



INSTITUTO FEDERAL
Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA CURSO DE
LICENCIATURA EM FÍSICA**

CARLOS DANIEL FRAZÃO

**APARATO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO PARA ESPECTROSCOPIA
ÓPTICA POR TRANSMISSÃO EXPLORANDO SMARTPHONES**

SALGUEIRO - 2022

CARLOS DANIEL FRAZÃO

**APARATO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO PARA ESPECTROSCOPIA
ÓPTICA POR TRANSMISSÃO EXPLORANDO SMARTPHONES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, campus Salgueiro, como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Wellington dos Santos Souza

SALGUEIRO - 2022

FICHA CATALOGRÁFICA (OBRIGATÓRIO)

Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora. Para solicitar a ficha catalográfica de seu trabalho entre em contato com a Biblioteca do Campus Salgueiro, antes de realizar o depósito da versão final do seu trabalho.

Imprimir no verso da folha anterior.

Para citar esse documento:

Frazão, Carlos Daniel. Aparato experimental de baixo custo para determinar o índice de refração por transmissão. Salgueiro, PE, 2022, xxx. Monografia (Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IF Sertão PE) / Campus Salgueiro, Salgueiro, PE, 2022.

CARLOS DANIEL FRAZÃO

**APARATO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO PARA DETERMINAR O ÍNDICE
DE REFRAÇÃO POR TRANSMISSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso

Apresentado em: 27/10/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington dos Santos Souza
IF Sertão PE – Campus Salgueiro
Presidente

Profa. Beatriz Leal Cosmo
Secretária Escolar da Escola Municipal Francisco Filgueira Sampaio
Membro Externo

Prof. Dr. Marcelo Souza da Silva
IF Sertão PE – Campus Salgueiro
Membro Interno

Prof. Dr. Eriverton da Silva Rodrigues
IF Sertão PE – Campus Salgueiro
Membro Interno/Suplente

SALGUEIRO 2022, 27 de outubro de 2022

Dedicatória.

A minha amada mãe, o principal motivo de não ter desistido, minha maior fortaleza. E a meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me guiado e me fortalecido em cada uma das lutas que me trouxeram até aqui.

Ao meu professor e orientador, Wellington, por todo o apoio e cooperação para que este trabalho possa ter sido concluído.

Aos integrantes da banca, Beatriz, Eriverton e Marcelo, que dispuseram de seu tempo para avaliar este trabalho.

A todos os colegas e amigos que fizeram parte do início da minha inacabável formação docente. Especialmente a Melquizedek e Domingos por toda a troca de conhecimento e apoio prestado no decorrer de todo o meu curso.

A todos que compõem o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano - Campus Salgueiro. E, aqui, incluo todos os servidores da instituição, como também os estudantes.

Por fim, agradeço a minha família, que sempre me apoiou.

"O presente é deles; Mas futuro, pelo qual
eu realmente trabalhei, é meu"

Nikola Tesla

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta experimental de baixo custo para o estudo da transmitância e do índice de refração a partir da técnica de espectroscopia óptica por transmissão. Para isso, foram utilizadas 4 placas de acrílico de 2 mm, 3 mm, 5 mm e 10 mm de espessura e dois smartphones, um como fonte luminosa (CP1) e o outro como um sensor de luminosidade (CP2), ambos sobre uma bancada. Através desta experiência, foi possível obter resultados significantes, próximos dos valores teóricos descritos na literatura e, quando comparado com os dados obtidos por um espectrômetro convencional, a variação da porcentagem da transmitância foi de apenas 3,33% do valor encontrado por meio do aparato experimental. Vale ressaltar que esses valores foram encontrados por meio de um experimento de baixo custo que possibilita sua aplicação, para discutir alguns fenômenos ópticos.

Palavras-chave: Experimentação; Baixo custo; Espectroscopia.

ABSTRACT

This work presents a low-cost experimental proposal for the study of transmittance and refractive index using the transmission optical spectroscopy technique. Was used 4 acrylic plates of 2 mm, 3 mm, 5 mm and 10 mm thick. and two smartphones, one as a light source (CP1) and the other as a light sensor (CP2), both on a bench. Through this experience, it was possible to obtain results, significantly, close to the theoretical values described in the literature and, when compared with the data obtained by a conventional spectrometer, the variation of the transmittance percentage was only 3.33% of the value found through the experimental apparatus. It is worth mentioning that these values were found through a simple and low-cost experiment that allows their application to discuss some optical phenomena.

Keywords: Experimentation; Low cost; Spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma onda eletromagnética.

Figura 2 - Representação da parcela da luz visível no espectro eletromagnético.

Figura 3 - Representação dos raios: incidente, refletido e refratado.

Figura 4 - Reflexão e transmissão para incidência normal.

Figura 5 - Representação do aparato experimental.

Figura 6 - Variação da intensidade luminosa em função da distância (Lei do inverso do quadrado da distância).

Figura 7 - Representação da transmissão da luz no acrílico.

Figura 8 - Interface do aplicativo Phyphox. Intensidade luminosa em função do tempo de exposição do sensor.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Intensidade luminosa em função do inverso do quadrado da distância entre a fonte luminosa e o sensor.

Gráfico 2 - Intensidade luminosa detectada pelo sensor para diferentes posições entre os dispositivos CP1 e CP2 (Acrílico de 3 mm).

Gráfico 3 - Intensidade luminosa detectada pelo sensor para diferentes posições entre os dispositivos CP1 e CP2 (Acrílico de 2 mm, 5 mm e 10 mm).

Gráfico 4 - Transmissão do acrílico para diferentes posições obtido a partir da atividade experimental proposta.

Gráfico 5 - Transmissão para o acrílico em função do comprimento de onda obtido usando um espectrômetro comercial.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transmissão e índice de refração para as diferentes placas de acrílico.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	14
2.2. EQUAÇÃO DE ONDA PARA E E B	15
2.3. ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	17
2.4. INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA	18
2.5. INCIDÊNCIA NORMAL	19
2.6. USO DE SMARTPHONES PARA ESPECTROSCOPIA ÓPTICA	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. SISTEMA OPERACIONAL:	26
3.2. MEDIDAS ESPECTROSCÓPICAS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5. CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

A luz faz parte da história da humanidade, desde antes dos primórdios da conhecida *Era do Fogo*, e está definitivamente interligada à evolução da nossa espécie, tanto no contexto biológico e fisiológico, quanto social. Ela é responsável por fenômenos físicos/químicos fascinantes, como o processo de fotossíntese, ou até mesmo a famosa aurora boreal, e é compreendida por um dos ramos da física denominado de óptica (SALVETTI, p.13, 2008).

Por volta de 500.000 a.c. a luz já era utilizada por nossos ancestrais, na Era do Paleolítico Posterior e Neolítico, para proteção contra animais selvagens, cozinhar alimentos, se aquecer, etc. Em 15.000 a.c, o homem pré-histórico usava a chama como lamparinas, produzidas a partir de rochas, chifres de animais, e gordura animal ou vegetal (SALVETTI, p.14, 2008).

Em 1666 o físico inglês Isaac Newton observou pela primeira vez que a luz branca pode ser decomposta em diferentes frequências (cores) em ao passar por um prisma (NEWTON, p. 21 2002). Este fenômeno é conhecido hoje como dispersão da luz e marcou o início da espectroscopia óptica.

Espectroscopia óptica é o estudo da interação da luz com a matéria. A partir dela, é possível obter informações sobre algumas características físicas e/ou químicas de materiais, sejam eles orgânicos ou inorgânicos. Algumas propriedades que podem ser determinadas são: índice de refração, transmitância, absorção e composição química dos materiais em análise.

O estudo da espectroscopia óptica vem contribuindo com vários avanços tecnológicos e aplicações em diversos ramos das ciências como física, química e ciências da vida. Dentre essas aplicações, podemos citar o controle da qualidade de medicamentos usando uma técnica de espectroscopia por refletância difusa no infravermelho. Através dessa técnica é possível realizar a análise de dosagens de medicamentos sem a geração de resíduos, com uma maior facilidade e baixo custo (SOUZA; FERRÃO, 2006).

Existem diversas outras aplicações que vão desde um simples raio-x, para detectar fraturas na estrutura óssea (FERRETTI; TIRELLO, 2009), ou produção de lentes ópticas, até as mais sofisticadas imagens do universo, como as captadas pelo telescópio James Webb (GARCÍA, 2022).

No entanto, muitas pesquisas, atividades de ensino e de rotina,

principalmente os localizados em países pobres ou subdesenvolvidos, apresentam dificuldades para obter resultados precisos e rápidos devido à falta de estrutura e/ou equipamentos necessários para realizar tais medições (MOTT, 2014). Por exemplo, a aquisição de um espectrômetro comercial (dispositivo usado para análise de materiais) pode envolver um investimento da ordem de R\$100.000,00. Em consequência disso, é notável uma tendência crescente nas pesquisas com o objetivo de projetar instrumentos simples e de baixo custo que possam fornecer informações físicas ou químicas confiáveis tanto qualitativamente, quanto quantitativamente.

Neste cenário, espectrômetros portáteis têm sido amplamente desenvolvidos e descritos na literatura beneficiados pelos recentes avanços em tecnologias ópticas e micro controladores eletrônicos e de imagem, que fornecem características técnicas que coincidem em instrumentos comerciais. Uma alternativa viável, e que vem sendo bastante estudada na literatura atual, corresponde ao uso de smartphones para avaliações espectroscópicas. A popularização dos Smartphones e o aprimoramento de seus componentes vem possibilitando a implementação de diferentes técnicas para realizar espectroscopia óptica em diversas áreas, como ciências forenses, biotecnologia e ciências da vida (FREIRE, 2019; CAVALCANTE, 2018).

Em razão disso, em nosso trabalho, propomos um aparato experimental de baixo custo para realizar o estudo da espectroscopia por transmissão utilizando um aparelho celular, com o objetivo de encontrar o índice de refração do acrílico e sua transmitância, de forma simples e eficaz.

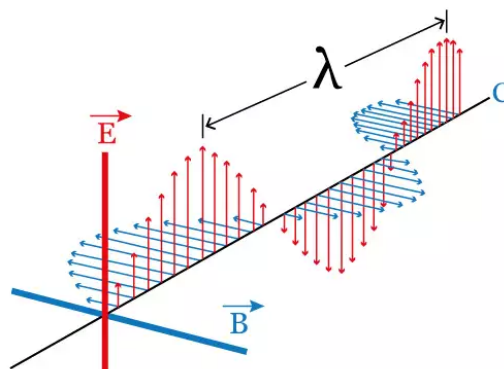
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

As ondas eletromagnéticas são oscilações que se propagam no espaço e, diferente das ondas mecânicas, não precisam de um meio material para se propagar, possuindo diferentes frequências que as caracterizam. No espaço livre (vácuo) as ondas eletromagnéticas viajam com uma velocidade c , conhecida como a velocidade da luz (HALLIDAY, 2009). Essas ondas são resultado da interação entre

um campo elétrico e um campo magnético que oscilam no tempo, como mostra a Figura 1, sendo λ o comprimento de onda da radiação.

Figura 1 - Representação de uma onda eletromagnética



Fonte: Educa Mais Brasil, 2019. Disponível em

<<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/ondas-eletromagneticas>>. Acesso em: 29/09/2022.

As relações entre o campo magnético e o campo elétrico podem ser resumidamente expressas pelas Equações de Maxwell. Estas equações descrevem como cargas e correntes dão origem a campos elétricos e magnéticos. Para um meio no qual não há polarização e nem magnetização, as Equações de Maxwell podem ser escritas da seguinte forma:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1) \qquad \nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3) \qquad \nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

A partir dessas equações, podemos analisar como uma onda eletromagnética se comporta ao interagir com um determinado material, dependendo das condições iniciais e finais dessa interação.

2.2 EQUAÇÃO DE ONDA PARA **E** E **B**

Para regiões do espaço onde não há carga ou corrente ($\rho = 0$ e $J = 0$), as equações de Maxwell são escritas da seguinte maneira:

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (5) \qquad \nabla \cdot B = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (7) \qquad \nabla \times B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (8)$$

As equações acima constituem um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas, de 1º ordem para E e B. Podemos desacoplar estas equações aplicando o rotacional as equações 7 e 8. Neste caso vamos usar a seguinte identidade para o cálculo do rotacional do rotacional de um campo vetorial:

$$\nabla \times (\nabla \times f) = \nabla(\nabla \cdot f) - \nabla^2 f \quad (9)$$

Sendo f uma função vetorial. Para o campo elétrico, temos:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \quad (10)$$

Substituindo o rotacional e o divergente do campo elétrico, apresentado nas equações 5 e 7, respectivamente, e trazendo a derivada temporal para fora do rotacional, temos:

$$\nabla^2 E = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) \quad (11)$$

Substituindo o rotacional para o campo magnético (equação 8) na equação 11, chegamos a seguinte equação diferencial de 2º ordem para o campo elétrico:

$$\nabla^2 E + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (12)$$

Podemos escrever as constantes μ e ϵ em termos da velocidade de propagação da onda eletromagnética em um dado meio (GRIFFITHS, 1999). Neste caso, para a onda se propagando no meio livre, a velocidade é dada pela relação $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$. Logo, a equação 12 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\nabla^2 E + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

De maneira semelhante, podemos escrever a equação diferencial de 2ª ordem para o campo magnético (equação 14).

$$\nabla^2 B + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0 \quad (14)$$

Cada componente cartesiano de E e B satisfaz uma equação de onda tridimensional. Para a onda se propagando em uma direção específica (neste caso vamos considerar que a onda se propaga na direção z). A solução para as equações diferenciais de 2ª ordem 13 e 14 são dada, respectivamente, por:

$$E = E_0 \cdot e^{i(kz - \omega t)} \quad (15)$$

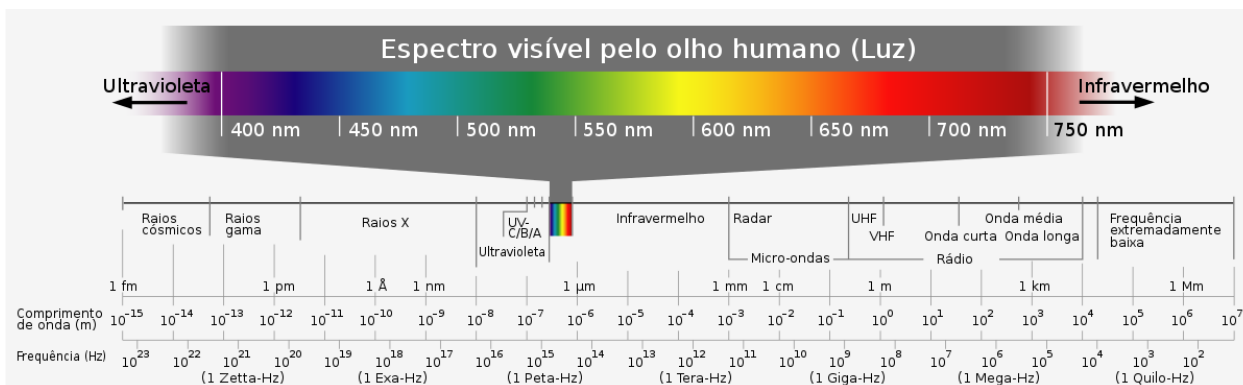
$$B = B_0 \cdot e^{i(kz - \omega t)} \quad (16)$$

Sendo que k corresponde ao número de onda da onda eletromagnética, z é a direção de propagação da onda e ω é a frequência dessa onda. Neste caso, as equações 15 e 16, representam ondas senoidais, planas e monocromáticas.

2.3. ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O espectro eletromagnético é um conjunto de ondas eletromagnéticas que apresentam uma ampla diversidade de comprimentos e, conseqüentemente, de frequências, e podem ser classificadas como ondas de rádio, microondas, infravermelho, visível, ultravioleta, raio x e raios gama (GRIFFITHS, 1999). A Figura 2 mostra a faixa do espectro eletromagnético que corresponde à luz visível.

Figura 2: Representação da parcela da luz visível no espectro eletromagnético



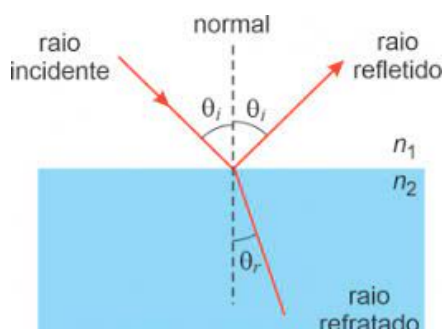
Fonte: Horst Frank / Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.

A luz visível corresponde a radiação eletromagnética na qual o olho humano é sensível, possibilitando que enxerguemos as cores de acordo com o comprimento de onda, podendo variar entre 400 e 700 nm. A relação entre o comprimento de onda e a frequência é inversamente proporcional e a energia dessa radiação é diretamente proporcional à frequência (MENDES, p.3, 2016).

2.4. INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA

A luz, ao interagir com a matéria, pode sofrer fenômenos como a reflexão, transmissão, absorção e espalhamento (SALDANHA, 2010). Dentre alguns princípios que englobam esses fenômenos, a lei da reflexão que diz que o raio refletido pertence ao mesmo plano do raio incidente e o ângulo que eles fazem com a normal a esse plano possui o mesmo valor $\theta_i = \theta_r$ (NUSSENVZVEIG, 1998), como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Representação dos raios: incidente, refletido e refratado.



Fonte: Sala de demonstrações de física - UFMG. Disponível em:

<<http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/83/6.-Refracao-da-luz>>. Acesso em 21/09/2022.

Na Figura 3, é possível observar o raio refratado que também pertence ao mesmo plano de incidência. Em 1621, Willebrord Snell demonstrou, através de seus experimentos, que a razão entre o ângulo de incidência θ_i e o ângulo refratado θ_r não era constante, como era tido na época. Contudo, Snell não chegou a publicar seus resultados. Apenas em 1637, Descartes enunciou a lei da refração, conhecida como *Lei de Snell*, ou *Lei de Descartes-Snell* (BARTHEM, 2005). Esta lei relaciona o ângulo de incidência com o ângulo refratado, e o ângulo de refração.

$$\frac{\text{sen}\theta(i)}{\text{sen}\theta(r)} = \frac{n(r)}{n(i)} \quad (17)$$

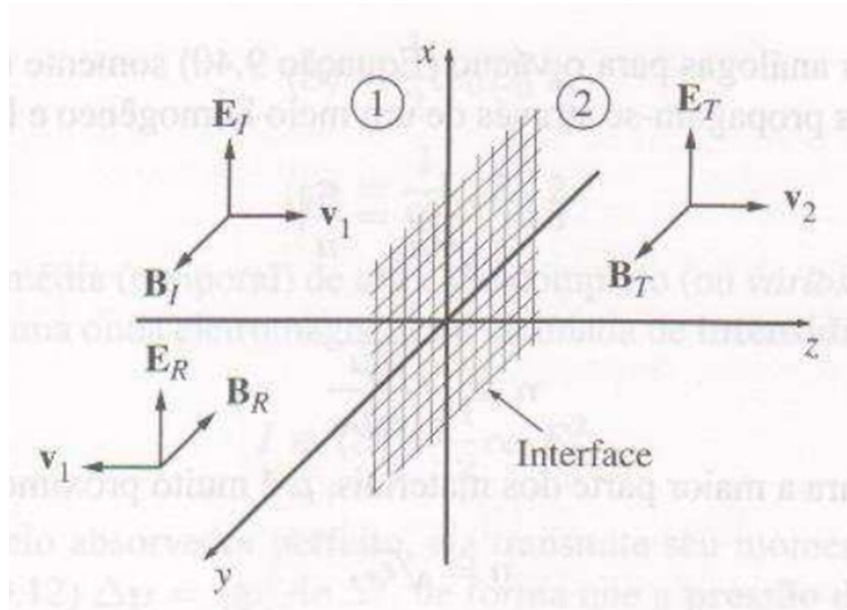
Já a absorção de uma onda eletromagnética é definida como a fração da potência absorvida por unidade de comprimento, sendo convertida em energia, enquanto a transmitância é a parcela de radiação que não é absorvida pelo meio. Para casos específicos onde uma luz incide normal a superfície ($\theta_i=0^\circ$), em um material dielétrico (sem a presença de um campo elétrico).

Por fim, o fenômeno óptico conhecido como espalhamento ocorre quando um feixe de luz incide em um meio/material formando um determinado ângulo em relação a normal da interface desse meio/material, mudando a direção e sentido de propagação da onda eletromagnética e é responsável, dentre outros fenômenos, pela cor característica do céu (ROCHA, 2010).

2.5 INCIDÊNCIA NORMAL

Podemos relacionar, geometricamente, o campo elétrico incidente (E_i), o refletido (E_r) e o campo elétrico transmitido (E_t) por determinado material dielétrico, como o acrílico. A Figura 4 mostra a reflexão e transmissão de uma onda eletromagnética para incidência normal à superfície de um determinado meio/material.

Figura 4 - Reflexão e transmissão para incidência normal.



Fonte: GRIFFITHS, 1999.

Impondo a condição de continuidade na interface entre os dois meios, considerando uma onda eletromagnética em que o campo elétrico está tangencial a superfície desta interface, temos:

$$E_1 = E_2$$

$$E_i + E_r = E_t$$

Substituindo os valores do campo elétrico, apresentados na equação 15:

$$E_{0i} \cdot e^{i(k_i x - \omega t)} + E_{0r} \cdot e^{i(k_r x - \omega t)} = E_{0t} \cdot e^{i(k_t x - \omega t)}$$

Assumindo que a onda incidente, refletida e transmitida apresentam as mesmas características ondulatórias ($k_i = k_r = k_t$ e $\omega_i = \omega_r = \omega_t$), temos a seguinte relação entre as intensidades dos campos elétricos incidente, refletido e transmitido:

$$E_{0i} + E_{0r} = E_{0t} \quad (18)$$

Analogamente, para campo magnético incidente, refletido e transmitido apresentam as mesmas características ondulatórias, com exceção da propagação do campo magnético refletido, que inverte o sentido de propagação, de modo que:

$$B_{0i} - B_{0r} = B_{0t} \quad (19)$$

Ambas as equações representam ondas coplanares, como representado na Figura 1, e monocromáticas. A partir da equação abaixo é possível correlacionar o campo elétrico e o campo magnético.

$$B = \frac{E}{v}$$

Além disso, também é possível determinar algumas características da luz, como a sua velocidade de propagação e, por meio do Vetor de Poynting (NUSSENVZEIG, p. 140, 1998), a intensidade da radiação eletromagnética, dada pela equação abaixo, onde E representa uma função de onda vetorial associada à luz.

$$I = \frac{1}{2} k \epsilon_0 v |E|^2 \quad (20)$$

Substituindo os valores apresentados na equação 18 na equação 19, para análise do campo eletromagnético:

$$\frac{E_{0i}}{v_i} - \frac{E_{0r}}{v_r} = \frac{E_{0t}}{v_t}$$

A velocidade da onda incidente e refletida possuem o mesmo valor ($v_i = v_r = v_1$). Assim, podemos reescrever da seguinte forma:

$$E_{0i} - E_{0r} = \frac{v_1}{v_2} \cdot E_{0t}$$

Substituindo o valor de E_{0t} , dado pela equação 8:

$$E_{0i} - E_{0r} = \frac{v_1}{v_2} \cdot (E_{0i} + E_{0r})$$

Podemos reescrever a equação da seguinte forma:

$$\frac{E_{0r}}{E_{0i}} = \frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} \quad (21)$$

Por meio dessa expressão, podemos encontrar o valor da refletividade R do meio material analisado, dado pela razão entre a energia incidente e a refletida, ou a intensidade da onda eletromagnética, enunciada na equação 20.

$$R = \frac{\frac{1}{2}k\varepsilon_0 v_1 |E_{0i}|^2}{\frac{1}{2}k\varepsilon_0 v_2 |E_{0r}|^2}$$

$$R = \left(\frac{E_{0i}}{E_{0r}} \right)^2$$

Reescrevendo em termos da velocidade, obtemos:

$$R = \left(\frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} \right)^2 \quad (22)$$

Partindo da refletividade, podemos determinar o valor da transmitância, que é justamente a parcela da onda eletromagnética que não foi refletida, obtendo a equação 23.0, que representa a transmitância em função da velocidade da luz incidente e transmitida.

$$T = 1 - R$$

$$T = 1 - \left(\frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} \right)^2$$

$$T = \frac{4v_1.v_2}{(v_1+v_2)^2} \quad (23)$$

Sabendo que a velocidade da onda eletromagnética pode ser determinada por $v = \frac{c}{n}$, obtemos uma equação que determina o valor da transmitância de determinado material em função do índice de refração do meio externo (ambiente) e do meio interno (material). Para isso, substituímos a velocidade de propagação da onda no meio 1 e no meio 2, tendo assim:

$$T = \frac{4\left(\frac{c}{n_1} \cdot \frac{c}{n_2}\right)}{\left(\frac{c}{n_1} + \frac{c}{n_2}\right)^2}$$

Feito isso, expandimos o produto notável da expressão.

$$T = \frac{4\left(\frac{c^2}{n_1.n_2}\right)}{\left(\frac{c^2}{n_1^2} + 2 \cdot \frac{c^2}{n_1.n_2} + \frac{c^2}{n_2^2}\right)}$$

E colocamos o c em evidência para, em seguida, podermos retirá-lo da equação, ficando apenas com n_1 e n_2 como variáveis.

$$T = \frac{4c^2 \frac{1}{n_1.n_2}}{c^2 \left(\frac{1}{n_1^2} + 2 \cdot \frac{1}{n_1.n_2} + \frac{1}{n_2^2}\right)}$$

$$T = \frac{\frac{4}{n_1.n_2}}{\left(\frac{1}{n_1^2} + 2 \cdot \frac{1}{n_1.n_2} + \frac{1}{n_2^2}\right)}$$

Podemos reescrever a equação em um produto notável da seguinte maneira:

$$T = \frac{\frac{4}{n_1 n_2}}{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)^2}$$

Simplificamos a equação e, em seguida, realizamos a soma das frações que compõem o produto notável.

$$T = \frac{4}{n_1 n_2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)^2}$$

$$T = \frac{4}{n_1 n_2 \left(\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}\right)^2}$$

Reescrevemos a expressão para que ela possa ser simplificada, usando o divisor da parte proveniente do produto notável.

$$T = \frac{4}{n_1 n_2 \frac{(n_1 + n_2)^2}{(n_1 n_2)^2}}$$

$$T = \frac{4}{\frac{(n_1 + n_2)^2}{n_1 n_2}}$$

Por fim, simplificando a expressão anterior, obtemos a equação 24.

$$T = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (24)$$

2.6 USO DE SMARTPHONES PARA ESPECTROSCOPIA ÓPTICA

O uso de Smartphones como instrumentos para avaliar sistemas orgânicos ou inorgânicos através de espectroscopia óptica vêm ganhando destaque ao longo dos últimos anos, proporcionando avaliações rápidas, econômicas e precisas (SOUZA, 2018). Os avanços tecnológicos das últimas décadas, possibilitaram

maiores recursos e poder de processamento aos telefones móveis e, conseqüentemente, maior número de aplicações no mercado. Atualmente, um número crescente de aparelhos eletrônicos, como Smartphones, tem pelo menos um sensor de câmera integrado com alta resolução, geralmente acima 3 Mpixels, com autofoco e zoom digital, processador de alto desempenho e com baixo consumo de energia e sistemas operacionais sofisticados, normalmente oferecendo suporte na plataforma JAVA e com opções para instalação e execução de aplicativos desenvolvidos (SOUZA, 2018).

Com o desenvolvimento de sensores mais sofisticados, câmeras digitais tornaram-se ainda mais dominantes e o uso de câmeras como dispositivo de medição tornou-se mais acentuada. Nos últimos anos, instituições de pesquisa e empresas comerciais desenvolveram aplicativos de detecção para Smartphones que vão desde assistência pessoal a cuidados de saúde e diagnóstico médico. Entre todas as técnicas de detecção, a detecção óptica tem diversas vantagens. Isso ocorre porque as propriedades ópticas de estruturas orgânicas e inorgânicas contêm uma grande quantidade de informações, que podem ser usadas para muitas finalidades em áreas como ciências de materiais, biofotônica e ciências da vida.

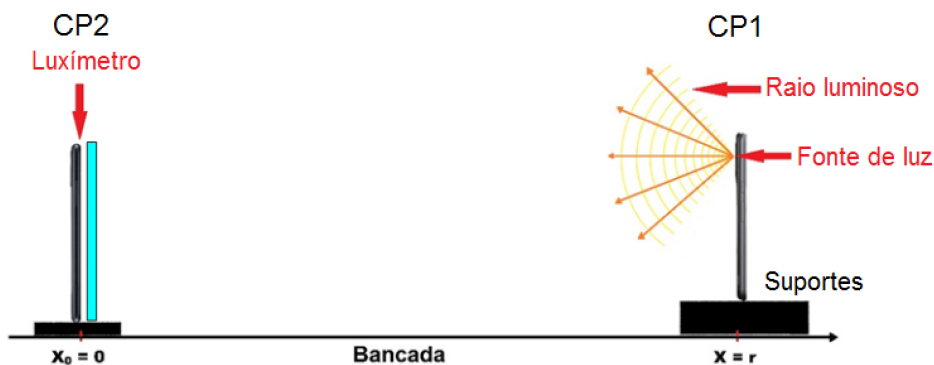
Em particular, a partir da técnica de espectroscopia óptica por transmissão, é possível obter informações a respeito da absorção e da transmissão da radiação em meios ópticos. Neste caso, pode-se medir a intensidade da radiação imediatamente antes e após interação com o material. A absorção de um material é definida como a fração da potência absorvida por unidade de comprimento e a transmissão da luz é determinada como a parte da radiação que não foi absorvida. É uma técnica de rotina para a análise de materiais sólidos e de substância em laboratórios de pesquisas e ensino. Contudo, os equipamentos usados para estes fins, como espectrômetros, são caros o que limita o uso desses equipamentos a grandes centros. Dessa forma, o desenvolvimento de novas metodologias e dispositivos de baixo custo para espectroscopia óptica explorando Smartphones, podem contribuir para o crescimento de aplicações ópticas em regiões menos favorecidas economicamente e distante dos grandes centros tecnológicos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. SISTEMA OPERACIONAL:

Para o experimento, foram utilizados dois smartphones distintos (CP1: Motorola Moto G 4 Play [FICHA TÉCNICA, G4]; CP2: Samsung Galaxy A015M/DS [FICHA TÉCNICA, A01]), posicionados paralelamente sobre a superfície de uma bancada, separados por uma distância r , como representa a Figura 5.

Figura 5 - Representação do aparato experimental

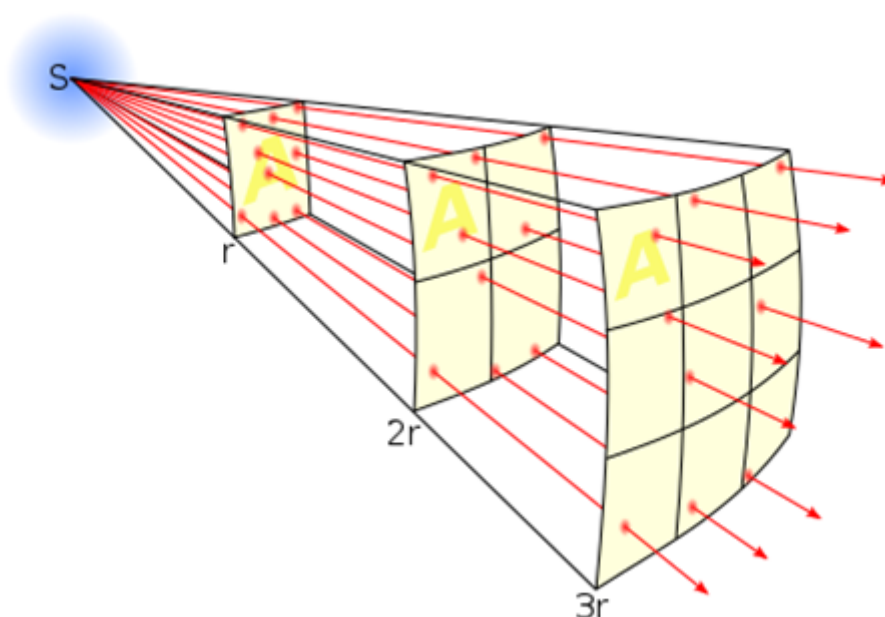


Fonte: do próprio autor

Os dois aparelhos possuem um sistema operacional Android. O CP1, com uma câmera de 8 MP, apresenta uma tela de 5", com uma resolução de 1280x720 pixels, e a resolução de imagem de 3266x2449 pixels, 16GB de armazenamento interno e conta com o processador quad core Qualcomm Snapdragon 410, de 1.2GHz, e memória RAM de 2GB. Já o CP2 conta com uma tela de 5,7" com uma resolução de 1520 x 720 pixels, câmera de 13 MP, capturando imagens com uma resolução de até 4128x3096 pixels, 32 GB de armazenamento interno, e seu processador de 2GHz Octa-Core. Como o CP2 apresenta um melhor processador e, conseqüentemente, um melhor desempenho, ele foi utilizado para realizar a coleta dos dados usando o app PhyPhox (PHYPHOX, 2019). A lanterna do dispositivo CP1 foi usada como fonte de iluminação (LED/luz branca).

Consideramos a lanterna do aparelho CP2 como uma fonte de luz pontual e homogênea, emitindo luz igualmente em todas as direções, assim, tendo a sua intensidade inversamente proporcional à r^2 , ou seja, $I \propto r^2$ (VIEIRA, 2014). Esta proporcionalidade vem da relação geométrica entre o fluxo luminoso e a superfície de área por onde ele passa, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Variação da intensidade luminosa em função da distância (Lei do inverso do quadrado da distância).



Fonte: Borb, 2008.

Analogamente, o fluxo luminoso sai da fonte pontual (CP1), se propagando no ar até incidir perpendicularmente com o sensor de luminosidade do CP2, localizado a uma distância r do CP1. Esse sensor de luminosidade coleta os dados da fonte luminosa com o auxílio do aplicativo PhyPhox, disponível na loja de app para smartphones (Play Store).

Inicialmente foram realizadas 12 marcações na superfície da bancada, separadas por 15 centímetros, onde seriam os pontos de referência para a coleta de dados. Essa distância, como também o número de marcações, foi optada para conseguir visualizar melhor a variação da intensidade luminosa detectada pelo sensor. Para distâncias maiores do que 165 cm a variação na intensidade luminosa

detectada no sensor era praticamente imperceptível, por isso este valor foi escolhido como sendo o limite máximo de separação entre os dispositivos CP1 e CP2.

Esses dados foram obtidos deixando o dispositivo CP2 coletar valores de intensidade luminosa durante 20 s na posição inicial. Após esse intervalo de tempo, a fonte de luz era bloqueada com um anteparo e o dispositivo CP2 deslocado para próxima posição. Em seguida, o anteparo era retirado e a intensidade luminosa era coletada durante mais 20 s. Esse processo foi realizado até que todas as distâncias fossem percorridas e para cada posição foi determinado um valor médio de intensidade luminosa.

O próximo passo foi obter o valor da intensidade luminosa para cada posição inserindo os materiais para análise espectroscópica entre os Smartphones e verificar se o sensor do dispositivo CP2 teria resolução para distinguir a diferença entre os valores de intensidade luminosa em cada meio (ar/acrílico). Neste caso, medimos o valor da intensidade luminosa sem a presença dos materiais e com os materiais posicionados entre os dispositivos. Os valores de intensidade luminosa foram obtidos usando o aplicativo Phyphox e em seguida os dados foram salvos no formato .xlsx e exportados para o Software Origin Lab para análise e processamento de dados

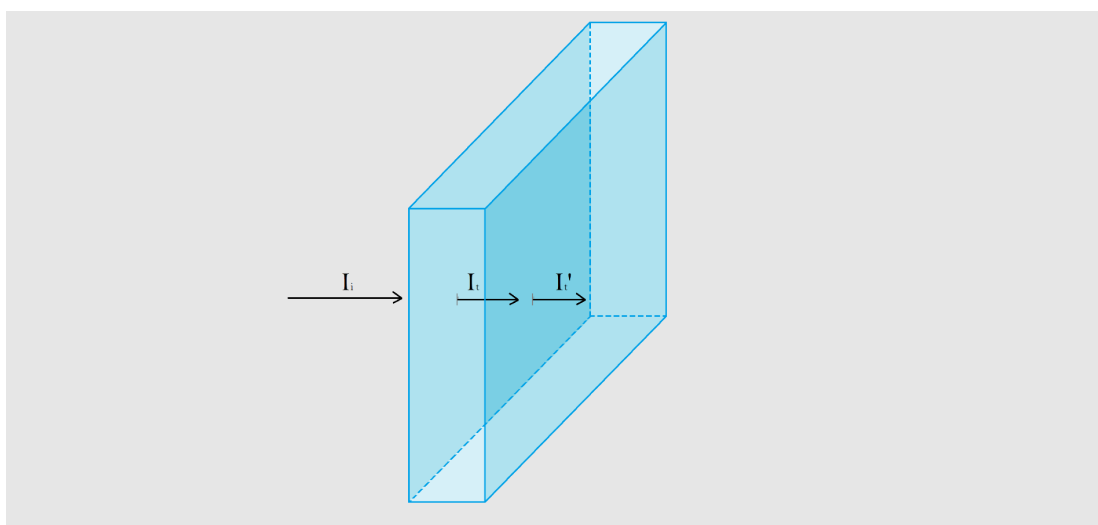
3.2. MEDIDAS ESPECTROSCÓPICAS

Para análise espectroscópica foram avaliadas 04 placas de acrílico de dimensões 5 x 5 cm e espessuras de 2 mm, 3mm, 5 mm e 10 mm. As placas foram colocadas em um suporte e posicionadas imediatamente à frente do sensor do dispositivo CP2 para cada posição analisada. Neste caso, à medida que era feita a varredura da posição entre os Smartphones, mediamos a intensidade luminosa que incidia sobre o sensor antes (fluxo luminoso se propagando no ar) e após inserir o suporte com os materiais. A transmissão do material foi determinada usando a equação 24. Neste caso T corresponde a transmissão do material, I_0 a intensidade luminosa detectada pelo sensor antes de inserir o acrílico e I a intensidade luminosa detectada pelo sensor após posicionar o acrílico entre os Smartphones.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (25)$$

Em nossas análises consideramos que a luz incide normal as interfaces ar/acrílico e acrílico/ar, sendo n_1 o índice de refração do ar ($n_1 \approx 1,00$) e n_2 o índice de refração do material em análise, representado na Figura 7.

Figura 7 - Representação da transmissão da luz no acrílico



Fonte: Do próprio autor.

Dessa forma, sabendo a transmissão do acrílico obtida pela equação 25 e considerando que as perdas por absorção são mínimas, é possível determinar o índice de refração para este material a partir da equação 24, uma vez que o processo de transmissão ocorre duas vezes (Do ar para o acrílico e do acrílico para o ar).

$$T = T_1 \cdot T_2$$

$$T = \left(\frac{4 \cdot n_1 \cdot n_2}{(n_1 + n_2)^2} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot n_2 \cdot n_1}{(n_2 + n_1)^2} \right)$$

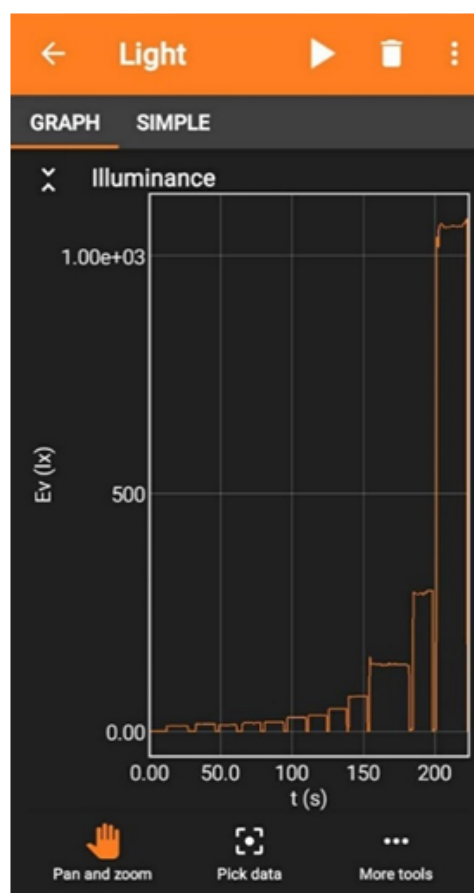
Sabendo que a ordem não irá alterar o valor final da transmissão, podemos escrever o valor percentual da transmissão a partir da equação 26.

$$T = \left[\frac{4.n_1.n_2}{(n_1+n_2)^2} \right]^2 \quad (26)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 8 mostra o gráfico da *intensidade luminosa x tempo de exposição do sensor*, obtida usando o aplicativo Phyphox.

Figura 8 - Interface do aplicativo Phyphox. Intensidade luminosa em função do tempo de exposição do sensor.

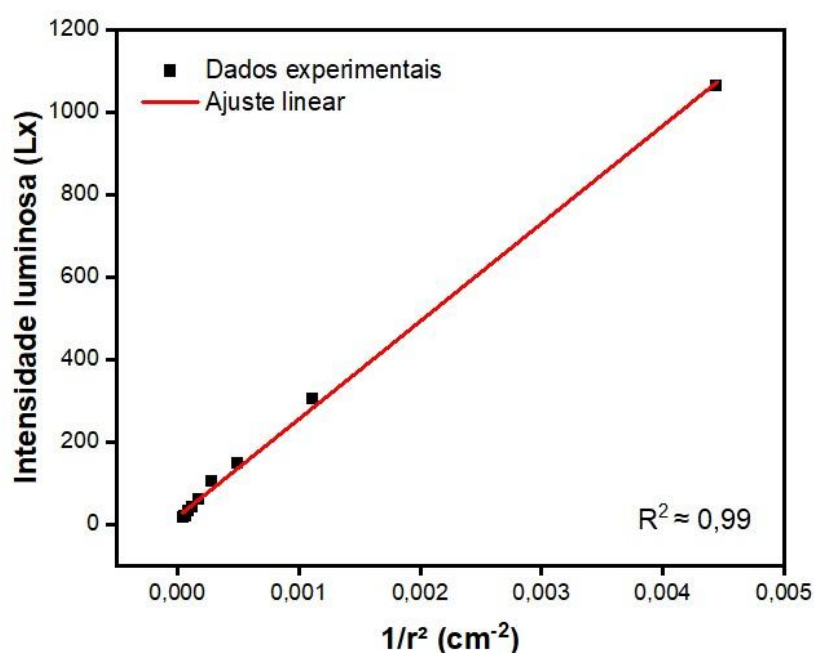


Fonte: do próprio autor.

A partir da análise gráfica percebe-se que o sensor tem resolução para detectar a intensidade luminosa para as diferentes posições e que para cada intervalo tempo, correspondente a posição x , há valores de pico bem definidos. Foi observado também o decaimento da intensidade luminosa em função da distância

entre a fonte e o sensor. O gráfico 1 mostra a intensidade luminosa (Lux) em função de $1/r^2$ (em unidade de cm^2). Observa-se uma boa relação linear entre a intensidade luminosa e o inverso do quadrado da distância. Isto significa que as distâncias utilizadas no experimento são grandes em comparação com o tamanho da fonte, logo, podemos considerar esse tipo de fonte luminosa como pontual e esférica (VIEIRA, 2014).

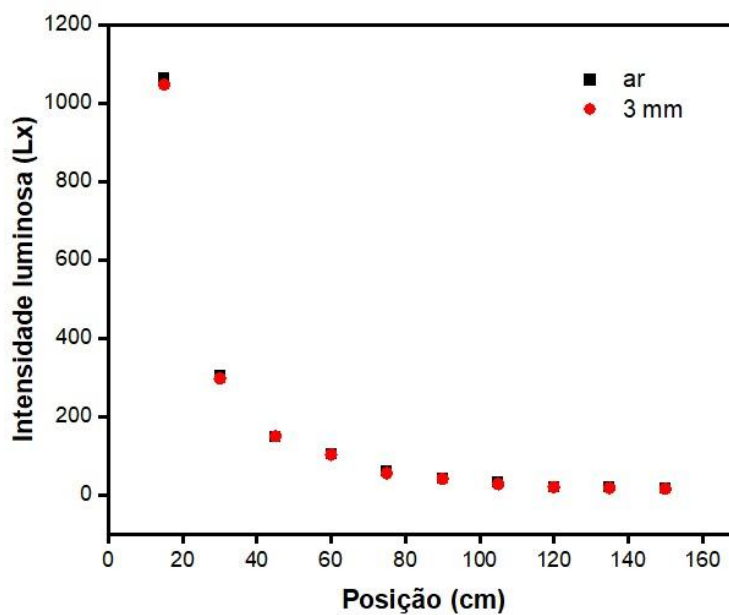
Gráfico 1 - Intensidade luminosa em função do inverso do quadrado da distância entre a fonte luminosa e o sensor.



Fonte: Do próprio autor.

O gráfico 2 mostra a intensidade luminosa em função da distância para o fluxo de luz se propagando em cada meio (considerando um acrílico de 3 mm).

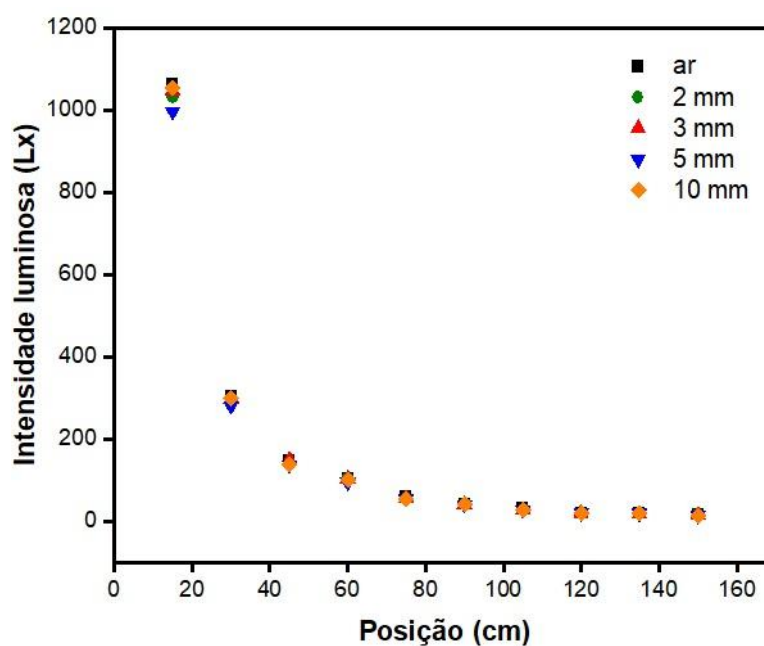
Gráfico 2 - Intensidade luminosa detectada pelo sensor para diferentes posições entre os dispositivos CP1 e CP2 (Acrílico de 3 mm).



Fonte: Do próprio autor.

Resultados semelhantes foram obtidos para os demais acrílicos (espessuras de 2 mm, 5 mm e 10 mm), como apresentados nos gráficos 3.

Gráfico 3 - Intensidade luminosa detectada pelo sensor para diferentes posições entre os dispositivos CP1 e CP2 (Acrílico de 2 mm, 5 mm e 10 mm).

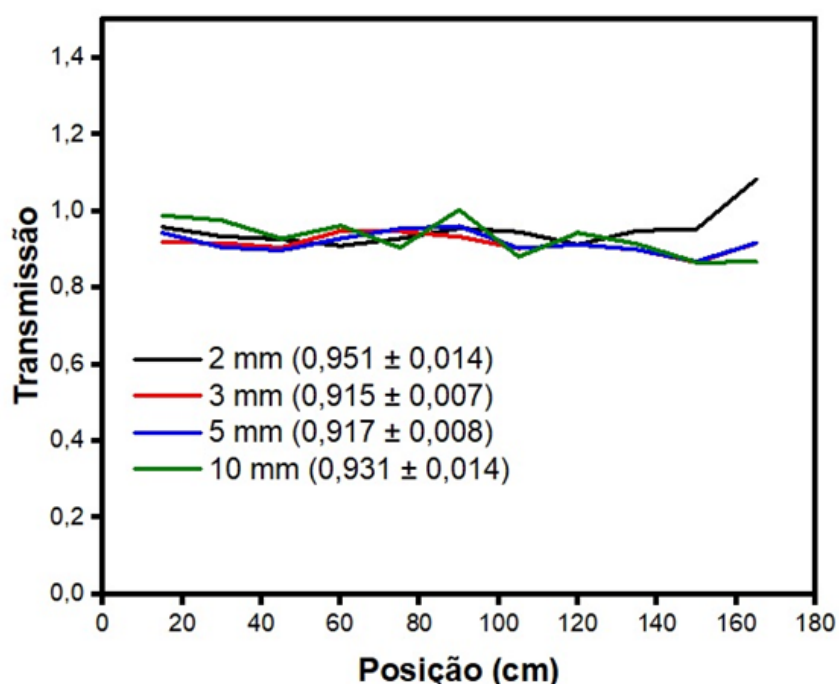


Fonte: Do próprio autor.

A partir da análise dos dados obtidos verificou-se que a menor diferença ($\Delta I = |I - I_0|$) entre as intensidades luminosas medidas nas duas situações foi de 1,00 Lux. Este resultado mostra que o sensor tem resolução suficiente para distinguir a intensidade luminosa entre os valores obtidos para luz se propagando em cada meio. Dessa forma, conhecendo os valores das intensidades luminosas em cada posição, foi possível determinar a transmissão para o acrílico usando a equação 25.

A gráfico 4 mostra a transmissão em função da distância para os acrílicos de diferentes espessuras. Considerando uma fonte luminosa na região do visível, verifica-se que o valor da transmissão para cada acrílico é praticamente constante com pequenas flutuações em torno do valor médio.

Gráfico 4 - Transmissão do acrílico para diferentes posições obtido a partir da atividade experimental proposta.



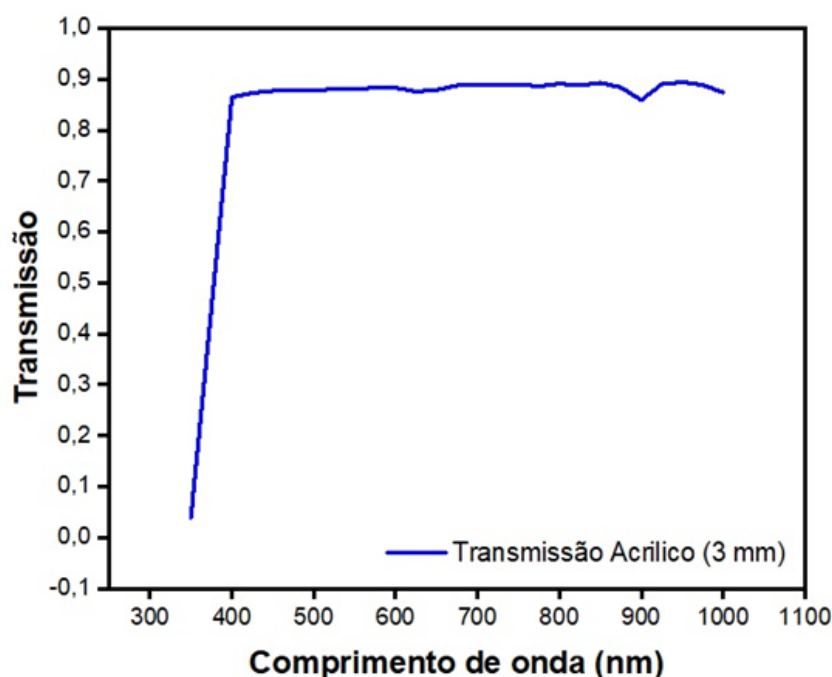
Fonte: Do próprio autor.

A divergência dos dados, presente no acrílico de 2 mm, apresentada no gráfico 5, ocorre devido a falta de sensibilidade que o sensor apresenta para distâncias relativamente altas, apresentando um valor de transmitância acima de

100% e/ou a erros experimentais associados a quantificação dessa grandeza.

O valor médio para transmissão do acrílico, considerando as 04 espessuras analisadas, foi de aproximadamente $T \approx 93\%$. Este valor está bem próximo dos valores relatados na literatura para o acrílico (SANATRON, 2016), apresentando uma variação percentual de aproximadamente 1,00 %. Para comparar a precisão dos resultados obtidos usando os smartphones com dispositivos comerciais, utilizamos um espectrômetro UV-Visível (Kasuaki, UV-Vis 1200) para obter a transmissão das placas de acrílico utilizadas. O gráfico 5 mostra o gráfico da transmissão em função do comprimento de onda para o acrílico de 3 mm.

Figura 5: Transmissão para o acrílico em função do comprimento de onda obtido usando um espectrômetro comercial.



Fonte: Do próprio autor.

A partir do gráfico da figura 12 observa-se que a transmissão obtida usando o espectrômetro apresenta um valor médio próximo de $T \approx 90\%$. Logo, a variação percentual entre os dois resultados (Smartphones e espectrômetro) foi aproximadamente de 3,33 %. Estes resultados mostram que há uma boa precisão dos valores de transmissão obtidos usando os Smartphones quando comparados com os valores teóricos e fornecidos por espectrômetros comerciais. Usando a

equação 4 e conhecendo o valor para transmissão dos acrílicos, foi possível determinar o índice de refração para as diferentes espessuras analisadas. Os resultados podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1: Transmissão e índice de refração para as diferentes placas de acrílico.

Espessura (mm)	Transmissão (%)	Índice de refração
2	95,1	1,374
3	91,6	1,523
5	91,8	1,515
10	93,1	1,461
Valor médio	92,9	1,468

Fonte: Do próprio autor.

Observa-se que os valores determinados para o índice de refração estão bem próximo do valor teórico descrito na literatura para o acrílico que é de 1,49 (SANTANA, 2008; HALLIDAY, 1996), com exceção para o acrílico com espessura de 2 mm que apresentou uma variação percentual próximo de 8,0% em relação ao valor de referência. Entretanto, considerando a média aritmética para o índice de refração do acrílico, a variação percentual é de aproximadamente 1,50%. Vale ressaltar que esses resultados foram obtidos utilizando um sistema simples e de baixo custo, sem nenhum tipo de automatização para controlar o deslocamento e alinhamento dos dispositivos e sem fontes de luz monocromáticas (como canetas lasers), o que poderia limitar a aplicação da atividade prática. Logo, a proposta apresentada neste trabalho, pode ser desenvolvida em atividades de ensino de física que visam contemplar tanto alunos dos anos iniciais da graduação quanto alunos do ensino médio, possibilitando quantificar parâmetros ópticos de materiais como o acrílico de maneira simples, prática e precisa.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos por meio desta proposta experimental de baixo custo, foi possível determinar, com valores satisfatórios, a transmitância e o índice de refração do acrílico, de forma prática, dinâmica e precisa, denotando a potencialidade da metodologia adotada neste trabalho, bem como a sua aplicação, no Ensino de Física, para trabalhar conceitos da óptica básica e da espectroscopia por transmissão, por exemplo.

REFERÊNCIAS

BARTHEM, R. A Luz. 1ª ed - São Paulo: Editora Livraria da Física: **Sociedade Brasileira de Física**, 2005.

BORB. **Inverse square law**. 2008. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3816716>>. Acesso em: 20 de março de 2022.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. RC. **Espectroscopia com novas tecnologias**: O Tracker como ferramenta. Revista de Design, Tecnologia e Sociedade, v. 2, n. 3, p. 121-130, 2018.

FERRETTI, M.; TIRELLO, R. A. **Princípios e aplicações de espectroscopia de fluorescência de Raios X (FRX) com instrumentação portátil para estudo de bens culturais**. Revista CPC, (7), 74-98. 2009.

FICHA TÉCNICA. **Motorola Moto G4 Play**. Disponível em: <<https://www.tudocelular.com/Motorola/fichas-tecnicas/n3207/Motorola-Moto-G4-Play.html>>. Acesso em: 09 de setembro de 2022.

FICHA TÉCNICA. **Samsung Galaxy A015M/DS**. Disponível em: <<https://www.tudocelular.com/Samsung/fichas-tecnicas/n6011/Samsung-Galaxy-A015M-DS.html>>. Acesso em: 09 de setembro de 2022.

FREIRE, C. S. **Biossensor baseado em smartphone utilizando ressonância de plásmos de superfície aplicado à detecção do herbicida glifosato**. 2019. Dissertação de Mestrado. Engenharia Elétrica - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. João Pessoa - PA, 120p. 2019.

GARCÍA, S. J. **Telescópio Espacial James Webb**. Disponível em <<https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/13840>> Acesso em: 29 de setembro de 2022.

GRIFFITHS, D.J. **Introduction to Electrodynamics**. 3º ed. New Jersey: Prentice-hall Inc., 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 4° ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1996.

HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK R. **Fundamentos de Física**. 8. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MENDES, J. FM. **Sobre a relação entre a energia da luz e sua frequência**. Sitientibus Série Ciências Físicas, v. 12, p. 1-4, 2016.

MOTT, J.R.; MUNSON, P.J.; KREUTER, R.A.; CHOCHAN, B.S.; SYKES, D.G. J. **Chem. Educ.** 91, 1028. 2014.

NEWTON, Isaac. **Óptica**. Edusp, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade, Física Quântica** v. 4 - 1ª edição. São Paulo. 1998.

Phyphox. **Phyphox: physical phone experiments**. 2019. Disponível em: <<https://phyphox.org/>>. Acesso em: 20 de março de 2022.

ROCHA, M. N. **O azul do céu e o vermelho do pôr-do-sol**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 32, p. 1-3, 2010.

SALDANHA, P. L. **Interação da luz com meios contínuos: abordagens clássica e quântica**. 2010.

SALVETTI, A. R. **A HISTÓRIA DA LUZ**. 2ª ed. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2008.

SANATRON. **Optical Transmission Properties of Acrylic**. 2016. Disponível em: <<https://www.sanatron.com/blog/optical-transmission-properties-of-acrylic.php>>. Acesso em: 18 de setembro de 2022.

SANTANA, B. A.; Cruz, F.A.O. **Determinação do índice de refração de uma placa**

de acrílico. A Física na Escola, v. 9, p. 40-43, 2008.

SOUZA, J. S.; FERRÃO, M. F. **Aplicações da espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de medicamentos contendo diclofenaco de potássio. Parte I:** dosagem por regressão multivariada. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences vol. 42, n. 3, jul./set., 2006.

SOUZA, W. S. **Desenvolvimento e aplicações de sistemas espectroscópicos de imagem explorando telefones móveis e radiação terahertz.** Repositório UFPE 2018.

VIEIRA, L. P.; LARA, V. O. M.; AMARAL, D. F. **Demonstração da lei do inverso do quadrado com o auxílio de um tablet/smartphone.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, 2014.