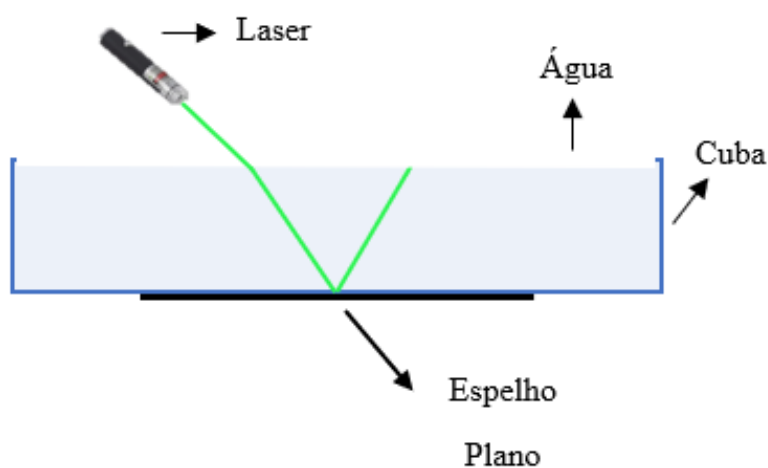
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nós realizamos quatro experimentos para observar o comportamento da luz em diferentes meios, tanto homogêneos quanto heterogêneos. Para isso, utilizamos os seguintes materiais:

- Espelho;
- Uma cuba de vidro de dimensões 40 cm x 5cm;
- 600 ml de água;
- 100 ml de água misturada com açúcar;
- 300 ml óleo;
- Laser verde (podendo ser de outra cor);
- Suporte para o laser;
- Régua;
- Lápis marcador;

No primeiro experimento, posicionamos a cuba sobre o espelho como está representado na Fig. (19), e a preenchemos completamente com água. Depois, posicionamos o laser para que fosse apontado de forma oblíqua e, assim, observássemos os fenômenos de refração e reflexão.

Figura 19 - Demonstração de como deve ser executado o experimento.

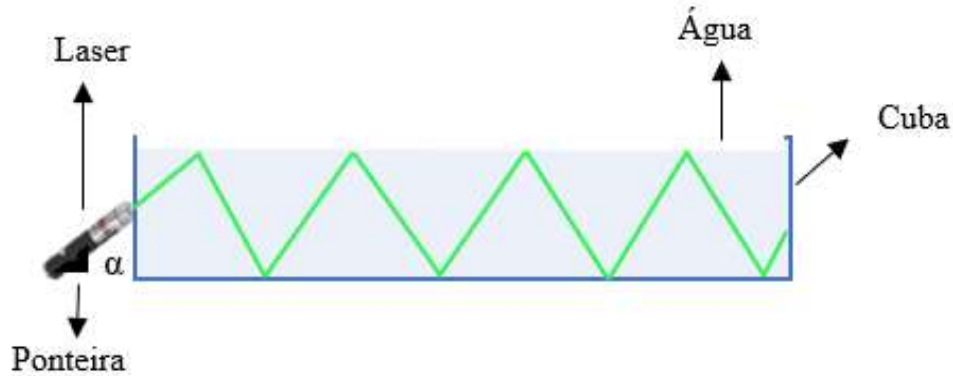


Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Para a realização do segundo experimento, colocamos a água na cuba até que atingisse a uma altura máxima. Depois, posicionamos o laser no suporte de forma que fosse possível

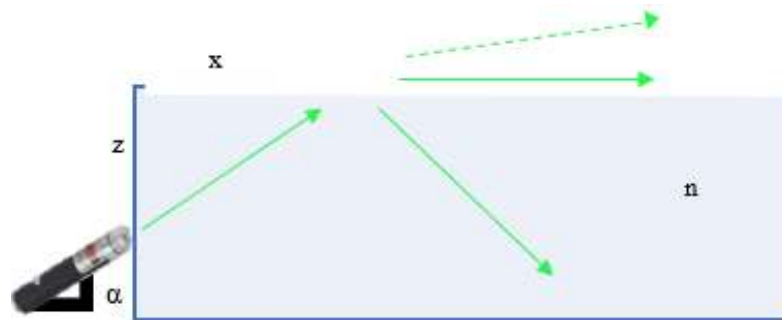
variar o ângulo de incidência α . Dessa maneira, podemos encontrar o ângulo em que o fenômeno da reflexão total seja observado, como está ilustrado na Fig. (20).

Figura 20 - Fenômeno de reflexão total no interior da cuba.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Figura 21 - Representação experimental para medir as distâncias z e x .

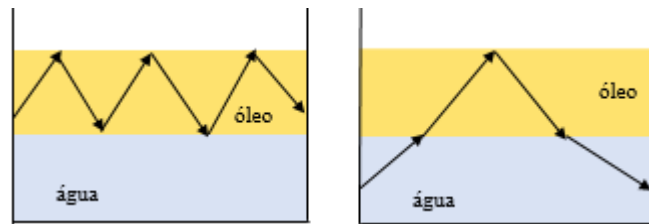


Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Ao realizar o experimento representado pela Fig. (21), calculamos o índice de refração da água, usando a Eq. (11), a qual resultou na linearização. Consideramos z como sendo a altura medida a partir da borda de cima da cuba até o ponto de incidência do laser, e x como a distância da parede da cuba até o ponto o raio do laser faz a primeira reflexão, formando ângulo crítico α . Embora ocorra uma refração quando o laser passa do ar para o vidro, estamos interessados apenas nos raios se propagando no interior da cuba.

Diferentemente dos dois experimentos anteriores, o terceiro experimento foi realizado com dois meios diferentes, água e óleo, os quais não se misturam, como está apresentado na Fig. (22).

Figura 22 – Propagação da luz em uma mistura heterogênea, água e óleo.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

No quarto experimento usamos 100ml de água com açúcar e posicionamos o laser na altura máxima dada por y , com isso esperávamos obter um resultado semelhante ao que está apresentado na Fig. (23).

Figura 23 -Propagação da luz em meio não homogêneo.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Para obter os resultados desse experimento fizemos as medições para y e y_0 , onde y_0 é a profundidade do laser ao atingir a outra parede da cuba. Além medimos o tempo a cada 5 minutos para verificar a profundidade do laser.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo o roteiro experimental que apresentamos no Capítulo 3, obtemos os resultados que iremos discutir neste capítulo.

Concernente ao primeiro experimento, preenchemos a cuba com 600 ml de água e apontamos o laser a partir de uma altura correspondente à 10 cm. Apontamos o laser de forma oblíqua e variamos o ângulo de incidência entre 10° e 50° . Utilizamos o painel de Hart para medir os ângulos de incidência e o ângulo refletido, deixando claro que consideramos a reta normal igual a 0° .

Os resultados obtidos, apresentado na Fig. (23), estão de acordo com o que é esperado pela segunda lei da reflexão, ou seja, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

Figura 23 - Laser sendo apontado de forma inclinada até a superfície que se encontra o espelho.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Embora a Fig. (23) nos mostre o fenômeno de refração e reflexão da luz ocorrendo simultaneamente, nos atentamos a estudar somente o fenômeno que acontece no interior da cuba, ou seja, reflexão da luz. Neste caso, o ângulo de incidência é igual ao do refletido. Através do experimento obtemos os valores que se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados obtidos no experimento de reflexão total.

θ_i	θ_r
10°	10°
20°	20°
30°	30°
40°	40°
50°	50°

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

A Fig. (24) nos mostra o resultado do segundo experimento, ou seja, reflexão interna total. Após observar esse comportamento da luz, realizamos medidas de z e x , para calcular o índice de refração da água, como mostra a Fig. (20).

Figura 24 - Fenômeno de reflexão interna total, vista na parte superior da cuba.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 3.

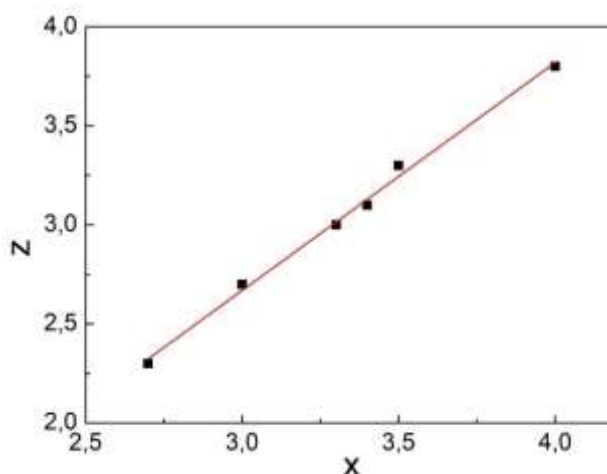
Tabela 3 - Medidas encontradas para z , x e n .

Medidas	z (cm)	x (cm)	n
1	2,3	2,7	1,31
2	2,7	3,0	1,34
3	3,0	3,3	1,34
4	3,1	3,4	1,35
5	3,3	3,5	1,37
6	3,8	4,0	1,38

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Utilizando os dados da Tabela 3, construímos o gráfico de z em relação a x , Fig. (25), e realizamos o *fit*. Ainda obtemos o valor do coeficiente angular de 1,15 e o coeficiente linear de 0,8. A média das medidas de n foi de 1,34, podemos considerar como sendo um resultado coerente, pois o índice de refração da água é de 1,33.

Figura 25 – Gráfico das distâncias x e z . Crescimento linear de x com relação a z .

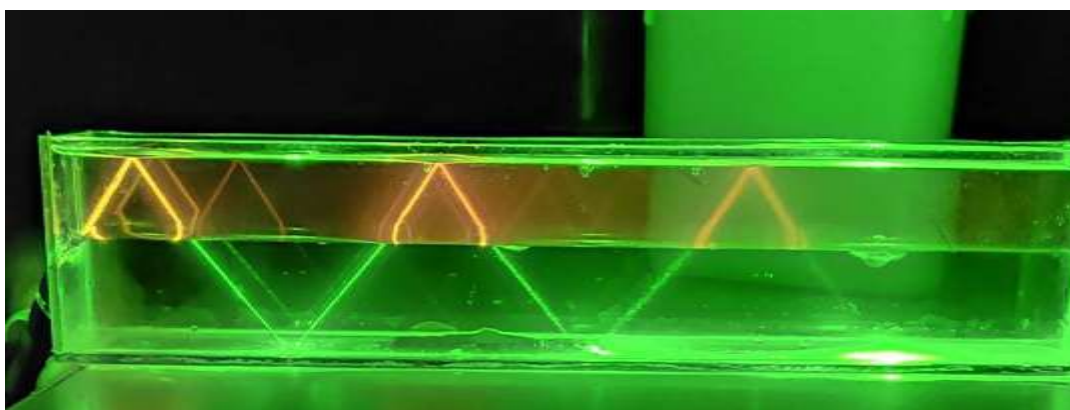


Fonte: Elaborada pela autora, 2022

Ainda sobre o segundo experimento, nós observamos uma redução no número de raios no interior da cuba quando variávamos o ângulo entorno do ângulo crítico. Também foi observado que os raios deixaram de sair da cuba, como é caso da Fig. (24). Note que há um crescimento aparente de x com relação a z , ou seja, quanto menor a altura de z , maior a distância de x .

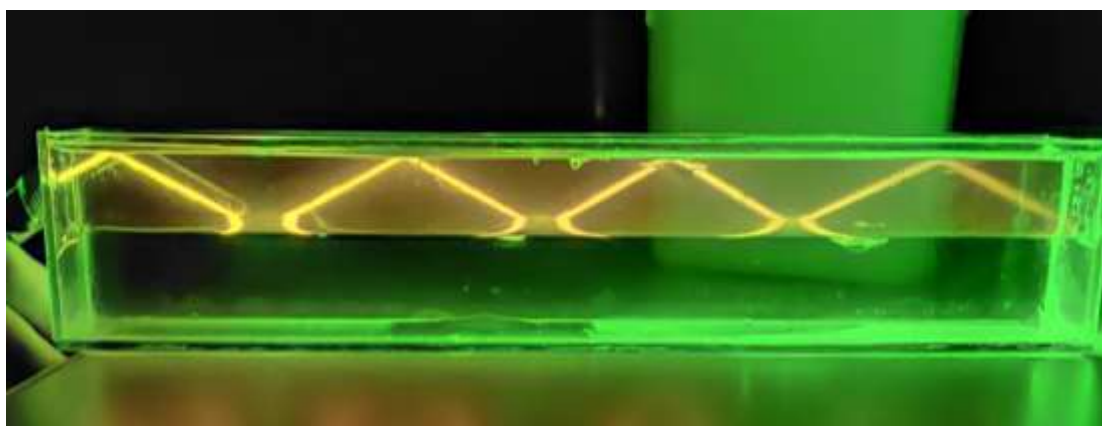
O terceiro experimento, utilizamos duas substâncias diferentes, água e óleo de soja, colocamos 300ml de água e 300 ml de óleo. Como a água e o óleo não se misturam, então, temos dois meios diferentes onde a luz pode se propagar, como está exposto na Fig. (26) e Fig. (27). O óleo possui uma densidade menor que a água, por isso que ele fica na parte superior da cuba. Pelos dados da Tabela 1, temos que o índice de refração da água é de 1,35 e o índice de refração do óleo é de 1,46. Com isso, podemos concluir que o óleo é mais refringente do que a água, e também podemos observar a redução da velocidade do raio luminoso.

Figura 26 – Resultado do terceiro experimento: raio luminoso se propagando da água para o óleo.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Figura 27 - Resultado do terceiro experimento: raio luminoso se propagando apenas no óleo.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Nesse experimento, podemos concluir que a luz sofre múltiplas reflexões e refrações quando passa de um meio para outro, isso ocorre quando o raio incidente se propaga do meio de menor índice de refração (água) para outro meio com índice de refração maior (óleo), Fig. (26), se deslocando da parte inferior da cuba até atingir a superfície e retornar, novamente, para a parte inferior.

O resultado apresentado na Fig. (27) nos mostra o feixe de luz sendo incidido do óleo em direção à água, porém, o feixe não consegue passar para a água. Isso porque o óleo possui uma densidade menor do que a água, logo, o óleo forma uma camada refletora, impedindo a passagem da luz. Note que ocorreu uma alteração na cor do laser verde para uma tonalidade mais amarela, tanto na Fig. (26) quanto na Fig. (27), provavelmente isso ocorreu devido as substâncias que contém no óleo e à absorção das cores.

No quarto e último experimento colocamos cerca de 100 ml de água com açúcar e adicionamos lentamente 500 ml. Essa adição lenta foi realizada com o intuito de evitar qualquer tipo de turbulência no meio. Com ajuda do suporte, posicionamos o laser, do lado contrário de onde adicionamos a água, a uma altura $y = 3,5$ cm. Podemos observar o resultado na Fig. (28).

Figura 28 -Propagação da luz no meio inogeneo.



Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

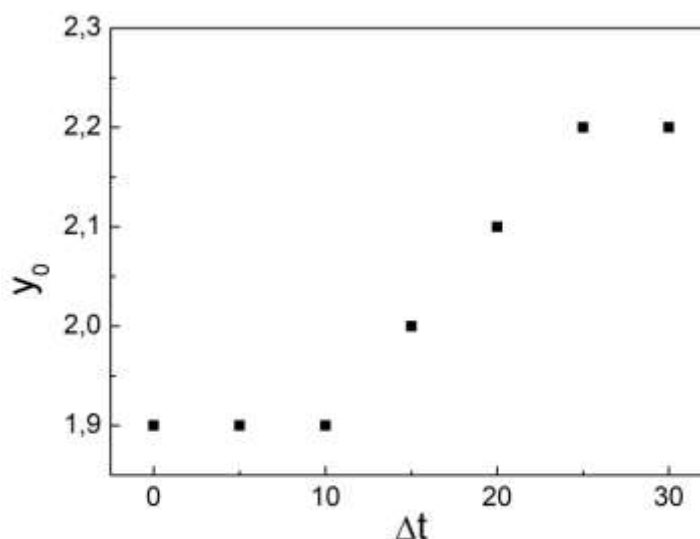
Após o intervalo de 20 minutos, realizamos as medidas da profundidade y_0 a cada 5 minutos, para investigarmos o comportamento do raio conforme o açúcar decantasse na cuba. Com isso obtemos os valores que estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Variação y_0 em relação Δt .

Δt (tempo)	Y_0 (profundidade, cm)
0,0	1,9
5,0	1,9
10,0	1,9
15,0	2,0
20,0	2,1
25,0	2,2
30,0	2,2

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Note, pelos dados da Tabela 4, que após 25 minutos os valores de y_0 se manteve constante, logo, não foi necessário prosseguir com a execução dele. A Fig. (29) nos mostra o gráfico do comportamento que foi observado.

Figura 29 - Comportamento da profundidade em relação ao tempo.

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Pelo gráfico da Fig. (29) podemos observar que nos primeiros 10 minutos não houve nenhuma mudança significativa, logo, podemos concluir que neste intervalo de tempo, o valor de y_0 permaneceu constante. Isso porque a decantação é lenta, portanto, a concentração de açúcar não altera significativamente nos minutos iniciais. No entanto, depois dos 10 minutos observamos um aumento crescente na profundidade até atingir um valor constante. Como houve tempo o açúcar decantar, então, a concentração de açúcar na parte de baixo da cuba é maior do que na parte superior, isso implica uma inclinação maior na trajetória do feixe.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo com as limitações dos experimentos, mediante os materiais de baixo custo que utilizamos, conseguimos obter bons resultados. Tanto em misturas homogêneas, como em misturas heterogêneas. Nesse sentido, nós conseguimos alcançar nossos objetivos.

Como foi discutido Capítulo 4, conseguimos medir o índice de refração da água (meio homogêneo) e encontramos um valor de $n = 1,34$. Esse resultado é praticamente igual ao valor apresentado pela literatura que é de 1,33. No meio heterogêneo conseguimos visualizar o fenômeno proposto pela literatura sobre o crescimento lento do raio luminoso no meio e conseguimos calcular a variação da profundidade em relação ao tempo.

Para além dos resultados alcançados, o nosso trabalho também pode ser utilizado como material de apoio por professores que queiram utilizar o recurso experimental em sala de aula. Neste caso, nas aulas de Óptica Geométrica. Os experimentos são classificados como sendo de baixo custo e de fácil reprodução, trazendo conceitos e leis da física, mostrando de forma clara e concisa a relação com o cotidiano.

Portanto, o presente trabalho servirá como base para futuros trabalhos acadêmicos, deixando como proposta a utilização de outros materiais, como: óleo (em meio homogêneo), água com sal grosso (meio não homogêneo), entre outros. Através dessas substâncias os futuros autores poderão observar o comportamento que o feixe de luz faz quando é inserido nos meios transparente, citados acima, além disso poderão utilizarem o transferidor para medirem os ângulos de incidência, refratado e refletido.

REFERÊNCIAS

CAVALCANTE, Kleber G. **"As Leis da Refração da Luz"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/as-leis-refracao-luz.htm>. Acesso em 21 de novembro de 2022.

CIPRIANO, Aline. **Tecnologias baseadas na luz: abordagem contextualizada e interdisciplinar entre física e química**. Santa Catarina, dezembro 2017.

COELHO, Bianca da Silva. **A utilização da experimentação com lasers e materiais de baixo custo no ensino de óptica**. Teresina-PI, maio, 2017.

HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física, volume 4: óptica e física moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HELERBROCK, Rafael. **"Índice de refração"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/indice-de-refracao.htm>. Acesso em 26 de abril de 2022.

JÚNIOR, Joab Silas da Silva. **"Cores e a frequência da luz"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/cores-2.htm>. Acesso em 26 de abril de 2022.

MUNDO EDUCAÇÃO. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/optica.htm>>. Acesso em 27 de abril de 2022.

PAIVA, R. de. **Leis da refração da luz**. Revista de Ciência Elementar, Casa das Ciências, v. 2, n. 3, 2014

PONTES, Geisse Kelly Soares Nery. **A propagação da luz em meio inhomogêneo: uma análise a partir da reflexão interna total**. Araruna – PB, julho 2021. Disponível em: <<http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/123456789/24152>> Acesso em: 15, novembro, 2021.

ROSA, Cleci Teresinha Werner et al. **Atividade experimental para demonstração dos fenômenos de reflexão, refração e reflexão total**. REnCiMa, v.4, n.1, p. 75-85, julho 2013.

SALA DE DEMOSTRAÇÃO DE FÍSICA. **Demonstracoes.fisica. ufmg, 1999-2022**. Disponível em: <<http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/84/7.-Reflexao-Total>>. Acesso em: 30, março, 2022.

YOUNG, Hugh D., Roger A. FREEDMAN, and A. Lewis FORD. **"Sears e Zemansky, Física II."** Óptica e Física Moderna (2009).