### Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Caio Gregoracci, Lucas Nunes, e Pedro Gasques.



Prática 1: Reflexão e Refração da Luz em Superfícies Planas



São Carlos

Caio Gregoracci<sup>1</sup>, Lucas Nunes<sup>2</sup>, e Pedro Gasques<sup>3</sup>.

Email: cgregoracci@usp.br<sup>1</sup>, lucasnunesalmeidaf@usp.br<sup>2</sup>, e pedrofgasques@usp.br<sup>3</sup>.

N.USP: 12734168<sup>1</sup>, 15472033<sup>2</sup>, e 14804110<sup>3</sup>.

# 7600026 - Laboratório de Óptica - 2025201

Prática 1: Reflexão e Refração da Luz em Superfícies Planas

Este trabalho consiste em um relatório de atividade prática experimental da disciplina de Laboratório de Óptica, no curso de graduação em Física, com o objetivo de analisar e discutir os resultados obtidos nas experiências realizadas, promovendo a aplicação dos conceitos teóricos abordados em aula.

Responsável: Prof. Dr. Euclydes Marega Junior

#### Resumo

Nesta presente prática, seguindo-se a metodologia de Tiago Barbim Batalhão and Eduardo Ribeiro de Azevedo (2013), realizou-se um estudo dos princípios da reflexão e refração sob 3 situações distintas; a incidência de um feixe de laser sobre um bloco retangular de acrílico, o cálculo do índice de refração de um prisma e o cálculo do índice de refração de um semi-círculo de acrílico a partir do ângulo crítico. No primeiro caso, os dados obtidos estão dispostos na tabela 1, onde nota-se dados experimentais e teóricos para D equivalentes, também obteve-se um valor conciso para o índice de refração, igual á  $n_{mB} = 1.51 \pm 0.02$  e valores de de  $\alpha_i$  e  $\alpha_r$  dentro do previsto, vide o gráfico 5. Quanto ao índice de refração do prisma, obteve-se que  $n_p \approx 1.59 \pm 0.03$ , a partir de um ângulo de desvio mínimo igual à  $\theta_m = 50.5 \pm 0.5^\circ$ , e o esquema representado na imagem 6, de modo a concluir-se que se trata de um prisma de policarbonato. Por fim, os dados obtidos referentes ao semi-círculo estão dispostos em 2; a partir destes, obteve-se os valores do índice de refração de três formas, 2 indiretas e uma direta; todos dispostos na tabela 3. Para o angulo crítico, os valores obtidos através da previsão teórica e medição experimental são, respectivamente  $\theta_{Cind} \approx 44,37 \pm 1.57^\circ$  e  $\theta_c = 42 \pm 1^\circ$ .

## LISTA DE FIGURAS

1	Demonstração Princípio de Huygens	6
2	Representação do bloco de vidro com a ordem de fixação dos alfinetes	8
3	Esquematização do feixe de luz no prisma e os pontos que foram colocados os	
	alfinetes	9
4	Esquematização do semicírculo de acrílico em diferentes ângulos com o feixe	
	observando a reflexão interna total	10
5	Gráfico dos ângulos dos feixes incidentes e refletidos em relação à normal	12
6	Esquematização do feixe de luz incidindo no prisma de vidro considerando os	
	desvios encontrados.	13
7	Gráfico de $sen\theta_{ext}$ em função de $sen\theta_{int}$	15

## LISTA DE TABELAS

1	Dados medidos da reflexão e refração dos blocos de vidro	11
2	Dados medidos da refração indireta e direta	14
3	Índices de refração obtidos	16

# **SUMÁRIO**

1	INT	RODUÇAO	5
2	FUN	NDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3	ME'	TODOLOGIA	8
	3.1	Reflexão e refração em um bloco de vidro	8
	3.2	Ângulo de desvio mínimo em um prisma	9
	3.3	Reflexão interna total em um bloco semicircular	10
4	RES	SULTADOS E DISCUSSÃO	10
	4.1	Reflexão e refração em um bloco de vidro	10
	4.2	Ângulo de desvio mínimo em um prisma	13
	4.3	Reflexão interna total em um bloco semicircular	14
5	CO	NCLUSÃO	16
RI	EFER	RÊNCIAS	17

## 1 INTRODUÇÃO

Neste presente relatório, estudou-se os princípios de reflexão e refração através da lei de refração e os princípios dos ângulos mínimos e criticos. Para tanto, realizou-se três experimentos com um laser e peças de vidro e acrílico.

No primeiro experimento, utilizou-se de um bloco retangular de vidro, o qual permitiu analisar-se facilmente os efeitos da reflexão e refração parcial. No segundo momento, com o uso de um prisma, analisou-se as grandezas de índice de refração e difração através do ângulo de desvio mínimo. Por fim, utilizando-se de um semi-círculo, e pelo princípio da refração, estudou-se novamente os valores do índice de refração, comparando-os com o valor obtido através da análise do ângulo critico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Quando feixes luminosos entram em contato com um meio material diferente, eles tendem a serem refletidos e refratados seguindo alguns padrões, sendo estes estudados e catalogados por cientistas para uma melhor análise dos efeitos luminosos.

O primeiro desses padrões é de que o raio refletido e o raio refratado sempre estão em um mesmo plano, denominado plano de incidência. Tal elemento pode ser determinado a partir do raio incidente e da reta normal do sistema, obtida a partir da intersecção perpendicular com o meio no ponto de encontro entre ele e o feixe de luz. Outro padrão importante é o de que o ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão.

Para uma melhor compreensão dos fenômenos luminosos, o cientista Christiaan Huygens elaborou um princípio ondulatório que dizia que uma frente onda atua como uma fonte secundária, emitindo uma nova onda de mesma velocidade e frequência.

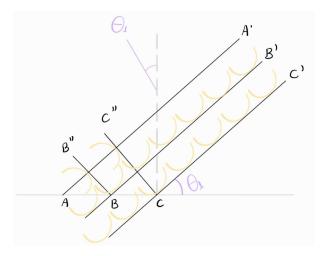


Figura 1: Demonstração Princípio de Huygens. Fonte: Elaborada pelos compiladores.

Para uma melhor compreensão desse princípio, será tomado como referência a figura 1. os seguimentos AA', B'BB"e C'CC"representam frentes de onda que incidem com um ângulo  $\theta_1$  em relação a normal, já as partições em laranja (entre as frentes de onda) representam as chamadas ondas elementares, geradas por cada ponto da frente de onda considerada. A partir de uma análise mais minuciosa da situação referida, sendo ela realizada em Nussenzveig (2021), foi descoberta uma relação que associava os índices de refração dos meios com os seus ângulos de incidência e de refração. Tal relação também foi encontrada experimentalmente pelo matemático Villebrord Snell e o filósofo René Descartes, que propuseram uma lei que ficou conhecida como lei de Snell-Descartes, ou simplesmente lei de Snell, e é dada por:

$$n_1 sin(\alpha) = n_2 sin(\beta) \tag{1}$$

Em que  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração dos meios estudados,  $\alpha$  é o ângulo de incidência e  $\beta$  é o ângulo de refração. Uma outra forma de abordar essa situação é a partir do Princípio de Fermat, que também é abordado com mais detalhes em Nussenzveig (2021). Há também um distância entre o raio incidente e o raio emergente, denominada deslocamento lateral, dado por:

$$D = dsen(\alpha) \left( 1 - \frac{tan(\beta)}{tan(\alpha)} \right)$$
 (2)

Em que d é a espessura do meio considerado. Caso um feixe de luz incida em um meio não

absorvedor, a sua intensidade pode ser calculada por meio dos índices de refração dos meios a partir da relação:

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2 \tag{3}$$

Uma situação importante de refração que deve ser citada é em casos que são utilizados prismas. Com esses objetos, o feixe luminoso sofre duas refrações antes de voltar para o meio externo. O ângulo entre o raio incidente e o raio emergente é dado por:

$$\delta = (\theta_1 - \theta_2) + (\theta_4 - \theta_3) \tag{4}$$

Em que  $\delta$  é o ângulo entre o raio incidente e o raio emergente. Já  $(\theta_1, \theta_2)$  e  $(\theta_4, \theta_3)$  são os pares de ângulos de incidência e de refração nas diferentes faces do prisma (sendo  $\theta_1$  e  $\theta_3$  os ângulos de incidência).

Ao movimentar o prisma, há uma certa posição em que o ângulo  $\delta$  possui o seu menor valor, sendo esse valor conhecido como ângulo de desvio mínimo. Nesta situação, o feixe luminoso incide paralelamente a uma das faces e isso resulta em:

$$\theta_1 = \theta_4 \tag{5}$$

Essa igualdade se deve ao fato de que para este ângulo, a derivada de  $\delta$  é zero, o que tem como consequência a própria equação (5) e também a condição onde o ângulo que se forma no encontro do prolongamento das retas normais sobre as quais os feixes são incididos ( $\hat{y}$ ) é tal que:

$$\theta_2 = \frac{\hat{y}}{2} \tag{6}$$

De modo que (1) (onde  $n_2$  é o índice de refração do prisma), nesta situação pode ser descrita como:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \frac{\hat{y}}{2}} \tag{7}$$

Retornando para uma outra análise da Lei de Snell, há uma situação que ocorre quando o feixe luminosa transcorre de um meio mais refratário para um menos refratário. Quando isso

ocorre, o raio de luz apresenta o fenômeno de reflexão interna total, que passa a acontecer a partir de um ângulo crítico, calculado a partir de:

$$sin(\theta_c) = \frac{n_r}{n_i} \tag{8}$$

Em que  $\theta_c$  é o ângulo crítico,  $n_r$  e  $n_i$  são os índices de refração menor e maior, respectivamente.

#### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Reflexão e refração em um bloco de vidro

Nesta frente do experimento, visou-se verificar as previsões de reflexão e refração segundo a lei de Snell. Para tanto, utilizou-se de um bloco retangular de vidro *BK7*, folhas de papel, alfinetes e um lazer juntamente de uma plataforma móvel. A partir destes equipamentos, tomou-se as dimensões do bloco e este foi posicionado perpendicularmente ao eixo de propagação do laser de modo a gerar diferentes ângulos de incidência dos raios ao rotacionar a plataforma móvel. Os cinco ângulos gerados variavam entre 33° e 55°.

A fim de se anotar a geometria do sistema corretamente, fixou-se o bloco com os alfinetes e posicionou-se outros alfinetes nos seguintes pontos; o local em que o feixe incide no bloco ([5]); pontos que indicam o caminho que o feixe incidente e refletido percorrem (respectivamente [6] e [4]); dois pontos para determinar o percurso do feixe após atravessar o bloco ([3] e [2]) e por fim, um alfinete demarcando o caminho do feixe caso este não sofresse alteração.

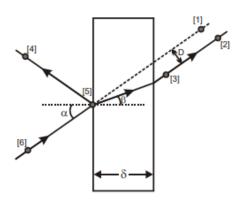


Figura 2: Representação do bloco de vidro com a ordem de fixação dos alfinetes Fonte: Tiago Barbim Batalhão and Eduardo Ribeiro de Azevedo (2013).

Feito as medições, organizou-se os dados de ângulo incidente  $(\alpha_i)$ , refletido  $(\alpha_r)$  e refratado $(\beta)$ , a distância entre o feixe após percorrer o bloco e o feixe sem sofrer alterações da refração (tanto o valor medido (D) quanto o previsto equacionalmente $(D_{eq})$ ) e o índice de refração do bloco  $(n_{eqB})$  em uma tabela. A partir desta tabela, visou-se confirmar as previsão das leis de Snell segundo a equação 2. Quanto a relação dos valores de  $\alpha_i$  e  $\alpha_r$  em relação a normal, verificou-se a igualdade entre estes por meio de um gráfico de  $\alpha_i$  versus  $\alpha_r$ , calculando e estimando razões de eventuais erros.

### 3.2 Ângulo de desvio mínimo em um prisma

Neste segundo momento, visando calcular-se o índice de refração de um prisma, utilizou-se da mesma montagem da situação anterior com um prisma no lugar do bloco. Com esta situação, rotacionou-se a superfície móvel até alcançar-se um angulo em que o feixe refratado cessava seu movimento ( $\theta_i$ ) e outro em que iniciou-se um movimento na direção oposta a da rotação da superfície ( $\theta_f$ ), a partir da média destes, obteve-se uma aproximação do ângulo de desvio mínimo.

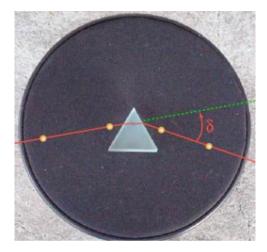


Figura 3: Esquematização do feixe de luz no prisma e os pontos que foram colocados os alfinetes Fonte: Tiago Barbim Batalhão and Eduardo Ribeiro de Azevedo (2013).

Nesta situação, utilizou-se de alfinetes e uma folha de papel para demarcar-se os feixes incidentes e dissidentes de modo a facilitar a detecção dos ângulos e a partir destes dados, utilizando-se da equação (7), determinou-se o índice de refração do prisma e utilizando-se deste valor, buscou-se na literatura científica qual seria o provável material que compõe o prisma.

#### 3.3 Reflexão interna total em um bloco semicircular

Por fim, visou-se realizar-se um estudo sobre ângulos críticos ( $\theta_c$ ), para tanto, utilizou-se novamente da montagem anterior, uma folha de papel sob uma superfície móvel para rotação fixada por meio de alfinetes que também foram usados para identificar o caminho dos feixes de luz.

A peça colocada sob a superfície trata-se de um bloco de acrílico semicircular, sob o qual o lazer inicialmente incide perpendicularmente a face plana, em seguida, rotacionou-se a superfície até que o feixe incidisse sobre a face circular em em dois ângulos quaisquer, os quais foram registrados a fim de calcular o índice de refração através da lei da refração; finalmente, rotaciona-se a superfície até que o feixe refratado saísse com um ângulo de 90° em relação a normal. Os ângulos referentes a estes dois momentos foram registrados e dispostos em uma tabela de modo que a partir disto se compara-se o valor calculado do índice de refração (*n*) a partir da relação da lei de Snell e a relação expressa pela equação (8).

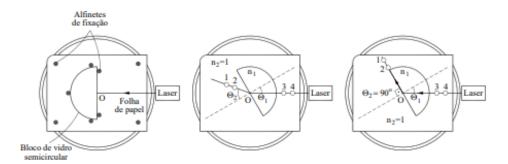


Figura 4: Esquematização do semicírculo de acrílico em diferentes ângulos com o feixe observando a reflexão interna total.

Fonte: Tiago Barbim Batalhão and Eduardo Ribeiro de Azevedo (2013).

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Reflexão e refração em um bloco de vidro

Seguindo a metodologia descrita na seção 3.1, após as medições, e aplicando as equações (1) e 2, com  $\delta = 3.0 \pm 0.1$  cm, obteve-se os seguintes valores, sendo;

Tabela 1: Dados medidos da reflexão e refração dos blocos de vidro.

$\alpha_i \pm 1^\circ$	$\alpha_r \pm 1^\circ$	$eta\pm1^\circ$	$n_{eqB}$	$D \pm 0,1 \text{ (cm)}$	$D_{eq} \pm 0.08 \text{ (cm)}$
35	35	22	$1,53 \pm 0,08$	0,6	0,72
40	40	25	$1,52 \pm 0,06$	0,8	0,86
45	46	29	$1,46 \pm 0,05$	1,0	0,94
50	50	30	$1,53 \pm 0,05$	1,1	1,18
55	54	33	$1,50 \pm 0,04$	1,2	1,34

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tomando então os valores do índice de refração obtidos  $(n_{eqB})$  e calculando a incerteza a partir do desvio padrão, obtêm-se um valor médio para o índice de refração do bloco igual à:

$$n_{mB} = 1,51 \pm 0,02 \tag{9}$$

Sendo este resulta dentro do esperado, considerando que o meio em questão se tratava de um bloco de vidro *Bk7* o qual possuí um índice de refração tabelado de aproximadamente 1,516. A pequena diferença está dentro do esperado, uma vez que o lazer utilizado possui um feixe com uma pequena largura que pode afetar as medições causando pequenos desvios.

Não obstante a isto, quanto aos dados obtidos para distancia entre as trajetórias do feixe de luz dissidente e de seu caminho caso não sofresse qualquer interferência, ao comparar os valores experimentais com aqueles obtidos pela previsão teórica, vemos pela tabela 1, que todos são equivalentes uma vez que sua diferença é prevista pela incerteza destes próprios valores.

Paralelamente, plotando os ângulos dos feixes incidentes e refletidos em relação à normal, obtêm-se o seguinte gráfico;

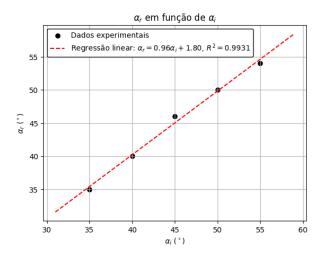


Figura 5: Gráfico dos ângulos dos feixes incidentes e refletidos em relação à normal. Fonte: Elaborado pelos autores

Analisando a equação da reta dada através da regressão linear, esta se dá como;

$$\alpha_r = 0.96\alpha_i + 1.80\tag{10}$$

O que acaba por se afastar do esperado em que  $\alpha_r = \alpha_i$ , entretanto, esta diferença pode ser explicada devido a largura do feixe e a precisão do esquadro, uma vez que ambos tornam a aferição da angulação mais incerta pois a margem de erro de aproximadamente um grau é justamente o desvio do esperado nesta análise.

Uma coisa importante a se notar, é que os erros não são "constantes" no sentido de que, mesmo nos ângulos em que  $\alpha_i \neq \alpha_r$ , o que foge do esperado, a diferença entre D e  $D_{eq}$  não são as maiores, juntamente a isto, os valores de  $n_{eq}$  que mais fogem do esperado também não são aqueles em que os ângulos incidentes e refletidos são diferentes ou aqueles em que a distância dos feixes é a maior, dessa forma, essa disparidade pode devidamente ser explicada pelo fato do feixe possuir um certo comprimento o que poderia causar alguns erros de medida.

### 4.2 Ângulo de desvio mínimo em um prisma

Ao seguir-se os passos estipulados na seção 3.2, obteve-se o seguinte valor mínimo para o ângulo de desvio mínimo do prisma:

$$\theta_{min} = 50 \pm 1^{\circ} \tag{11}$$

E o valor máximo como sendo;

$$\theta_{max} = 51 \pm 1^{\circ} \tag{12}$$

De modo que seu valor médio seja;

$$\theta_m = 50,5 \pm 0,5^{\circ} \tag{13}$$

Esquematizando o sistema, obtêm-se a seguinte disposição:

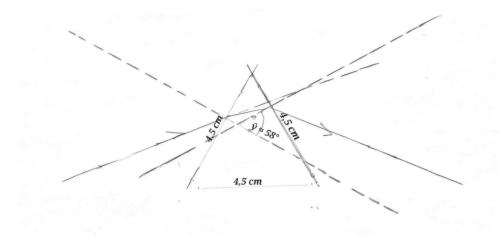


Figura 6: Esquematização do feixe de luz incidindo no prisma de vidro considerando os desvios encontrados.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Da qual nota-se que se trata de um prisma equilátero no qual:

$$\hat{\mathbf{y}} = 58 \pm 1^{\circ} \tag{14}$$

Tomando então a equação (7), temos que:

$$\sin 50.5 \pm 0.5^{\circ} = n_p \sin \frac{58 \pm 1^{\circ}}{2} \tag{15}$$

$$n_p = \frac{\sin 50.5 \pm 1^{\circ}}{\sin \frac{58 \pm 1^{\circ}}{2}} \tag{16}$$

De modo que:

$$n_p \approx 1,59 \pm 0,03$$
 (17)

Uma vez que não se sabia qual o material do prisma, buscou-se na literatura um valor cujo o qual melhor se aproximaria deste. Desse modo, segundo Chandrinos (2009), o material que compõe o prisma analisado seria o vidro de policarbonato, o qual possuí índice de refração igual 1,59.

#### 4.3 Reflexão interna total em um bloco semicircular

Por fim, nesta frente do experimento, ao seguir a metodologia descrita em 3.3, obteve-se os seguintes dados;

Tabela 2: Dados medidos da refração indireta e direta.

$\theta_{int}\pm 1^{\circ}$	$ heta_{ext}\pm 1^\circ$	$n_{eq3}$	$\theta_c \pm 1^\circ$	n <sub>dir3</sub>
10	15	$1,49 \pm 0,18$		
11	17	$1,53 \pm 0,16$		
20	30	$1,46 \pm 0,08$	42	$1,49 \pm 0,03$
30	45	$1,41 \pm 0,05$		
34	56	$1,48 \pm 0,04$		

Fonte: Elaborado pelos autores.

Calculando novamente a média de  $n_{eq3}$ , obtém-se o valor médio para o índice de refração da peça como sendo:

$$n_{m3} = 1,47 \pm 0,04 \tag{18}$$

Plotando então os senos dos ângulos obtidos e traçando-se a reta ideal através da regressão linear, forma-se o seguinte gráfico de  $sen\theta_{int} \times sen\theta_{ext}$ :

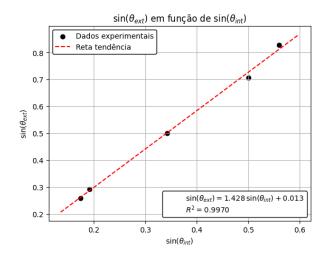


Figura 7: Gráfico de  $sen\theta_{ext}$  em função de  $sen\theta_{int}$  Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir deste, podemos definir o índice de refração a partir da reta ideal uma vez que segundo a equação (1);

$$n_{ar} \cdot \sin \theta_{ext} = n_{ind3} \cdot \sin \theta_{int} \tag{19}$$

$$\sin \theta_{ext} = \frac{n_{ind3}}{n_{ar}} \sin \theta_{int} \tag{20}$$

De modo que, tomando o índice de refração do ar como aproximadamente 1,  $n_{ind3}$  se torna o próprio índice de refração da reta, ou seja;

$$n_{ind3} = 1,43 \pm 0,04 \tag{21}$$

A partir disto, tomando a equação (8), o ângulo critico previsto, seria tal que

$$\sin \theta_{Cind} = \frac{1}{n_{ind3}} \tag{22}$$

$$\sin \theta_{Cind} \approx 0.70 \tag{23}$$

E portanto:

$$\theta_{Cind} \approx 44,37 \pm 1,57^{\circ} \tag{24}$$

Primeiramente, vale-se analisar os três valores do índice de refração obtidos, sendo estes:

Tabela 3: Índices de refração obtidos.

$n_{m3}$	$n_{ind3}$	$n_{dir3}$		
$1,47 \pm 0,04$	$1,43 \pm 0,04$	$1,49 \pm 0,03$		
Fouts, Elaborada nalas autores				

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir destes nota-se principalmente o efeito das aproximações, uma vez que o índice obtido diretamente ( $n_{dir3}$ ) é o mais próximo do esperado e aquele que apresenta o menor erro, já o índice obtido através da análise equacional ( $n_{ind3}$ ) é o mais distante do valor esperado do índice de refração para o acrílico ( $\approx 1,491$ ). Isso se deve, principalmente ao efeito das aproximações da equação da reta dada regressão linear, juntamente dos pequenos desvios nas próprias medidas devido ao comprimento do feixe e imprecisão das ferramentas para a obtenção dos ângulos. Entretanto, todos ainda são equivalentes e possuem suas diferenças dentro do estipulado por suas incertezas.

## 5 CONCLUSÃO

Em função de todos os métodos aqui discutidos e resultados obtidos, conclui-se que foram obtidos resultados equivalentes aos reais. Quanto ao primeiro experimento, notou-se que o fato do feixe do later utilizado possuir certo comprimento, afetou levemente algumas medidas, uma vez que pode-se ter definido o caminho do feixe mais a esquerda ou direita, de forma a afetar os resultados obtidos, entretanto, mesmo com estes desvios, os dados experimentais, ainda são equivalentes aos dados da previsão teórica, indicando uma interferência proporcional as incertezas dos equipamentos de medição. Na segunda parte, o uso do método descrito na seção 2, permitiu a definição do material do prisma com alta precisão, tendo resultados numéricos muito próximos, com incertezas pequenas.

Por fim, a terceira frente da prática demonstrou a diferença da precisão da aferição direta e indireta, uma vez que como se vê na tabela 3, a medida que aproximações teóricas eram aplicadas a análise, o valor obtido distanciava-se do tabelado, entretanto, ainda assim estavam dentro do esperado, tendo em vista suas incertezas; levando a conclusão em que apesar de um distanciamento numérico existir devido a aproximações, este ainda é previsto pela incerteza do próprio método.

# REFERÊNCIAS

Tiago Barbim Batalhão, M. F. C.; Eduardo Ribeiro de Azevedo, L. A. d. O. N. . L. G. M. *Laboratório de Física IV: livro de práticas*; Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, 2013; Compilado por Tiago B. Batalhão *et al*.

Nussenzveig, M. *Curso de Física Básica: Óptica*, 5th ed.; Edgard Blücher: São Paulo, 2021; Vol. 4.

Chandrinos, A. High Refractive Index Plastic Optical Materials; VDM Verlag Dr. Müller, 2009.