



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas

Taísa de Oliveira Vieira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadores:

Felipe Arruda de Araújo Pinheiro

Carlos Eduardo Aguiar

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas

Taísa de Oliveira Vieira

Orientadores: Felipe Arruda de Araújo Pinheiro e Carlos Eduardo Aguiar

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dr. Felipe Arruda de Araújo Pinheiro

Dr. Rafael de Sousa Dutra

Dra. Daniela Szilard Le Cocq d'Oliveira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

dU48a

de Oliveira Vieira, Taísa

Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas / Taísa de Oliveira Vieira. -- Rio de Janeiro, 2020.

162 f.

Orientador: Felipe Arruda de Araújo Pinheiro.

Coorientador: Carlos Eduardo Aguiar.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós Graduação em Ensino de Física, 2020.

1. Ensino de Física. 2. Ensino de Óptica. 3. Propagação de Luz em meios complexos e desordenados. I. Arruda de Araújo Pinheiro, Felipe , orient. II. Eduardo Aguiar, Carlos, coorient. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente sou grata a Deus por me sustentar em todas as áreas da minha vida.

Aos meus amigos e familiares em especial, Miguel, Otavio, Oronildes, Shirlei, Monique, Mariane, Conceição e Merchiades. Obrigada por todo incentivo, pelas várias vezes que cuidando do meu filho possibilitaram a minha frequência nas aulas e reuniões e por sempre acreditarem em mim. Esse trabalho não seria possível sem ajuda de todos vocês. Obrigada!

Aos meus orientadores, Felipe Pinheiro e Carlos Aguiar, por toda paciência, incentivo, críticas e sugestões. Meus sinceros agradecimentos. Aos professores, do curso de mestrado, que contribuíram para o meu crescimento profissional. Em especial a professora Marta Barroso, pois me direcionou para trabalhar nessa área de pesquisa.

Ao professor Leonardo Pereira Vieira, que colaborou com informações de experiências anteriores de como obter os dados da atividade que investiga a Lei de Lambert-Beer.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas

Taísa de Oliveira Vieira

Orientadores: Felipe Arruda de Araújo Pinheiro e Carlos Eduardo Aguiar

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Apresentamos uma proposta de ensino que aborda fenômenos relacionados com a propagação de luz em meios complexos e desordenados em situações cotidianas, a saber, absorção e espalhamento da luz. Podemos observar na natureza muitos fenômenos luminosos relacionados com essa temática, contudo pouco discutidos em sala de aula. Como por exemplo, a cor branca comumente vista em bebidas e em produtos de limpeza. Portanto, pretendemos explorar essa área da Física e promover um ensino de Óptica mais interessante do que o currículo atual, baseado quase que exclusivamente na Óptica Geométrica. E para tal fim, propomos alguns experimentos de baixo custo auxiliados por *Smartphones* para a investigação do comportamento luminoso em meios complexos e desordenados.

Palavras chave: Ensino de Física, Óptica, Espalhamento e Absorção da Luz, Lei de Lambert-Beer, *Smartphones*.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

Abstract

A Didactic Approach Concerning Light Propagation in Complex and Cluttered Environments

Taísa de Oliveira Vieira

Advisors: Felipe Arruda de Araújo Pinheiro and Carlos Eduardo Aguiar

Summary of the Master's Dissertation submitted to the Graduate Program in Physics Teaching, Physics Institute, Universidade Federal do Rio de Janeiro, as part of the necessary requirements for the title of Master in Physics Teaching.

We present a teaching proposal that deals with phenomena related to light propagation in complex and disordered environments in everyday situations, namely, light absorption and scattering. We can observe in nature many luminous phenomena related to this theme, but little discussed in the classroom. As for instance, the white color commonly seen in beverages and cleaning products. Therefore, we intend to explore this area of physics and promote a more interesting teaching of Optics than the current curriculum, based almost exclusively on Geometric Optics. For this purpose, we propose some low-cost Smartphone-assisted experiments to investigate light behavior in complex and disordered environments.

Keywords: Physics Teaching, Optics, Light Absorption and Scattering, Lambert-Beer Law, Smartphones.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

Sumário

1 Introdução	1
2 Revisão da Literatura Atual sobre o Tema Abordado nesta Dissertação	6
3 Conceitos Básicos	10
3.1 Emissão da Luz.....	12
3.2 Absorção da Luz	13
3.2.1 Atenuação Exponencial	13
3.2.2 Seção Transversal de Absorção	16
3.2.3 Coeficiente de Absorção Molecular.....	19
3.3 Espalhamento da Luz.....	22
3.3.1 Espalhamento Múltiplo da Luz	25
3.3.2 Espalhamento Múltiplo por uma Pilha de Placas Paralelas.....	26
3.3.3 Livre Caminho Médio	31
3.3.4 Mudança de Fase no Espalhamento.....	33
4 Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas	36
4.1 Fenômenos Ópticos	38
4.1.1 Cores do Céu.....	38
4.1.2 Cores da Neve.....	41
4.1.3 Espuma Branca	42
4.1.4 Escuridão no Fundo do Mar.....	43
4.1.5 Areia Molhada.....	43
4.1.6 Garrafas Partidas.....	45
4.1.7 Pilha de Placas Paralelas e Transparentes.....	46
4.1.8 Lei de Lambert-Beer	47

4.2 Experimentos	48
Atividade 1: Explorando a Lei de Lambert-Beer	49
Atividade 2.1: Espalhamento de luz por cacos de Vidro.....	55
Atividade 2.2: Processos de extinção da Luz.....	56
Atividade 3.1: Lâminas Transparentes	58
Atividade 3.2: Brilho em meios porosos	65
5 Descrição da Prática	68
5.1 Atividade 1	69
5.2 Atividade 2	85
5.3 Atividade 3	98
Considerações Finais	106
Apêndice A.....	107
Apêndice B.....	134
Apêndice C.....	140
Referências Bibliográficas	153

Capítulo 1

Introdução

A visão é um componente muito importante do corpo, pois possibilita a formação das imagens dos objetos e seres presentes no dia a dia, e os olhos só conseguem desempenhar tais funções se o ambiente estiver iluminado. A luz não é importante apenas para nos fazer enxergar, nossa existência está relacionada com outros aspectos relacionados a mesma, como a fotossíntese realizada pelas plantas para a produção de alimentos e oxigênio. Devido seu notável valor no cotidiano da sociedade, a luz sempre foi um tema de interesse de muitos pesquisadores. Por exemplo, o reconhecimento de Isaac Newton como cientista iniciou-se com estudos relacionados à Óptica, (Hewitt 2011). Por volta de 1665, Newton realizou o experimento da refração luminosa, onde ficou provado que a luz branca se separava nas cores do arco-íris ao se propagar em um prisma (“experimentum crucis”). Atualmente a Óptica representa uma área de pesquisa bastante desenvolvida, com muitas aplicações consideráveis para o cotidiano, por meio dos seguintes instrumentos: óculos, lupas, telescópios,

microscópios, câmeras fotográficas, prismas, espelhos, fibras ópticas, laser, instrumentos de leitura óptica, entre outros. Conseqüentemente, é uma disciplina relevante nas aulas de Física do Ensino Médio. Contudo, o tratamento didático é quase que totalmente destinado para Óptica geométrica. Tendo isso em vista, esse trabalho apresenta uma discussão sobre temas da Óptica pouco abordados nos livros didáticos, tais como espalhamento, propagação e absorção da luz em meios complexos e desordenados comuns no nosso cotidiano.

O espalhamento múltiplo da luz ocorre em meios heterogêneos e/ou desordenados, ou seja, meios com propriedades distintas entre pontos da região de propagação da luz. Esse meio óptico é composto por várias partículas espalhadoras, como átomos, elétrons, moléculas, fótons, bolhas, gotículas. A luz incidente em cada partícula não é formada pela radiação de apenas uma fonte externa, mas a radiação que é multiplamente espalhada pelos demais espalhadores presentes no meio óptico. Em outras palavras, quando a luz incide numa partícula a mesma espalha parte dessa onda eletromagnética que seguirá até outra partícula, que por sua vez repetirá este processo. Semelhantemente tal efeito será reproduzido por todas as outras partículas do meio, caracterizando o espalhamento da luz em todas as direções.

Além de reemitir energia eletromagnética, as cargas elementares (prótons e elétrons) podem transformar parte da energia eletromagnética incidente em outras formas de energia, energia térmica por exemplo, num processo chamado absorção Bohren (1998). Logo, o espalhamento e absorção não são processos independentes e a combinação dos dois casos é chamada de extinção.

O espalhamento múltiplo da luz é um fenômeno muito presente no cotidiano, mas apesar disso é um tema pouco discutido nas aulas de Física, tanto no ensino médio quanto superior, da mesma maneira que o conceito de absorção e extinção da luz. Por isso, apresentamos alguns aspectos sobre essas temáticas com o intuito de contribuir com os professores de Física que desejam apresentar uma aula que investigue situações comuns da vida do aluno e que tipicamente não estão presentes nas aulas de Física.

O conhecimento sobre espalhamento múltiplo da luz permite compreender muitos fenômenos presentes no nosso dia a dia, como, por exemplo, a variação de cor e brilho do céu, o brilho e a escuridão das nuvens e a mudança de cor entre a areia seca e a areia molhada. O espalhamento múltiplo da luz explica também porque um grão de açúcar é transparente e um aglomerado possui cor branca. Essas discussões são notavelmente ausentes nos livros didáticos e até mesmo nos cursos de licenciatura em Física. Portanto, expõe-se uma proposta de trabalho que promove essa discussão através de experimentos simples e de baixo custo.

Os aspectos da absorção da luz também são muito presentes na nossa experiência cotidiana, como, por exemplo, o fato de a luz se extinguir nas profundezas do mar ou de lagos. Esse fenômeno é consequência da absorção da luz pelas partículas contidas na água. A cada camada de água percorrida a luz perde um pouco de sua intensidade até que após determinada distância não chegue luz alguma.

Por fim, o trabalho apresenta uma aula prática que discute fenômenos ópticos, tais como espalhamento múltiplo e absorção da luz, presentes no cotidiano, através de recursos tecnológicos e materiais de baixo custo, podendo ser aplicado em qualquer ambiente educacional. Possibilitando o estudo de uma temática interessante com o apoio de experimentos simples que priorizam a participação dos alunos na construção do conhecimento.

Atualmente, existe muita discussão sobre a utilização dos laboratórios didáticos no ensino de Física e em como essa ferramenta didática pode melhorar o processo de ensino e aprendizagem de conceitos científicos. Até meados do século XX, as aulas de Física eram baseadas no ensino tradicional, aulas expositivas com total domínio do professor e uma atitude passiva do aluno em que lhe era exigido ações de memorização. A falta de aulas experimentais devia-se ao fato de os experimentos serem grandes e caros e também da inexistência de espaços destinados a esses fins (Afonso e Chave 2015). Após o fim da Segunda Guerra Mundial e o início da Guerra Fria, o ensino de Ciências passa para uma outra perspectiva, onde se procura desvencilhar das práticas tradicionais e proporcionar um dinamismo no processo de ensino e

aprendizagem através de aulas mais técnicas a fim de estimular a formação de novos cientistas para trabalharem na corrida tecnológica liderada então pelos Estados Unidos e a extinta União Soviética. De acordo com Gaspar (2014, p. 17)

... uma extraordinária conquista científica e tecnológica fez ruir toda essa confiança no ensino tradicional, ao menos no mundo ocidental: a então União Soviética (URSS) lançou o Sputnik, primeiro satélite artificial da Terra.

Então, surgem os grandes projetos para o ensino de Física como, Physical Science Study Committee (PSSC), 1960; Harvard Project Physics, 1975; e no Brasil temos: Projeto de Ensino de Física (PEF); Física Auto Instrutiva (FAI); e Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF). Esses projetos foram muito importantes porque possibilitaram o progresso de pesquisas sobre o ensino de Física e a importância dos experimentos no processo de ensino aprendizagem.

Portanto, o estudo do uso do laboratório didático nas aulas de Ciências é um campo de pesquisa consolidado. E é muito fácil encontrar inúmeros trabalhos que abordam essa temática, questionando os pontos positivos e negativos dessa prática educacional no processo de ensino aprendizagem. E, por acreditar que os alunos devam participar ativamente na construção do conhecimento, este trabalho defende a utilização de práticas experimentais que possibilitem uma discussão sobre o conteúdo científico abordado, possibilitando aos discentes um aprendizado mais significativo que possa contribuir para sua formação acadêmica e social. Segundo Vieira (2013, p. 5):

A Física é uma ciência experimental, que lida com o mundo material. É natural, portanto, que seu ensino aprendizagem envolvam a observação e manipulação de objetos reais.

As atividades práticas estimulam o desenvolvimento da criatividade, da curiosidade e da capacidade de refletir criticamente despertando no aluno o interesse em conhecer a ciência e em aprendê-la através da própria vivência. É uma abordagem muito diferente das aulas expositivas que contribuem muito

pouco no aspecto do aluno participar ativamente na construção do conhecimento.

A estrutura dessa dissertação apresenta a seguinte organização: Capítulo 2, revisão bibliográfica dos trabalhos existentes na área de ensino que apresentam temática semelhante à nossa proposta. No Capítulo 3, discutimos os conceitos físicos presentes no trabalho, como absorção, espalhamento da luz e Lei de Lambert-Beer. O Capítulo 4 apresenta a abordagem didática desenvolvida para essa pesquisa, contendo todos os experimentos, motivação e objetivos. Também encontramos nesse capítulo os resultados da aplicação da prática. Expomos no Capítulo 5 a aplicação das atividades na sala de aula, os dados coletados pelos alunos, assim como as análises das respostas dadas por eles no desenvolvimento das práticas. No Capítulo 6 estão contidas as considerações finais sobre o trabalho, assim como algumas sugestões para o aperfeiçoamento das aplicações. O apêndice A contém o produto da abordagem didática. O apêndice B mostra como os experimentos das atividades são montados e o apêndice C apresenta os roteiros usados na prática.

Capítulo 2

Revisão da Literatura Atual Sobre o Tema Abordado nesta Dissertação

A atenuação luminosa devido à interação da luz com a matéria possui uma variedade de aplicações no cotidiano, como já mencionamos. Entretanto, esse tema ainda está fora do contexto de ensino, e não se restringe apenas ao Ensino Médio, nos cursos de Licenciatura em Física também possui pouca ênfase. Neste capítulo, discutiremos alguns trabalhos produzidos nessa área comprovando a pouca atenção que tem sido dada a este tópico no ensino de Física.

O trabalho “Teaching Beer’s Law and Absorption Spectrophotometry with a SmartPhone: A Substantially Simplified Protocol” de Kuntzleman e Jacobson (2016) discute a prática da espectroscopia de absorção através de um aparato experimental simples, utilizando materiais do dia a dia e um aplicativo para *smartphone* capaz de medir a intensidade de luz. O objetivo é apresentar um material de fácil construção que pode ser utilizado por professores de Química

que desejam discutir melhor, a Lei de Beer. O experimento desenvolvido mede a intensidade da luz que atravessa cinco soluções de concentração conhecida de CuSO_4 . Para cada medida foi calculado o valor da absorvância (propriedade da matéria em absorver determinadas frequências radiativas) de cada amostra, através da Lei de Beer e com os dados construíram um gráfico da absorvância versus a concentração molar obtendo um ajuste linear em acordo com as previsões teóricas.

“Discovering the Beer-Lambert Law” de Ricci, Ditzler e Nestor (1994) é um artigo que descreve uma prática desenvolvida para a discussão da Lei Lambert-Beer para alunos universitários de Química, a fim de promover um conhecimento prévio sobre instrumentação espectroscópica. Nessa atividade os alunos precisam refletir sobre um modelo para a atenuação da luz em meios materiais. As deduções dos discentes são utilizadas para chegar ao entendimento da Lei de Lambert-Beer. Numa segunda parte, os alunos testam a teoria discutida inicialmente, através da análise de um espectro de absorção de um determinado soluto. Os dados dos experimentos são usados para a construção de gráficos permitindo uma descrição matemática da atenuação da luz, tanto para a concentração do meio, quanto para a profundidade. Finalmente, os estudantes atingem o objetivo de verificar os princípios relacionados a Lei de Lambert-Beer.

O artigo “The Beer-Lambert Law Revisited. A Development without Calculus” de Lykos (1992), tem como objetivo promover uma análise matemática simples que permite chegar na derivação da Lei de Lambert-Beer, sem precisar de domínio de cálculo diferencial e integral. Feita essa descrição e atingido o objetivo, o autor mostra como chegar no mesmo resultado utilizando o cálculo. Também discute a importância dessa lei para os químicos, ressaltando o interesse dos mesmos em mensurar a absorção de luz pelas soluções.

Na área de ensino de Física, há o artigo “Modelagem do Espalhamento Rayleigh da Luz com Propósitos de Ensino e de Aprendizagem” de Krapas e Santos (2002). A proposta da pesquisa é discutir os efeitos do espalhamento Rayleigh na variação de cor do céu. Segundo os autores, essa temática é motivacional, por ser um fenômeno comum e também porque as explicações dos alunos para esses efeitos são geralmente errôneas. De fato, muitos estudantes

acreditam que existe alguma conexão entre as cores do céu e o conceito de refração luminosa, assim como acontece no arco-íris. O experimento é bem simples e consiste em produzir numa solução de hidróxido de sódio partículas espalhadoras de luz, no caso, o ácido sulfúrico quando diluído nessa solução. Então, um feixe de luz incide sobre o sistema produzindo os efeitos de céu azul e vermelho, como acontece no dia a dia e permitindo mostrar aos estudantes a interação entre luz e partículas espalhadoras.

“An Experiment to Measure Mie and Rayleigh Total Scattering Cross Sections” de Cox, DeWeerd e Linden (2002) é um trabalho desenvolvido para alunos universitários com o objetivo de discutir o espalhamento da luz. A pesquisa apresenta um experimento que permite determinar a seção transversal de espalhamento total da luz, para três tamanhos diferentes de partículas e realizar uma comparação dos dados experimentais e as previsões teóricas do espalhamento de Rayleigh e a teoria de Mie. É um trabalho que necessita de um instrumento específico da área da Química, espectrofotômetro de absorção, e requer um domínio mediano de matemática.

Assim como o artigo anterior, o trabalho “Verification of the Rayleigh Scattering Cross Section” de Chakraborti (2007) foi desenvolvido para a graduação, cujo objetivo é determinar a dependência do comprimento de onda com a seção transversal de espalhamento Rayleigh. Então, através de um espectrômetro de fibra óptica, coletaram o espectro da absorção Lunar e do céu azul, para então determinar a seção transversal de espalhamento para cada comprimento de onda. Um dos resultados mostra que o tamanho médio das partículas espalhadoras da Lua é muito maior que o comprimento de onda da luz incidente.

Tendo em vista o exposto, verificamos que há pouca literatura neste assunto destinada às turmas de nível médio e superior de Física e Química. No caso da segunda, comparativamente há mais publicações, principalmente por causa da análise espectroscópica, que é exigência curricular em alguns cursos universitários. Já na área de Física, identificamos apenas um artigo aplicável ao nível médio, cuja proposta é bem simples e permite discutir efeitos de espalhamento da luz. Os outros trabalhos que discutem o espalhamento da luz

apresentam uma abordagem mais complexa destinada a estudantes de graduação.

Tendo em vista as poucas publicações existentes sobre o tema, desenvolvemos algumas propostas de ensino que abordam os efeitos da propagação da luz em meios ópticos não homogêneos.

Capítulo 3

Conceitos Básicos

A finalidade desse capítulo é apresentar os aspectos mais importantes da propagação de luz em situações cotidianas. É fácil comprovar que a intensidade da luz que incide sobre um rio vai diminuindo conforme a profundidade aumenta, assim como, é notável que os objetos vistos de uma grande distância não possuem a mesma coloração se observados a curtas distâncias. Do mesmo modo, notamos mudanças na coloração de uma areia molhada e uma areia seca. Todos estes exemplos do dia a dia estão relacionados com a atenuação da luz devido às suas interações com a matéria.

A interação da luz com a matéria é dominada por dois processos conhecidos como espalhamento e absorção. O espalhamento é resultado na mudança de direção do feixe incidente e a absorção representa uma dissipação de energia do feixe. Em um meio óptico não homogêneo pode haver espalhamento e absorção. E as manifestações de cada um desses efeitos estão relacionadas com o comprimento de onda da luz, com o tamanho da partícula do centro espalhador e também com o índice de refração da substância.

O espalhamento da luz apresenta um comportamento característico quando a luz interage com partículas muito menores que o comprimento de onda. Um exemplo deste comportamento é a cor azul do céu. A luz azul é mais espalhada que as outras cores do espectro porque seu comprimento de onda é o menor da faixa do visível, sofrendo mais espalhamento pelas partículas atmosféricas. Esse fenômeno é conhecido como espalhamento de Rayleigh. Segundo Hewit (2011, p. 479, 484 e 485):

A luz é refletida pelos objetos de uma maneira semelhante à maneira como o som é “refletido” por um diapasão de forquilha quando outro diapasão desse tipo está localizado próximo, vibrando. Um dos diapasões pode fazer o outro vibrar, mesmo quando suas frequências características não são iguais, embora com amplitude reduzida. O mesmo é verdade para átomos e moléculas. Os elétrons mais externos que se movem rapidamente ao redor do núcleo atômico podem ser obrigados a oscilar pelos campos elétricos oscilantes das ondas eletromagnéticas. Uma vez oscilando, esses elétrons emitem suas próprias ondas eletromagnéticas, da mesma forma que os diapasões de forquilha emitem ondas sonoras.

[...] Quanto menor for a partícula, mais luz de alta frequência será reemitida por ela. Isso se parece com a situação em que sinos pequenos soam com notas mais altas do que os sinos grandes.

A interação da luz com partículas de tamanho superior ao comprimento de onda da luz incidente ajuda compreender efeitos como a cor branca de um aglomerado de neve, nuvem, açúcar, etc. As moléculas quando interagem com ondas luminosas também são capazes de absorver fótons quando os mesmos apresentam comprimentos de ondas compatíveis com o espectro de absorção das mesmas. Todos esses aspectos serão discutidos nesse capítulo proporcionando um embasamento teórico para a compreensão das propostas pedagógicas presentes no trabalho.

3.1 Emissão da Luz

Sabe-se que luz é uma onda eletromagnética na faixa de frequência perceptível ao olho humano. A ideia de luz como onda foi discutida por vários cientistas, Huygens (propôs uma teoria baseada na interferência de ondas), Fresnel (explicação do fenômeno da polarização da luz), Young (experimento da fenda dupla) e Maxwell (desenvolvimento das equações de Maxwell). No início do séc. XX, descobriu-se que a luz também se comportava como partícula, o fóton.

Cada elemento químico possui um conjunto próprio de níveis de energia, chamado espectro atômico. Existem algumas interações que possibilitam que o elétron varie sua posição na escala energética, quando o mesmo salta para o nível superior se diz que o átomo está excitado e quando retorna ao seu estado inicial chamamos o processo de relaxação. Durante a passagem de um átomo excitado para a condição de relaxação ocorre a liberação de fóton. O fóton pode ser compreendido como uma partícula composta de energia quantizada, cuja frequência f está relacionada a diferença de energia correspondente ao salto dado pela carga negativa. Matematicamente, podemos escrever:

$$E = hf$$

onde h é a constante de Planck. Esse efeito de emissão de fóton descrito nos procedimentos acima representa a compreensão da emissão de luz. Um fóton de luz verde possui uma quantidade de energia correspondente a sua frequência, a saber, $5,3 \cdot 10^4$ Hz a $5,7 \cdot 10^4$ Hz, o fóton de luz vermelha terá uma energia que corresponde a frequência atribuída a cor vermelha, $6,2 \cdot 10^4$ Hz a $7,5 \cdot 10^4$ Hz, é por isso que observamos cores diferentes numa chama, cada elemento excitado pelas chamas, emite sua própria cor característica, formando um fenômeno de diferentes tonalidades. A aurora boreal ilustra esse efeito de excitação do átomo, esse processo é dado através das colisões dos elétrons em altas velocidades, provenientes do vento solar com os átomos ou moléculas na atmosfera superior. Esse forte choque empurra os elétrons orbitais para níveis

mais altos de energia, fazendo com que os mesmos emitam fótons, com cores específicas para tipos diferentes de átomos.

3.2 Absorção da Luz

Os átomos são capazes de emitir luz e também podem absorver energia luminosa. Os átomos absorvem preferencialmente as faixas de frequências que estão mais próximas à frequência que o próprio emite. O regime da emissão discutido na seção anterior mostra que o átomo libera energia quando decai na escala energética, em contrapartida, o átomo recebe energia para elevar a sua posição, isto é, quando um corpo absorve pacotes discretos de energia o elétron salta para um nível maior, chamamos esse feito de absorção. As frequências dos fótons são diretamente proporcionais à diferença de energia correspondente a transição entre níveis do átomo.

3.2.1 Atenuação Exponencial

Agora iremos discutir o fenômeno da atenuação exponencial. Para isso consideremos o exemplo da quantidade de luz que vai diminuindo conforme adentramos as profundezas de um rio. Em muitas filmagens que mostram o fundo do mar sempre apresentam o mergulhador com um lanterna, justamente porque a luz natural é desprezível para determinadas profundidades. Sendo assim, iremos discutir a Lei que mostra como a intensidade luminosa decai na natureza.

Considere que um feixe de luz monodirecional, monocromático e propagando-se num meio opticamente homogêneo (propriedades idênticas para todos os pontos do meio) incide perpendicularmente sobre duas placas paralelas separadas por uma distância x , conforme figura 3.1. A intensidade luminosa inicial é dada por F_0 . Agora, podemos imaginar que a distância x entre as placas

pode ser subdividida em N partes iguais, com espessuras dadas por $\Delta x = \frac{x}{N}$, onde N representa o número de subdivisões.

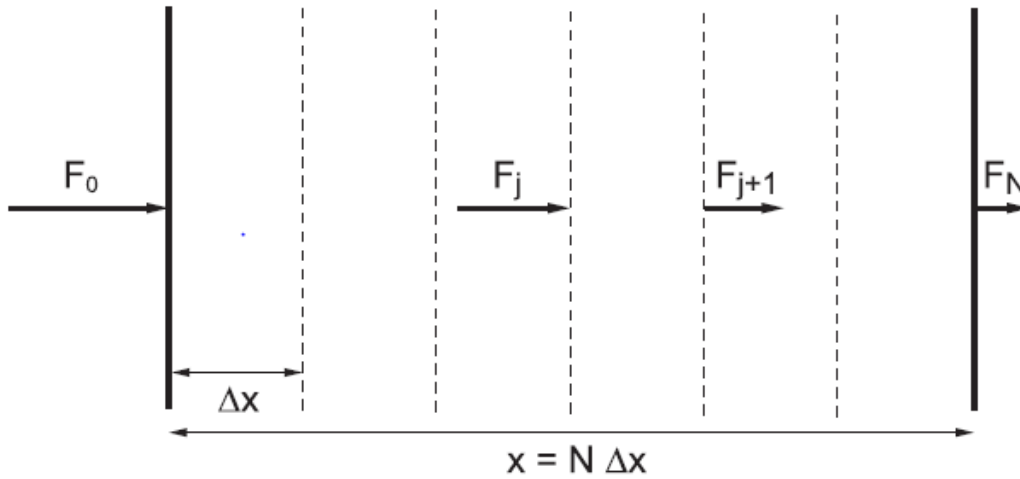


Figura 3.1: Um meio absorvente plano-paralelo subdividido em N fatias, cada uma com espessura Δx . **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

Conforme o feixe de luz atravessa a primeira subdivisão a intensidade luminosa diminui de acordo com o tamanho da faixa atravessada (Δx). Definindo F_0 , como a intensidade inicial e k como sendo uma constante característica do meio óptico, podemos escrever que a intensidade do feixe após passar pela primeira camada F_1 é dada por:

$$F_1 = F_0 - F_0 k \Delta x. \quad (3.1)$$

A equação fica melhor escrita na forma:

$$F_1 = F_0 (1 - k \Delta x). \quad (3.2)$$

A transmissão pelas faixas é independente, de maneira que podemos multiplicar a transmissão de cada uma para obter a transmissão de duas faixas combinadas. Então, tem-se:

$$F_2 = F_1 (1 - k \Delta x) = F_0 (1 - k \Delta x)^2. \quad (3.3)$$

Logo, para N faixas:

$$F_N = F_0 (1 - k \Delta x)^N = F_0 \left(1 - k \frac{x}{N}\right)^N. \quad (3.4)$$

Fazendo o limite para N infinitamente grande e mantendo kx constante, tem-se:

$$F = \lim_{N \rightarrow \infty} F_0 \left(1 - \frac{kx}{N}\right)^N. \quad (3.5)$$

Esse limite é uma das muitas maneiras de representar uma função exponencial, de maneira que,

$$e^\xi = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\xi}{n}\right)^n. \quad (3.6)$$

Combinando as equações (3.5) e (3.6), chegamos na equação:

$$F = F_0 \exp(-kx). \quad (3.7)$$

A expressão encontrada representa a lei de atenuação exponencial, ou seja, a intensidade luminosa decai exponencialmente conforme o aumento da distância que a luz percorre. Inicialmente definimos k , como uma variável que representava uma característica do meio óptico, agora iremos ampliar nossa discussão a respeito dessa grandeza. Vemos que kx na equação (3.7) é adimensional, como x possui dimensão de unidades de comprimento o k necessariamente possui dimensão do inverso do comprimento, isso revela que o k representa o coeficiente de absorção do meio, ou seja, é a medida da distância que a partir da qual a intensidade da luz é significativamente atenuada.

O coeficiente de absorção de uma substância depende do comprimento de onda da luz incidente. Já foi citado que a intensidade luminosa diminui dentro de um lago, rio, mar, contudo o mesmo não é observado num copo d'água ou numa piscina rasa. Isso depende do comprimento de onda da luz, no gráfico abaixo temos a demonstração da atenuação luminosa da água e do gelo de acordo com o comprimento de onda. Sabe-se que a faixa do visível está entre $0,38 \mu\text{m}$ e $0,74 \mu\text{m}$ e a atenuação da luz para esses valores está entre 10 m e 100 m. Isto é, a intensidade luminosa incidente sobre água e gelo só começará a ser perceptível a partir de uma distância de 10 m. Para comprimentos de ondas maiores do que a faixa do visível, entre $1 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$ a atenuação luminosa acontece numa distância muito menor de 10^{-2} m a 10^{-7} m, ou seja, um coeficiente de absorção elevado.

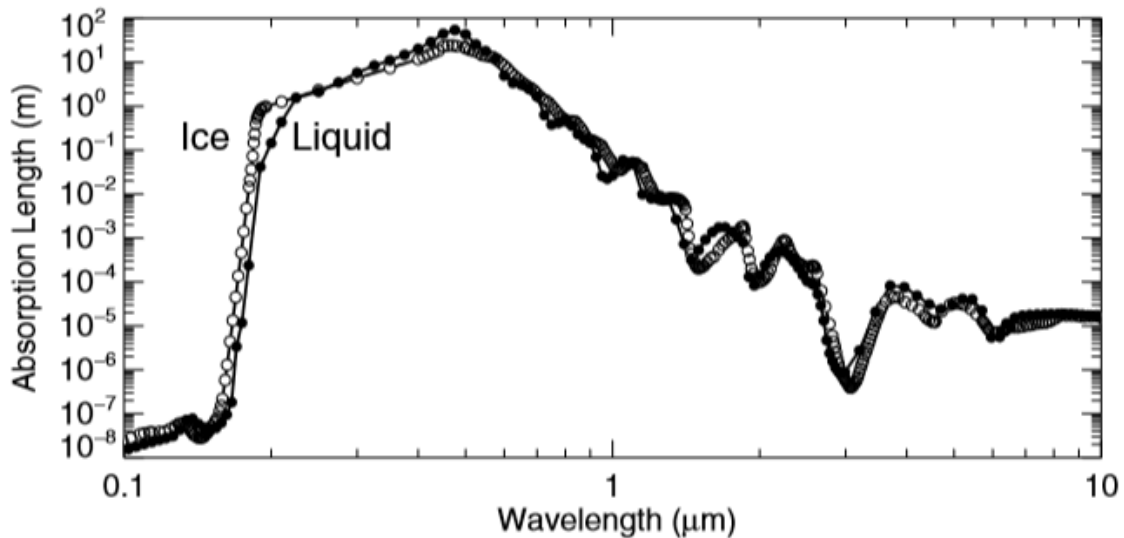


Figura 3.2: Comprimento de absorção (distância percorrida pela luz no meio óptico mostrando a atenuação luminosa por absorção) de gelo puro e água líquida. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

3.2.2 Seção Transversal de Absorção

Sabe-se que a atenuação da intensidade luminosa está relacionada com a absorção da radiação pelas partículas que compõem o meio de propagação, mas ainda não discutimos como esse processo ocorre na partícula. Logo, segue um modelo que explica como ocorrem as interações que permitem a absorção.

Considere que um feixe de luz monocromático e monodirecional F incide sobre uma molécula isolada. A mesma absorve energia, transformando a radiação em outras formas de energia, a uma taxa W_a , que é proporcional a F , podendo ser escrita como:

$$W_a = \sigma_a F, \quad (3.8)$$

onde σ_a é a área efetiva da molécula que interage na remoção de energia do feixe luminoso.

Agora, suponha que um feixe de luz monocromático e monodirecional incide perpendicularmente a uma placa fina de gás com área A e espessura x ,

ocupada por uma quantidade N de moléculas por unidade de volume com seção transversal de absorção σ_a . O total de moléculas na placa é $NA\Delta x$, logo, a área efetiva total para remoção da energia do feixe é $\sigma_a NA\Delta x$. Para essa situação, assumimos que nenhuma molécula se sobrepõe na direção do feixe, ou seja, distribuídas de modo que não ocupem a mesma posição. A redução da potência transmitida ao longo da distância Δx é dada por:

$$A\Delta F = -F\sigma_a NA\Delta x \quad (3.9)$$

Segue que,

$$\Delta F = -F\sigma_a N\Delta x = -Fk\Delta x \quad (3.10)$$

onde

$$k = \sigma_a N \quad (3.11)$$

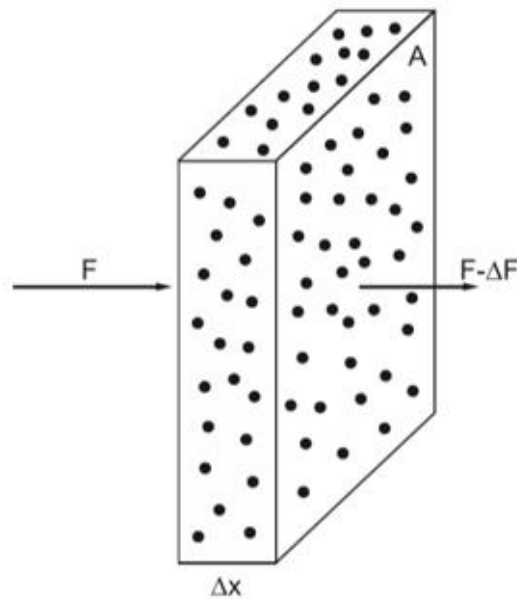


Figura 3.3: A irradiância F incidente em uma placa preenchida por moléculas absorventes distribuídas aleatoriamente é atenuada por uma quantidade proporcional à área transversal total (área efetiva projetada) de todas as moléculas na placa. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

A discussão apresentada sobre seção transversal de absorção para uma molécula é igualmente cabível para partículas. Entenda aqui partícula como um número finito de moléculas que seja suficiente para apresentar propriedades macroscópicas como temperatura e pressão. De fato, se mudarmos a área de absorção efetiva de uma molécula por de uma partícula, obteremos os mesmos resultados descritos.

Agora considere que um tubo esteja ocupado com um número fixo de partículas absorventes, cada uma com seção transversal de absorção idêntica. Analisaremos como o aspecto da distribuição dos absorvedores no meio influencia a atenuação da intensidade luminosa. Na hipótese de todos os absorvedores se alinharem um atrás do outro, a área de seção transversal de absorção será a de um único absorvedor. Por outro lado, quando a distribuição é uniforme na região o total de absorção será muito maior, de maneira que, a atenuação luminosa é muito diferente para essas duas situações.

Investigando mais um pouco a respeito da influência do posicionamento das partículas absorvente no meio óptico para a atenuação do feixe, analisamos um modelo experimental com dois arranjos para os absorvedores. Na primeira disposição, as partículas são adicionadas aleatoriamente uma após a outra. Na segunda ordenação, as partículas não podem ocupar mesma posição. A transmissividade luminosa para esses dois ordenamentos é mostrado na figura 3.4. A curva contínua no gráfico representa as partículas distribuídas pelo método aleatório e a curva tracejada corresponde à disposição dos absorvedores que não se superpõe uns aos outros. Analisando a imagem, identificamos que para um número pequenos de partículas dentro do tubo a atenuação é quase a mesma, mas, à medida que a quantidade de partículas aumenta, o decrescimento apresenta comportamento muito diferente.

Para as partículas sobrepostas, a transmissividade diminui com o número de partículas mais lentamente do que para o caso das não sobrepostas. Ou seja, os absorvedores que foram arranjados de modo não aleatório apresentaram uma distribuição mais uniforme sobre a área, possibilitando mais pontos de absorção. Esse exemplo nos ajuda entender que a lei de atenuação depende do arranjo das partículas absorventes e, portanto, nem sempre teremos um decaimento

exponencial. Nesse trabalho, consideraremos os casos de distribuição uniforme com validade para a lei de atenuação exponencial.

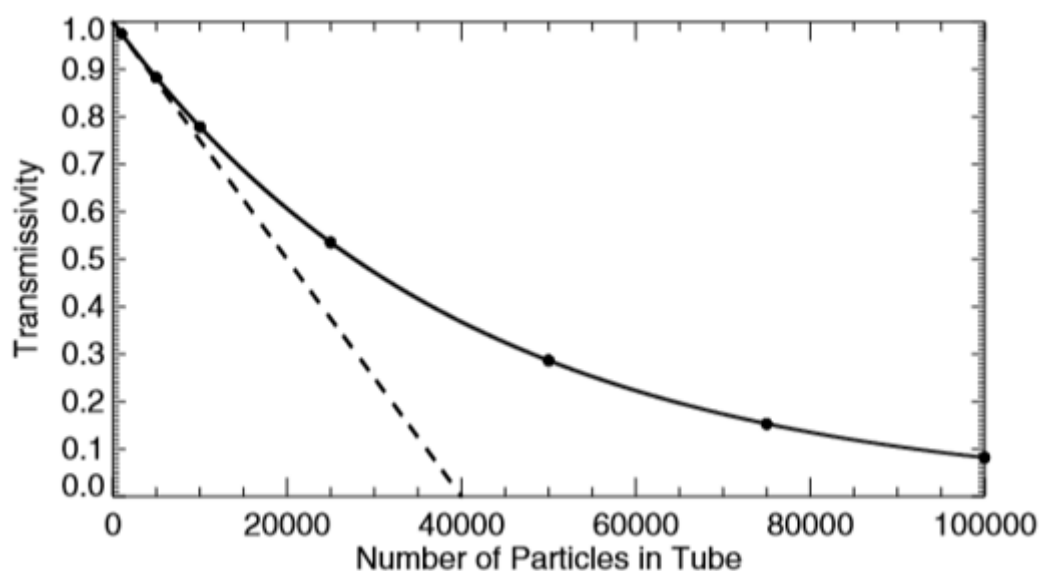


Figura 3.4: Gráfico da transmissividade versus número de partículas (quantidade fixa de absorvedores, cada um com a mesma seção transversal de absorção) para duas prescrições diferentes: partículas sobrepostas (círculos sólidos) e partículas não sobrepostas (curva tracejada). Cada círculo sólido na curva sólida (atenuação exponencial) é o resultado de seis conjuntos de cálculos para 1000, 5000, 10.000, 25.000, 50.000, 75.000 e 100.000 partículas. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

3.2.3 Coeficiente de Absorção Molecular

O coeficiente de absorção é uma quantidade que depende do material e da frequência da radiação incidente. Para entender esse comportamento dispersivo do coeficiente de absorção, utilizaremos um modelo simples. Considere um oscilador harmônico de massa m e carga positiva e na presença de uma onda eletromagnética de frequência ω . O campo elétrico gerado é E e a

força produzida na oscilação é dada por eE . Logo, o campo elétrico harmônico no tempo é dado por

$$E_0 \cos \omega t. \quad (3.12)$$

Sabe-se que, $\exp(-i\omega t) = \cos\omega t - i\sin\omega t$. De acordo com essa equação, o campo elétrico do oscilador é a parte real da representação complexa do verdadeiro campo de interesse, logo

$$E_0 \cos\omega t = \Re\{E_0 \exp(-i\omega t)\}. \quad (3.13)$$

Também admitimos que o oscilador é influenciado por uma força restauradora proporcional ao deslocamento e por uma força dissipativa proporcional à sua velocidade. Assim a equação do movimento do oscilador é:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -Kx - b \frac{dx}{dt} + eE \quad (3.14)$$

onde K e b são constantes e x representa a posição do oscilador.

Após algumas manipulações matemáticas na equação (3.14), tem-se

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x - \gamma \frac{dx}{dt} + \frac{e}{m} E \quad (3.15)$$

onde $\frac{K}{m} = \omega_0^2$ e $\frac{b}{m} = \gamma$.

Após um tempo suficientemente grande x também apresenta uma dependência harmônica com a mesma frequência que o campo elétrico, logo

$$x = x_0 \exp(-i\omega t) \quad (3.16)$$

Substituindo a equação (3.16) na equação (3.15) obtemos o seguinte resultado.

$$x_0 = \frac{e}{m} \frac{E_0}{\omega^2 - \omega_0^2 - \gamma i \omega} \quad (3.17)$$

A potência realizado pela força elétrica é dada por:

$$P = eE \frac{dx}{dt} \quad (3.18)$$

Multiplicando e dividindo a equação (3.17) pelo complexo conjugado do denominador, obtemos:

$$x = \frac{e}{m} E_0 \frac{\exp\{-i(\omega t - \phi)\}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \quad (3.18)$$

onde

$$\sin \phi = \frac{\gamma \omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \quad (3.19)$$

e

$$\cos \phi = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \quad (3.20)$$

Quando a diferença de fase, ϕ , não é zero, o deslocamento máximo do oscilador não ocorre ao mesmo tempo que a do campo elétrico.

Derivando no tempo o deslocamento e multiplicando a parte real pela parte real do campo elétrico, encontramos a expressão que representa a taxa instantânea em que o trabalho é realizado:

$$P = \frac{e^2}{m} E_0^2 \frac{\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \{ \cos^2 \omega t \sin \phi + \sin \omega t \cos \omega t \cos \phi \} \quad (3.21)$$

Devido ao fato que os detectores não responderem instantaneamente às altas frequências de radiação visível, iremos nos ater a média temporal de P , cujo o resultado é,

$$\langle P \rangle = \frac{e^2}{2m} E_0^2 \frac{\omega \sin \phi}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}} \quad (3.22)$$

A obtenção desse resultado é baseado no fato que a média temporal do quadrado do cosseno ao longo de um período (ou um número inteiro de períodos) é exatamente $\frac{1}{2}$ e a média do produto do seno e cosseno vale zero. O resultado da equação (3.22) é a taxa W_a na qual a energia retirada do campo eletromagnético incidente é absorvida. Para obter P não nulo, a diferença de fase ϕ deve ser diferente de zero, o que impõe que a dissipação γ seja igualmente distinta de zero.

Sabe-se que $\sin \phi = \frac{\gamma\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2}}$, substituindo essa expressão na

equação (3.22) obtemos,

$$\langle P \rangle = W_a = \frac{e^2}{2m} E_0^2 \frac{\gamma\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \quad (3.23)$$

Esse resultado mostra que a absorção máxima ocorre em ω_0 , comumente conhecida como frequência ressonante.

Reescrevendo a equação (3.23) a fim de deixá-la dependente da frequência temos,

$$\sigma_a = \gamma\sigma_{am} \frac{\gamma\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \quad (3.24)$$

onde σ_{am} seção transversal de absorção máxima. Esse resultado mostra que o coeficiente de absorção está diretamente submetido a frequência de oscilação ω e a dissipação de energia do sistema.

3.3 Espalhamento da Luz

A matéria é formada por cargas elétricas discretas que podem ser excitadas. A luz é um campo eletromagnético oscilante capaz de produzir um movimento oscilatório nas cargas e essas, por sua vez, irradiam ondas eletromagnéticas ao serem aceleradas. Essa irradiação são ondas espalhadas, excitadas por uma fonte externa, a combinação das ondas incidentes e das ondas espalhadas forma o que chamamos de espalhamento da luz.

Então, espalhamento da luz ocorre em um meio óptico composto por inúmeras partículas, que irradiam luz por uma fonte externa e também pela radiação das outras partículas presentes no meio. Esse processo aumenta o número de vezes que a luz é refletida e esse fato interfere na maneira como nossos olhos percebem a natureza, por isso a quantidade de espalhadores

presentes no meio são os responsáveis por definir a coloração de que se observa o mundo natural.

O dipolo é o modelo mais simples de um sistema eletricamente neutro e, por isso, será usado na nossa discussão. Quando um dipolo está na presença de um campo elétrico, ele passa a oscilar na mesma frequência do campo, e, nesse processo, ocorre perda de energia por irradiação. A força nesse caso é proporcional à velocidade, e a equação do movimento de um oscilador amortecido que inclui perda radiativa é escrita como, Bohren (2006, p. 127):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - b \frac{dx}{dt} + w \frac{d^3x}{dt^3} + eE_0 \exp(-i\omega t) \quad (3.25)$$

onde w e b são constantes.

A solução de estado estacionário para a equação é dada por:

$$x = x_0 \exp(-i\omega t) \quad (3.26)$$

A combinação das equações (3.25) e (3.26) resulta na expressão:

$$x_0 = \frac{e}{m_0} \frac{E_0}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}, \quad (3.27)$$

onde

$$\gamma = \gamma_a + \frac{\gamma_s \omega^2}{\omega_0^2} \quad (3.28)$$

e

$$\gamma_a = \frac{b}{m}, \quad \gamma_s = \omega_0 \frac{w}{m}, \quad (3.29)$$

onde γ_a pode ser associado a absorção e γ_s com o espalhamento. Logo, o trabalho realizado pela ação do campo elétrico resultante no dipolo é dado por:

$$\langle P \rangle = \langle P_a \rangle + \langle P_s \rangle \quad (3.30)$$

em que de acordo com a equação (3.23) podemos escrever:

$$\langle P_a \rangle = \frac{e^2}{2m} E_0^2 \frac{\gamma_a \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (3.31)$$

$$\langle P_s \rangle = \frac{e^2}{2m} \frac{E_0^2}{\omega_0^2} \frac{\gamma_s \omega^4}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (3.32)$$

Segue que as equações (3.31) e (3.32) representam respectivamente a capacidade de absorção e espalhamento pelo dipolo. A absorção é uma consequência da dissipação da energia irradiada e o espalhamento é o produto do desvio para todas as direções da radiação incidente. O resultado encontrado para o espalhamento leva em consideração que a frequência da radiação emitida, é igual à frequência da radiação incidente, espalhamento elástico. Para $\omega \ll \omega_0$, ou seja, grandes comprimentos de onda, a equação (3.32) torna-se

$$\langle P_s \rangle \approx \frac{e^2}{2m} \frac{E_0^2}{\omega_0^6} \gamma_s^2 \omega^4 \quad (3.33)$$

A equação (3.33) representa a lei de espalhamento de Rayleigh, que define o espalhamento dos fótons por partículas muito menores que o comprimento de onda. De acordo com a equação (3.33), o espalhamento é proporcional à quarta potência da frequência da radiação incidente. Frequências maiores são mais espalhadas.

Semelhantemente a definição de seção transversal de absorção, pode-se expressar a equação para a seção transversal de espalhamento,

$$W_s = \sigma_s F \quad (3.34)$$

onde W_s é a taxa que a energia do campo eletromagnético é espalhada, o espalhamento não é uniforme em todas as direções, dependendo do tamanho da molécula pode ser mais intenso em determinada direção que em outra, F a radiação do feixe que excita a radiação e σ_s representa a seção transversal de espalhamento, ou seja, é a grandeza responsável por definir a direção do espalhamento, que ora pode ser em todas as direções, ora altamente concentrada em uma direção. Essas possibilidades existem devido à dependência do tamanho da partícula em relação ao tamanho da frequência da onda incidente. Uma partícula suficientemente pequena, produz o efeito de interferência construtiva das ondas emitidas pelos dipolos justamente pela proximidade das cargas e o resultado é um espalhamento em todas as direções. À medida que o tamanho da partícula aumenta, as diferenças de fase entre duas ou mais ondas dipolares também aumentam, possibilitando o fenômeno de interferência construtiva ou destrutiva numa determinada direção. A diferença de

fase entre duas ondas espalhadas depende da direção de espalhamento, e esse deslocamento de fase é dado por Bohren (2006, p. 150):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi r}{\lambda} (1 - \cos\vartheta) \quad (3.35)$$

onde ϑ é o ângulo de espalhamento, ângulo entre as ondas incidentes e as espalhadas, $\cos\Delta\varphi$ representa o resultado do espalhamento produzido pelos dipolos, $1 - \cos\vartheta$ se situa entre 0 (direção pra frente) e 2 (direção pra trás), r é a distância entre as frentes de onda e λ é o comprimento de onda da radiação. Quando a diferença de fase for múltipla de π , a interferência será destrutiva, quando submúltipla de π a interferência será construtiva. Um resultado geral é que quanto maior for a partícula, maior será espalhado na direção pra frente.

3.3.1 Espalhamento Múltiplo da Luz

Um exemplo de espalhamento múltiplo da luz é a cor branca de muitos materiais naturais (tais como as nuvens, sal, neve, etc), que resulta dos vários espalhamentos, em todas as direções, por parte das partículas que os compõem. Por exemplo, observando um único grão de sal é possível notar que esse único grão é transparente, porém um aglomerado de grãos é branco e não transparente. Essa mudança visível é atribuída ao efeito de espalhamento múltiplo da luz.

Outro exemplo é a verificação da variação de cor quando um pedaço de vidro colorido é triturado até ficar bem pequeno, fica notável que os grãos de vidro estão com uma coloração mais clara do que quando estava em tamanhos maiores. De fato, conforme a densidade de partículas cresce o efeito de espalhamento múltiplo da luz fica mais significativo. Assim, para altas densidades de partículas pequenas, há uma tendência para o branco desde que a absorção não seja muito significativa. Um outro efeito bastante curioso é a diferença de cor entre a espuma e o líquido num copo de cerveja, líquido amarelo e espuma branca. A explicação para esse fato está na formação das bolhas, finas camadas de líquido envolvendo o ar, essa composição possui uma

capacidade pequena de absorção prevalecendo o efeito de espalhamento sobre a absorção, o que faz a espuma da cerveja ser branca.

3.3.2 Espalhamento Múltiplo por uma Pilha de Placas Paralelas

Já discutimos que a densidade de partículas espalhadoras influencia na maneira de se observar a natureza, agora apresentaremos um exemplo deste resultado utilizando placas transparentes. O que será visto é que aumenta o número de placas, aumenta também o efeito de reflexão, o que sugere a formação de um espelho através de materiais transparentes.

Considere uma placa transparente com refletividade R_1 e transmissividade T_1 e que sobre a mesma incida uma luz na direção perpendicular. Outra placa idêntica é sobreposta a primeira, logo, sua refletividade R_2 e transmissividade T_2 terão valores diferentes se comparados com a primeira placa.

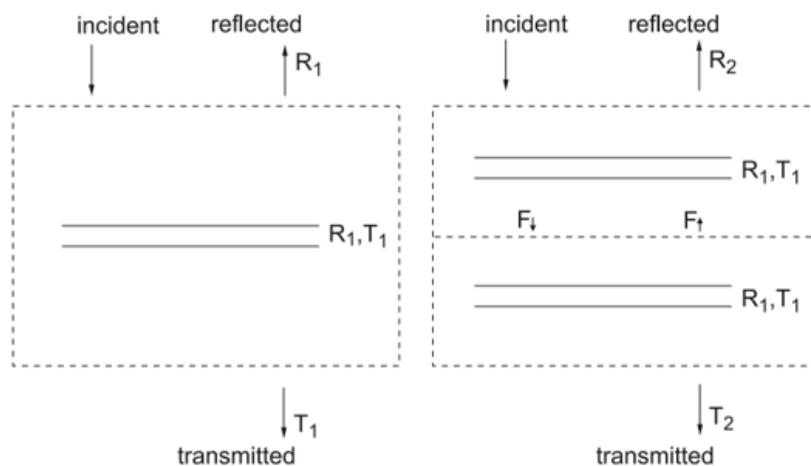


Figura 3.5: Esquema da esquerda representa uma placa uniforme infinita (em extensão lateral) com reflexividade R_1 e transmissividade T_1 . Segue que para duas dessas placas paralelas (esquema da direita), suficientemente distantes (relativas ao comprimento de onda da iluminação incidente) sua refletividade R_2

e sua transmissividade T_2 são consequências das irradiâncias descendentes e ascendentes ($F \downarrow$ e $F \uparrow$) entre elas. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

Para a interpretação desse problema, denotaremos de irradiância descendente (quantidade de luz incidente que pode ser refletida e/ou transmitida) entre duas placas por $F \downarrow$, e a irradiância ascendente (quantidade de luz refletida e/ou transmitida) por $F \uparrow$. Essas duas irradiâncias satisfazem:

$$F \downarrow = T_1 + F \uparrow R_1 \quad (3.36)$$

$$F \uparrow = F \downarrow R_1 \quad (3.37)$$

Combinando as duas equações acima, obtemos

$$F \downarrow = \frac{T_1}{1 - R_1^2} \quad (3.38)$$

$$F \uparrow = \frac{R_1 T_1}{1 - R_1^2} \quad (3.39)$$

A refletividade e a transmissividade da placa 2 dependem das irradiações da primeira placa, então:

$$R_2 = R_1 + F \uparrow T_1 \quad (3.40)$$

$$T_2 = F \downarrow T_1 \quad (3.41)$$

Combinando as equações (3.38), (3.39), (3.40) e (3.41) o resultado é:

$$R_2 = \frac{2R_1}{1 + R_1} \quad (3.42)$$

Pela conservação de energia $R_2 + T_2 = 1$, segue,

$$T_2 = \frac{1 - R_1}{1 + R_1} \quad (3.43)$$

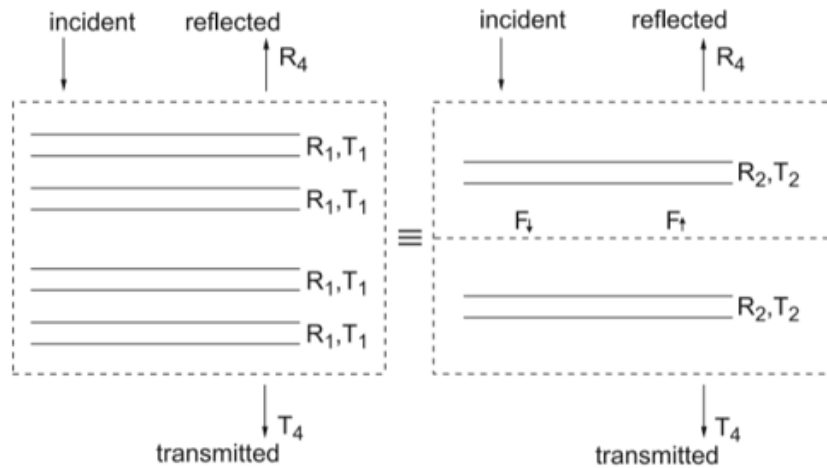


Figura 3.6: Uma pilha de quatro placas paralelas idênticas é equivalente a uma pilha de duas placas compostas. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

Se consideramos as duas placas como uma única placa efetiva, podemos determinar o valor da refletividade e da transmissividade de quatro placas idênticas. Veja:

$$R_4 = \frac{2R_2}{1 + R_2} \quad (3.44)$$

Das equações (3.44) e (3.42), obtemos,

$$R_4 = \frac{4R_1}{1 + 3R_1} \quad (3.45)$$

Pela conservação de energia segue,

$$T_4 = \frac{1 - R_1}{1 + 3R_1} \quad (3.46)$$

Desses resultados deduzimos a refletividade e transmissividade de placas transparentes para qualquer potência de dois ($N = 1, 2, 4, 8, \dots$).

Ou seja,

$$R_N = \frac{NR_1}{1 + (N-1)R_1}, \quad (3.47)$$

$$T_N = \frac{1 - R_1}{1 + (N-1)R_1} \quad (3.48)$$

As equações (3.47) e (3.48) indicam que, se o número de placas do sistema cresce, a refletividade da pilha tende a 1 enquanto que sua transmissividade tende a zero. Isto é, quanto mais placas são adicionadas, mais brilhante será o conjunto na reflexão, até atingir um ponto de diminuir os retornos, em que a adição de outra transparência não produz um aumento considerável.

A figura 3.7 apresenta um gráfico da refletividade em função do número de placas, cada curva apresenta um material de diferente refletividade. Nota-se que para materiais de alta refletividade a curva tende a 1 mais rápido do que com um material de baixa refletividade.

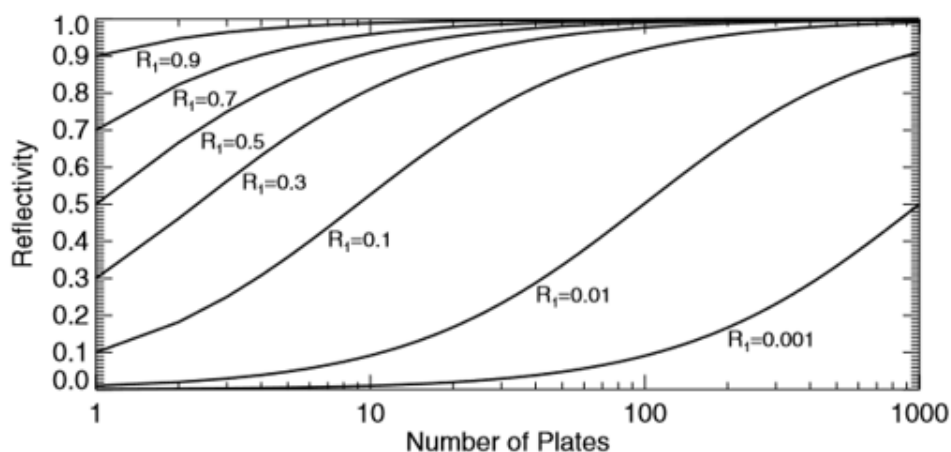


Figura 3.7: O efeito cumulativo de muitas placas refletindo fracamente é idêntico ao de poucas placas altamente refletoras. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

Até o momento não consideramos a ação da absortividade (capacidade de absorção da luz pela matéria) das placas. O efeito da refletividade e transmissividade quando as lâminas são absorventes é relevante pois a absorção está sempre presente na prática. Ao incluir a absorção das folhas transparentes, verificamos que o brilho do sistema será menor do que no estudo das lâminas não absorventes. Contudo, à medida que o número de placas aumenta a refletividade total do sistema continua tendendo a um valor finito, mas este valor só é 1 quando a absortividade é nula.

As equações que expressam a refletividade e transmissividade para placas absorventes são dadas por, Bohren (2006, p. 246):

$$R'_N = R_N \left[1 + \frac{T_N^2}{1 - R_N^2} \right], \quad (3.49)$$

$$T'_N = \frac{T_N^2}{1 - R_N^2}, N = 1, 2, 4, 8, \dots \quad (3.50)$$

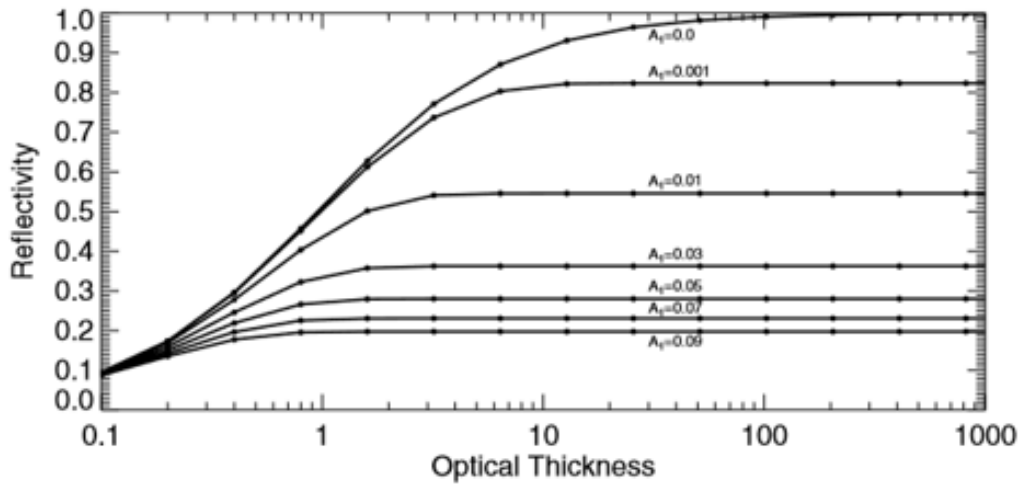


Figura 3.8: Placas de mesma refletividade R_1 , mas com absorvidade distintas.
Fonte: Bohren e Clothiaux (2006).

A figura 3.8 mostra como se comportam pilhas de lâminas transparentes com refletividades iguais, mas com valores desiguais na absorvidade. Percebe-se que a refletividade do sistema cresce para grandes espessuras ao passo que a absorvidade decresce, mas não proporcionalmente.

Vemos, que o brilho de uma pilha de lâminas transparentes depende de três variáveis, a saber, refletividade, absorvidade e transmissividade. Essas grandezas estão inseridas numa quantidade conhecida como albedo de espalhamento único, cuja equação é dada por,

$$\varpi = R_1 + T_1 = 1 - A_1 \quad (3.51)$$

Essa nova grandeza está relacionada com a quantidade de luz que não é absorvida, quanto é refletida e transmitida. Essa discussão depende de um parâmetro de assimetria, g , que permite determinar os efeitos de transmissão e

reflexão da luz não absorvida. Para a luz refletida, sua direção é alterada em 180° e para a luz transmitida sua direção não é alterada, o parâmetro g na incidência normal é definido em uma dimensão como,

$$g = \frac{T_1}{T_1 + R_1} \cos(0) + \frac{R_1}{T_1 + R_1} \cos(\pi) = \frac{T_1 - R_1}{T_1 + R_1} \quad (3.52)$$

O parâmetro de assimetria está entre 1 (máxima transmissividade) e -1 (máxima refletividade).

3.3.3 Livre Caminho Médio

O livre caminho médio é interpretado como a distância que o fóton percorre antes de ser absorvido ou espalhado em média. Esse conceito é determinante para a atenuação da luz em um meio óptico, uma vez que quanto menor for essa distância mais rapidamente a intensidade da luz decai. Fótons obedecem a leis estatísticas, então para determinarmos o livre caminho médio utilizaremos o artifício estatístico que descreve o comportamento de muitos fótons.

A probabilidade de um fóton ser absorvido entre x e $x + \Delta x$ é dada pela integral da função de distribuição de probabilidade $p(x)$,

$$\int_x^{x + \Delta x} p(x) dx \quad (3.53)$$

A probabilidade de um fóton não ser absorvido na posição x é representado pela exponencial $\exp\{-kx\}$, e a probabilidade de não ser absorvido entre $x + \Delta x$ é $\exp\{-k(x + \Delta x)\}$. Portanto, a probabilidade de ser absorvido no intervalo Δx é dado por,

$$\int_x^{x + \Delta x} p(x) dx = \exp\{-kx\} - \exp\{-k(x + \Delta x)\}. \quad (3.54)$$

De acordo com o teorema do valor médio para integrais, o cálculo da equação (3.54) é

$$\bar{p}(x)\Delta x = \exp\{-kx\} - \exp\{-k(x + \Delta x)\}. \quad (3.55)$$

Dividindo ambos os lados da equação por Δx e fazendo Δx tender a zero, obtemos

$$p(x) = -\frac{d}{dx} \exp\{-kx\} = k \exp(-kx) \quad (3.56)$$

Assim, a distância média que um fóton leva pra ser absorvido é dada por:

$$\langle x \rangle = \int_0^{\infty} x k \exp(-kx) dx = \frac{1}{k} = l_a \quad (3.57)$$

Esse resultado mostra que o livre caminho médio para a absorção é o inverso do coeficiente de absorção do meio óptico. A atenuação também ocorre nos casos de espalhamento, isto é, sempre que um fóton é removido de um feixe e espalhado em qualquer direção. E, portanto, também pode-se pensar em livre caminho médio para o espalhamento. Considere que o coeficiente de espalhamento seja representado por β , semelhantemente ao caso da absorção o livre caminho médio por espalhamento será $\frac{1}{\beta}$. E, como não existe um meio óptico que apresenta apenas um desses efeitos, espalhamento ou absorção, o resultado final da atenuação luminosa é dado por:

$$l_t = \frac{1}{k + \beta}, \quad (3.58)$$

Onde

$$\frac{1}{l_t} = \frac{1}{l_a} + \frac{1}{l_s} \quad (3.59)$$

O coeficiente de absorção k e o coeficiente de espalhamento β são quantidades fundamentais na teoria da transferência radiativa, e seus valores podem ser obtidos experimentalmente.

3.3.4 Mudança de Fase no Espalhamento

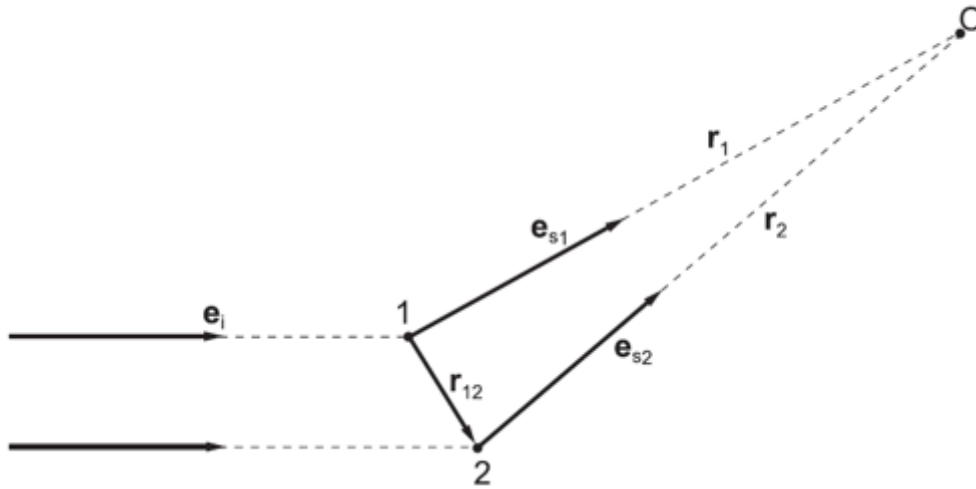


Figura 3.9: Esquema de dois dipolos, 1 e 2, sendo iluminados por uma mesma fonte de luz. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

Os pontos 1 e 2 representados na figura 3.9 são dois dipolos idênticos iluminados por uma onda plana monocromática. A direção da onda incidente é indicada por e_i ; e_{s1} e e_{s2} descrevem as direções das ondas espalhadas; r_{12} retrata a posição do dipolo 2 em relação ao dipolo 1; e O é o ponto de observação. A diferença de fase entre as ondas espalhadas é fixa e depende da separação entre os dipolos, do comprimento da fonte de iluminação e do ponto de observação. Em O , o campo disperso total é a superposição dos campos dispersos pelos dois dipolos a uma distância fixa r_{12} .

Caso a amplitude complexa da onda incidente em 1 for a , em 2 será $a \exp(ik e_i \cdot r_{12})$. Sendo a amplitude de cada onda espalhada proporcional à amplitude da onda que a excita, as duas ondas espalhadas em O são dadas por,

$$\psi_1 = a \exp(ik e_{s1} \cdot r_1), \quad (3.60)$$

$$\psi_2 = a \exp(ik e_i \cdot r_{12} + ik e_{s2} \cdot r_1 - ik e_{s2} \cdot r_{12}) \quad (3.61)$$

onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ qualifica o número de onda e $r_2 = r_1 - r_{12}$.

À medida que a distância do ponto de observação aumenta, $|\vec{d}| \gg |\vec{r}_{12}|$, $e_{s2} \rightarrow e_{s1} = e_s$, e a diferença de fase entra as ondas é descrita como,

$$\Delta\varphi = k(e_i - e_s) \cdot r_{12} = \frac{2\pi}{\lambda}(e_i - e_s) \cdot r_{12} \quad (3.62)$$

Seguem alguns resultados importantes oriundos da equação (3.62),

1. Para $\Delta\varphi = 0$, espalhamento é em fase ocasionando interferências construtivas e conseqüentemente espalhamento em todas as direções.
2. Para $\Delta\varphi \geq \pi$, surgimento de interferências destrutivas em direções específicas.
3. Para uma um corpo de dimensões pequenas comparada com o comprimento de onda da radiação incidente, todos os espalhamentos dos dipolos constituintes estão em fase e, portanto, o espalhamento em qualquer direção por N espalhamentos é N^2 vezes o espalhamento de apenas um. Sabe-se que o número total de dipolos é proporcional ao volume v da partícula, logo a potência total espalhada por uma partícula é equivalente ao v^2 .
4. Na mudança de fase podemos considerar o caso específico de dois dipolos paralelo a onda incidente, ou melhor, $r_{12} = r_{ei}$. Para tal, tem-se,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi r}{\lambda}(1 - \cos \vartheta), \quad (3.35)$$

onde ϑ é o ângulo formado entre as ondas incidentes e as espalhadas.

5. A quantidade $1 - \cos \vartheta$ fica entre 0 (direção para frente) e 2 (direção para trás)
6. Para $\Delta\varphi = 0$, direção de espalhamento para frente.
7. Para $\Delta\varphi = \frac{4\pi r}{\lambda}$, direção de espalhamento é para trás. Para múltiplos ímpares de π , a interferência é destrutiva. Para múltiplos pares de π , a interferência é construtiva.

8. À medida que $\frac{r}{\lambda}$ aumenta, aumenta também o espalhamento em função do ângulo. Isto é, à medida que uma molécula expande seu tamanho em relação ao comprimento de onda, o espalhamento acontece em fase na direção pra frente, independentemente da separação entre os dipolos. Um resultado importante é que o espalhamento pra frente aumenta mais rapidamente com tamanho do espalhador do que o espalhamento em qualquer outra direção.

Capítulo 4

Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas

A Óptica representa um grande campo de estudo da Física com grande variedade de aplicações no cotidiano. O significado da palavra sugere obter informações sobre o comportamento da luz com a matéria e seus efeitos. Porém, o ensino de óptica no ensino médio está tipicamente limitada ao estudo da óptica geométrica. Essa afirmação é facilmente comprovada quando consultamos os

livros didáticos de Física para o Ensino Médio. Os conteúdos encontrados nos mesmos não contemplam assuntos como extinção, absorção e espalhamento múltiplo da luz. A explicação de vários fenômenos presentes no nosso cotidiano como o céu azul, a cor branca da neve, açúcar, sal, espumas, a escuridão no fundo do mar, tom azulado do gelo, areia molhada mais escura que areia seca, dentre outros, tipicamente não é abordada em salas de aula do ensino médio.

Diante deste cenário, o presente trabalho pretende explorar ramos da Óptica com pouca visibilidade na sala de aula proporcionando aos docentes um conjunto de experimentos de baixo custo a fim de investigar vários efeitos luminosos interessantes e envolvendo os estudantes de forma ativa e participativa. O avanço científico e tecnológico têm proporcionado acesso a uma variedade de ferramentas que podem contribuir para a produção de aulas práticas enriquecendo o processo de ensino-aprendizagem. O *smartphone* é um excelente instrumento para fins educacionais, porque possui uma variedade de sensores acessíveis à maioria dos discentes. Ao considerar a viabilidade dos usos de *smartphones* e *tablets* em sala de aula, Vieira (2013, p. 10) destaca que:

A diversidade de sensores encontrados em *smartphones* e *tablets* torna possível realizar um grande número de experimentos e observações sem a utilização de sistemas externos de aquisição de dados. Mais ainda, a extrema portabilidade dos aparelhos facilita a montagem de experimentos em salas de aulas regulares, dispensando em muitos casos o deslocamento dos alunos a um laboratório (que pode nem existir na escola).

Neste capítulo, descrevemos os fenômenos luminosos investigados, as propostas experimentais que foram elaboradas e a combinação e análise desses experimentos para a discussão dos conceitos físicos presentes na propagação da luz em meios complexos. As práticas abordadas aqui não seguem uma sequência didática e, portanto, são independentes e podem ser aplicadas como o professor desejar.

Os experimentos expostos nessa seção têm como foco a discussão pedagógica, ou seja, não nos preocuparemos com a descrição do aparato experimental; esse detalhamento está presente no capítulo 5 do livro *Fundamentals of Atmospheric Radiation*, de Bohren e Clothiaux (2006) e em *Clouds in a Glass of Beer—Simple Experiments in Atmospheric Physics*, de Bohren (2001).

4.1 Fenômenos Ópticos

4.1.1 Cores do Céu

O céu pode ser considerado uma grande tela de pintura em constante mudança, ora é muito azul, cinza, vermelho-alaranjado, com nuvens, sem nuvens, com a presença do Sol e também da Lua e as estrelas. Mesmo sendo tão comum a observação no cotidiano, muitas e muitas vezes somos fascinados pelas composições de cores e de formas diante dos nossos olhos. Essas observações nos instigam a querer compreender a causa dessas colorações.

Todas essas variações de cor e brilho observadas no céu ocorrem devido à presença de moléculas e partículas na atmosfera. A interação desses corpúsculos atmosféricos com a luz visível transmitida pelo Sol produz efeitos de espalhamento e absorção da luz. Isto é, determinados comprimentos de onda, quando incidem sobre as partículas são mais espalhados ou absorvidos que outros comprimentos de onda, e esse efeito é responsável pelo domínio de determinada cor. A remoção da energia do feixe incidente pode ocorrer tanto por absorção, resultando na dissipação da energia quanto por espalhamento em direções diferentes da direção inicial. A combinação dos processos de absorção

e espalhamento de luz resulta no que chamamos de extinção da luz. Para simplificação da discussão, iremos considerar nesta seção que a extinção é dominada pelo espalhamento, ou seja, o processo de absorção não será considerado nesta discussão. No capítulo 3, analisamos a conexão entre o comprimento de onda e o tamanho do espalhador. Vimos que os comprimentos de onda correspondentes a luz violeta e azul são mais espalhados do que o vermelho, porque as partículas que participam do processo de espalhamento possuem dimensões pequenas quando comparados aos comprimentos de onda da luz visível, o que caracteriza o espalhamento de Rayleigh, (Krapas e Santos 2002). A combinação desse fator somado à sensibilidade do olho humano (mais sensível ao azul do que ao violeta) geram a percepção do azul do céu que é visto na maior parte do dia. O fato de termos no nascer e pôr do Sol tom avermelhado é explicado pelo caminho óptico percorrido por cada frequência da luz visível. Sabe-se que o vermelho é o menos espalhado e, portanto, o mais transmitido. Logo, pra uma espessura atmosférica grande o vermelho será o mais transmitido enquanto que as outras frequências são extintas. Tanto no amanhecer quanto no entardecer, a luz se propaga por uma distância maior na atmosfera do que nos outros instantes do dia e, por essa razão, o céu se apresenta vermelho nesses horários.

Sempre que imaginamos o céu ensolarado também vem à mente a presença de grandes nuvens brancas. A presença das nuvens no nosso dia a dia é tão evidente que esse elemento é objeto de estudo logo nas séries iniciais dos discentes e, no decorrer do ensino básico, o estudante será exposto a explicações sobre o processo de formação das nuvens mais de uma vez. Portanto, esse conhecimento é garantido para qualquer estudante. O que não é discutido é a questão da coloração da nuvem, o motivo de ser branca, ou a explicação para o tom cinza em dias frios.

O branco da nuvem é na maioria das vezes explicado como sendo o fruto do múltiplo espalhamento que a luz visível sofre ao atravessar um aglomerado de partículas que compõe a estrutura da nuvem. Mas espalhar todos os comprimentos de onda igualmente não é suficiente para a formação do branco. Se essa teoria fosse suficiente para explicar o branco o copo de leite seria azul,

pois as partículas de leite espalham mais azul do que os outros comprimentos de onda, contudo isso não é verificado. Portanto, existem outros conceitos envolvidos nesse processo da formação do branco, a saber, o fato da nuvem ser opticamente espessa e fracamente absorvente. Por opticamente espesso, entende-se um meio com pequeno livre caminho médio em relação ao tamanho do sistema (ver seção 3.3.3). E fracamente absorvente está relacionado com a pequena dissipação no meio. Então, a formação de branco que vemos nas nuvens, no açúcar, no sal, no trigo, no leite, na neve e em outros elementos está relacionado com a combinação dos fatores citados acima. Um livre caminho médio pequeno e pouca absorção para a luz produz múltiplos espalhamentos e a formação da cor branca.

A mudança do branco para o cinza na coloração das nuvens em dias frios ou chuvosos também é pouco discutida na área de ensino, e por isso iremos tratá-lo aqui. Nesse contexto, podemos pensar que a extinção que provoca o escurecimento das nuvens está relacionada com a absorção, isto é, o meio óptico mudou e estão presentes uma quantidade relevante de partículas absorventes e por isso ocorre essa diminuição da intensidade de espalhamentos para formar o cinza. Porém, essa afirmação é desmentida quando observamos as nuvens por cima numa viagem de avião. As nuvens são brancas e brilhantes, diferentes da visão do solo. A conclusão imediata é que ocorreu uma mudança na direção do espalhamento e pouca luz é transmitida para quem encontra-se no solo. Esse desfecho possui explicação no conceito de espalhamento direcional (ver seção 3.3), pois essa grandeza define se o espalhamento ocorrerá em todas as direções ou concentrada em uma direção. No frio ou chuva, as partículas que formam as nuvens são maiores do que em dias ensolarados. Um espalhador pequeno, produz o efeito de interferência construtiva das ondas emitidas pelos dipolos justamente pela proximidade das cargas e o resultado é um espalhamento em todas as direções. À medida que o tamanho do espalhador aumenta, os multipolos eletromagnéticos de ordem superior passam a contribuir para o espalhamento, possibilitando o fenômeno de interferência construtiva ou destrutiva numa determinada direção, de modo que o espalhamento é preferencialmente direcionado para frente.

4.1.2 Cores da Neve

Sabemos que a neve em geral apresenta coloração branca e o processo que causa essa cor é semelhante ao das nuvens estudado na seção anterior. Contudo, é possível observar um tom azulado em algumas estruturas de gelo encontradas na natureza, como por exemplo, as cachoeiras congeladas e glaciares, figura 4.1.



Figura 4.1: Cachoeiras congeladas. Minnehaha Falls, Estados Unidos.

A explicação para essa manifestação óptica está relacionada com a espessura do meio, um meio óptico composto por pouco espalhamento e muita absorção. O tom azulado aparece nas camadas finas de gelo, isso porque o espalhamento depende da distância entre as moléculas. O gelo com tonalidade azul é composto de bolhas de ar e por consequência ocorre um aumento no espaçamento entre os espalhadores, isto é, o livre caminho médio percorrido pelo fóton é maior e, portanto, a quantidade de luz espalhada será menor. Além disso, a probabilidade de um fóton ser absorvido quando incide uma única vez numa bolha aumenta quando o tamanho dos espalhadores aumenta e o gelo possui absorção mínima para o comprimento de onda da luz azul e é mais

absorvente para a luz vermelha. O tom azulado de uma cachoeira de neve é devido à composição do meio óptico, pouco espalhamento e alta absorção, principalmente para o vermelho.

Durante esse processo os comprimentos de onda maiores (vermelho), são mais facilmente absorvidos e o espalhamento é mais relevante para os comprimentos de ondas curtos (azul). Desse modo, a luz azul será mais transmitida numa camada fina de gelo do que as outras faixas do visível, resultando o tom azulado de muitas estruturas de gelo.

Esse fenômeno muitas vezes é explicado usando como base teórica o conceito do espalhamento de Rayleigh, porém esses fundamentos são erroneamente aplicáveis. Sabe-se que o comprimento de onda correspondente ao azul é o mais espalhado na atmosfera e o menos transmitido, percorrendo uma distância atmosférica pequena a cor azul sobressai. Para uma distância grande o vermelho se sobressai, pois é o mais transmitido e o menos espalhado.. Mas, essa ideia não é observada na neve, pois quando os fótons se deslocam por uma camada fina de neve, como o gelo espumante, o azul é evidente. Contudo, quando se transita um caminho maior, como numa caverna de gelo, o azul continua sendo mais espalhado e não o vermelho como esperado pela lei de Rayleigh.

4.1.3 Espuma Branca

Nessa parte do capítulo, iremos expor a explicação para a cor branca da espuma, muito comum de vermos na água da praia, em produtos de limpeza e em certas bebidas como cerveja e refrigerante.

A espuma é caracterizada por um meio formado por bolhas finas de líquido ao redor do ar. A bolha tem a mesma capacidade de espalhar os fótons que uma gota feita do mesmo material líquido e com o mesmo tamanho, a diferença é que a capacidade de absorção da bolha é muito menor em comparação com a gota. Dessa forma, o meio óptico encontrado na espuma é

favorável à formação da coloração branca, pois o espalhamento é muito maior que a absorção.

4.1.4 Escuridão no Fundo do Mar

Muitas pessoas já tiveram a oportunidade de mergulhar alguns metros de profundidade dentro do mar, e puderam constatar um conhecimento comum, que é menor luminosidade a certas profundidades, mesmo num dia muito ensolarado com abundância de luz na superfície. O principal motivo para a extinção da luz neste caso é o predomínio do mecanismo de absorção relativamente ao espalhamento e, por consequência, os fótons incidentes são rapidamente absorvidos, diminuindo exponencialmente a intensidade da luz com o aumento da profundidade, Lei de Lambert.

4.1.5 Areia Molhada

Nessa seção, discutiremos uma manifestação óptica muito interessante e que com certeza já foi contemplada por muitos. A diferença de brilho da areia seca para a areia molhada. Ninguém tem dúvida em dizer que a areia molhada é mais escura que a areia seca, mas decerto poucas pessoas foram esclarecidas sobre as razões desse efeito.

Já sabemos que, dependendo do tamanho do espalhador, o fóton pode ser preferencialmente espalhado numa direção específica. Partículas com tamanho reduzido em confronto ao comprimento de onda da luz incidente espalham em todas as direções (ângulo médio de espalhamento 90°) e espalhadores maiores que o comprimento de onda da luz incidente tendem a espalhar numa direção preferencial (ângulo médio de espalhamento menor que 90°).

A figura 4.2 ajuda a entender a importância do ângulo que o raio de luz incidente faz com o raio de luz espalhado. Na imagem da esquerda, o ângulo

formado entre os raios é de 90° , e o caminho produzido por essa abertura é muito simples, e a luz rapidamente emerge. Na ilustração da direita, o ângulo entre os raios é menor que 90° e podemos verificar que a trajetória que os raios percorrem até emergir é muito maior.

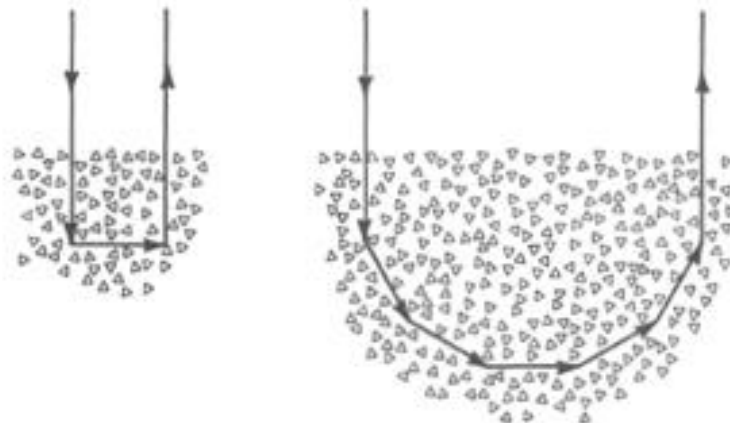


Figura 4.2: Dois possíveis caminhos que a luz pode seguir ao atravessar um meio óptico. Ilustração da esquerda, ângulo entre o raio incidente e o disperso é de 90° e na direita é menor que 90° . Essa diferença é relevante porque produz percursos distintos. A escolha do caminho é meramente ilustrativa, existem outras possibilidades. **Fonte:** Bohren (2001)

Como resultado desses caminhos ópticos distintos, é mais fácil a luz ser absorvida na segunda configuração do que na primeira, pois há mais colisões com centros espalhadores, intensificando as chances de absorção do fóton. Esse fator é uma propriedade importante para a definição do brilho de um corpo. Para uma quantidade significativa de eventos de espalhamento, um fóton fica mais suscetível a absorção. Como decorrência deste efeito a areia tem menor brilho. Para o contrário, o efeito é de maior brilho.

Além da influência do tamanho dos espalhadores e/ou absorvedores, outro aspecto que precisa ser considerado é o meio óptico circundante, no caso da areia seca, o ar, e da areia úmida, a água. Quando o fluido circundante possui um índice de refração muito próximo dos índices de refração das partículas de areia o espelhamento da luz dentro do sistema é menor, porque o meio está mais

homogêneo desviando pouco o raio luminoso, ou seja, o caminho óptico para a luz emergir é muito maior. Por isso, a areia molhada é mais escura. Essa homogeneização do meio gera um espalhamento preferencialmente na direção frontal, diminuindo ainda mais o brilho das partículas. Por este motivo, temos que quanto maior for a diferença entre os índices de refração do meio circundante e os índices de refração do espalhador, maior será o brilho do corpo.

Observação: Além da areia esse fenômeno pode ser observado em outros meios porosos, como cortiça, madeira, cimentos, cerâmicas e etc.

4.1.6 Garrafas Partidas

A figura 4.3 mostra pedaços de vidro com tamanhos diferentes. Os pedaços maiores são verdes escuros e os bem pequenos são verdes claros. Essa distinção de cores está diretamente relacionada com o tamanho do grão de vidro. À medida que a dimensão diminui a área de seção transversal de absorção também diminui, atenuando a capacidade de absorção dos grãos, pois a absorvidade da molécula está relacionado com o tamanho. O espalhamento por cada partícula também decai, porém o decaimento da absorção é mais rápido do que o espalhamento, resultando numa coloração cada vez mais clara.



Figura 4.3: pedaços de vidro

4.1.7 Pilha de Placas Paralelas e Transparentes

Um resultado muito instigante, é notado quando empilhamos uma quantia de placas transparentes. A intensidade de brilho é muito maior num conjunto de lâminas do que quando se tem apenas uma, figura 4.4.

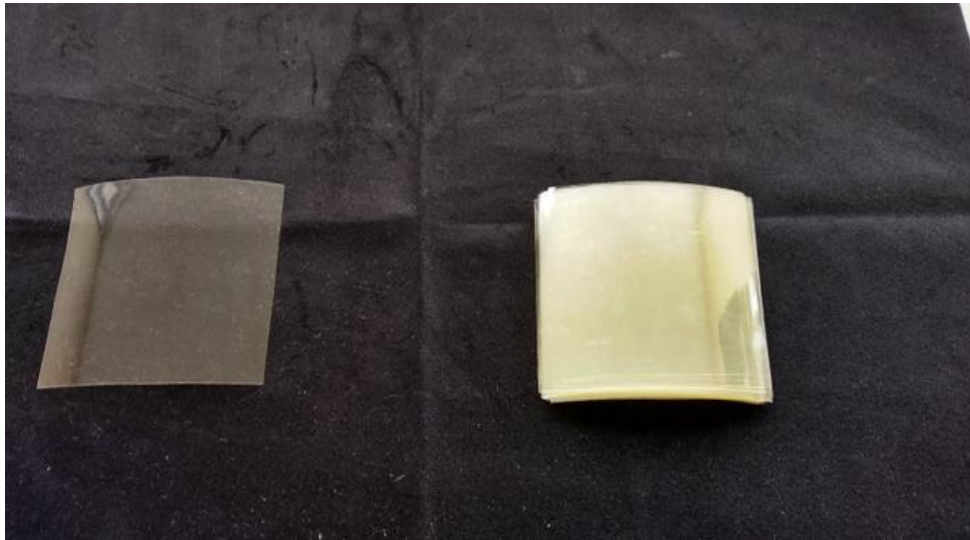


Figura 4.4: brilho de uma lâmina transparente versus brilho de 50 lâminas transparentes.

À medida que placas são adicionadas o conjunto torna-se cada vez mais brilhante, até alcançar um ponto em que a junção de outra transparência não fornece uma expansão significativa no brilho. Outra informação relevante é a individualidade dos materiais transparentes usados, uma vez que, cada um terá um poder de reflexão e absorção específicos. E essas qualidades são responsáveis por definir a espessura óptica da pilha, ou seja, um número pequeno de transparências, mas com refletividade alta apresenta comportamento semelhante a um número grande de transparências, mas de material de baixa refletividade. O gráfico exibido na figura 3.7 mostra esse efeito.

Quando a luz incide sobre uma placa, esquema da esquerda da figura 3.5, parte da luz é refletida e outra parte é transmitida. A estrutura da direita da figura mostra o raio incidente, refletido e transmitido em duas placas. Nota-se que onda transmitida pela primeira placa é a incidente da segunda e, portanto, parte dessa

onda será transmitida para o meio e outra será refletida. O raio refletido na segunda placa atingirá a primeira placa e novamente parte dele será transmitido e outra parte refletido. Logo, é natural concluir que a primeira placa sempre refletirá uma quantidade de luz maior que as placas inferiores, porque cada lâmina inferior emitirá uma porção de luz que será transmitida ao início. Também é preciso levar em consideração a porção de energia que será absorvida durante o processo, de modo que os raios serão menos intensos a cada camada. À medida que o número de placas aumenta, a refletividade continua aumentando, até atingir um ponto de diminuir a luz espalhada, neste ponto, a adição de outra transparência não produz um aumento considerável da luz transmitida.

4.1.8 Lei de Lambert-Beer

Lei de Lambert

À medida que a luz atravessa um meio óptico sua intensidade luminosa diminuiu exponencialmente enquanto a espessura do meio óptico aumenta. Esse enunciado descreve a observação feita por Lambert (1870) sobre a transmissão de luz ao atravessar um meio. Esta lei é matematicamente expressa como, (vide derivação na seção 3.2.1)

$$I = I_0 e^{-\alpha l}, \quad (4.1)$$

onde I representa a intensidade da luz transmitida, I_0 a luz incidente, α o coeficiente de extinção e l o comprimento do meio.

O coeficiente de extinção pode ser determinado experimentalmente e depende das partículas espalhadoras e do comprimento de onda da luz incidente, possuindo dimensão correspondente ao inverso do comprimento

Lei de Beer

Segundo os estudos desenvolvidos por Beer (1852), a intensidade luminosa que incide sobre uma solução sofre alterações quando a concentração da mesma é alterada. Ou seja, se a concentração tiver um aumento linear a luminosidade decai exponencialmente. Essa ideia é expressa a seguir,

$$I = I_0 e^{-\gamma c}, \quad (4.2)$$

onde I representa a intensidade da luz transmitida, I_0 a luz incidente, γ o coeficiente de extinção e c a concentração do meio absorvente.

4.2 Experimentos

Seguem os experimentos com fins didáticos baseadas nos conceitos discutidos acima. As práticas são baseadas nos livros *Fundamentals of Atmospheric Radiation*, de Bohren e Clothiaux (2006) e *Clouds in a Glass of Beer—Simple Experiments in Atmospheric Physics*, de Bohren (2001). Foram elaboradas com o objetivo de explorar a participação dos discentes no processo de construção do conhecimento.

Acreditamos que as atividades práticas são capazes de estimular o desenvolvimento da criatividade, da curiosidade e da capacidade de refletir criticamente despertando no aluno o interesse em conhecer a ciência e em aprendê-la através da própria vivência.

Para Moreira (1999), existem práticas educacionais que se baseiam nas ideias de desenvolvimento cognitivo de Jean Piaget, que afirmam que a mente humana está sempre aumentando seu grau de organização interna e de adaptação ao meio e, ao originar desequilíbrio, busca por uma reestruturação, com a finalidade de se estabelecer novamente o equilíbrio. Portanto, nesta teoria, educar significa apresentar situações de desequilíbrio para que o

educando encontre caminhos que o permitam alcançar respostas que refaçam o equilíbrio do seu sistema cognitivo. Uma prática educacional que se encaixa a esse modelo cognitivo é o uso de experimentos abertos para a investigação de um conceito científico, ou seja, atividades que possibilitam a existência de uma problematização contextualizada ao ambiente dos alunos e o estabelecimento de questões que estimulem o raciocínio e a compreensão do fenômeno.

No decorrer das aulas experimentais, buscamos envolver ao máximo a participação dos alunos. Para tal, utilizamos o método científico, isto é, os alunos realizaram previsões a partir da elaboração de perguntas, construíram hipóteses, observaram a experimentação, confrontaram e por fim a conclusão a respeito do conceitos científicos presentes nos fenômenos.

Os roteiros das atividades estão presentes no apêndice B.

Atividade 1: Explorando a Lei de Lambert-Beer

Nessa seção, discutiremos o experimento proposto para a averiguação da Lei de Lambert-Beer. O aparato utilizado na prática está representado na figura 4.7. O intuito é realizar medidas que mostrem o decaimento da intensidade luminosa à medida que a profundidade aumenta e também quando a concentração de partículas absorvente se intensifica. Para esse fim, um aparelho *smartphone* com o luxímetro (instrumento composto de sensores capazes de medir a intensidade luminosa) ativo é colocado abaixo do recipiente (ver figura 4.7) para fazer a leitura da quantidade de luz (lanterna de um segundo *smartphone*) e de suas variações de acordo com as mudanças feitas no meio óptico. Os experimentos foram realizados com mistura de água e tinta preta e, portanto, o processo de extinção da luz é dominado pelo mecanismo de absorção.

Motivação: Por que para alguns metros de profundidade no mar a intensidade da luz é baixa?

Objetivos da atividade:

- Verificar o decaimento exponencial da intensidade luminosa com o comprimento;
- Verificar o decaimento exponencial da intensidade luminosa com a concentração;
- Discutir a curva exponencial.

Lei de Lambert

De acordo com a Lei de Lambert, a intensidade da luz ao atravessar um meio óptico diminui exponencialmente à medida que a profundidade aumenta. Então, para verificar experimentalmente esta lei, depositamos quantidades iguais de mistura de água com tinta preta, correspondente a uma altura de 1 cm do recipiente e, a cada acréscimo do composto, um novo registro era feito.



Figura 4.5: Aparato experimental utilizado para a verificação da Lei de Lambert-Beer.

A proposta é fazer com que os discentes colem os dados e depois marquem os pontos numa área quadriculada, para, à vista disso, analisarem o tipo de curva que foi medida. Essa atividade foi iniciada com a exposição conceitual da Lei de Lambert-Beer e os resultados foram empregados para

comparar com a teoria. Mas o caminho inverso também é possível, ou seja, realizar primeiro a prática para assim conduzir os alunos ao entendimento do decaimento exponencial da luz.

O resultado dessa atividade está registrado no gráfico da figura 4.8. Esses dados representam a média de cinco amostras e fazem parte da análise desenvolvida pela pesquisa, e não constituem as informações coletadas pelos educandos.

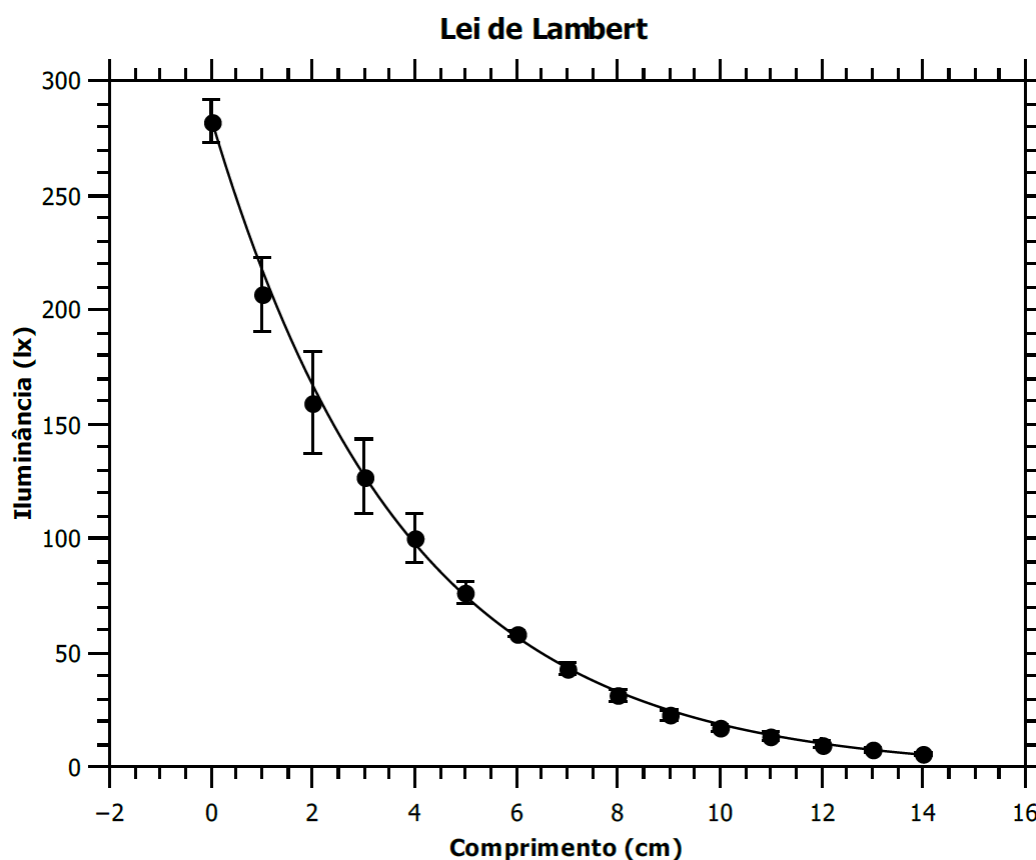


Figura 4.6: Gráfico da iluminância (grandeza que mede a intensidade do feixe de luz) versus o comprimento. A unidade de medida da iluminância é o Lux (lx) que corresponde ao lm/m^2 .

O gráfico foi gerado no programa de análise, QtiPlot, onde foi feito o ajuste da exponencial,

$$Y = A \cdot \exp(-x_1/t) + C, \quad (4.3)$$

onde A representa a luminosidade incidente, x_1 o comprimento, t é o livre caminho médio percorrido pela luz e C a luz de fundo.

Os parâmetros de ajuste da equação 4.3 são,

$$A = (285 \pm 5) \text{ lx}$$

$$t = (3,79 \pm 0,06) \text{ cm}$$

$$C = (-1,9 \pm 0,5) \text{ lx}$$

De acordo com a análise gráfica o livre caminho médio do meio óptico apresentado no experimento é 3,8 cm, ou seja, distância típica que cada fóton percorre antes de ser absorvido.

Os procedimentos para análise de Beer são análogos ao experimento de Lambert, com a diferença que é a concentração do meio que aumenta linearmente.

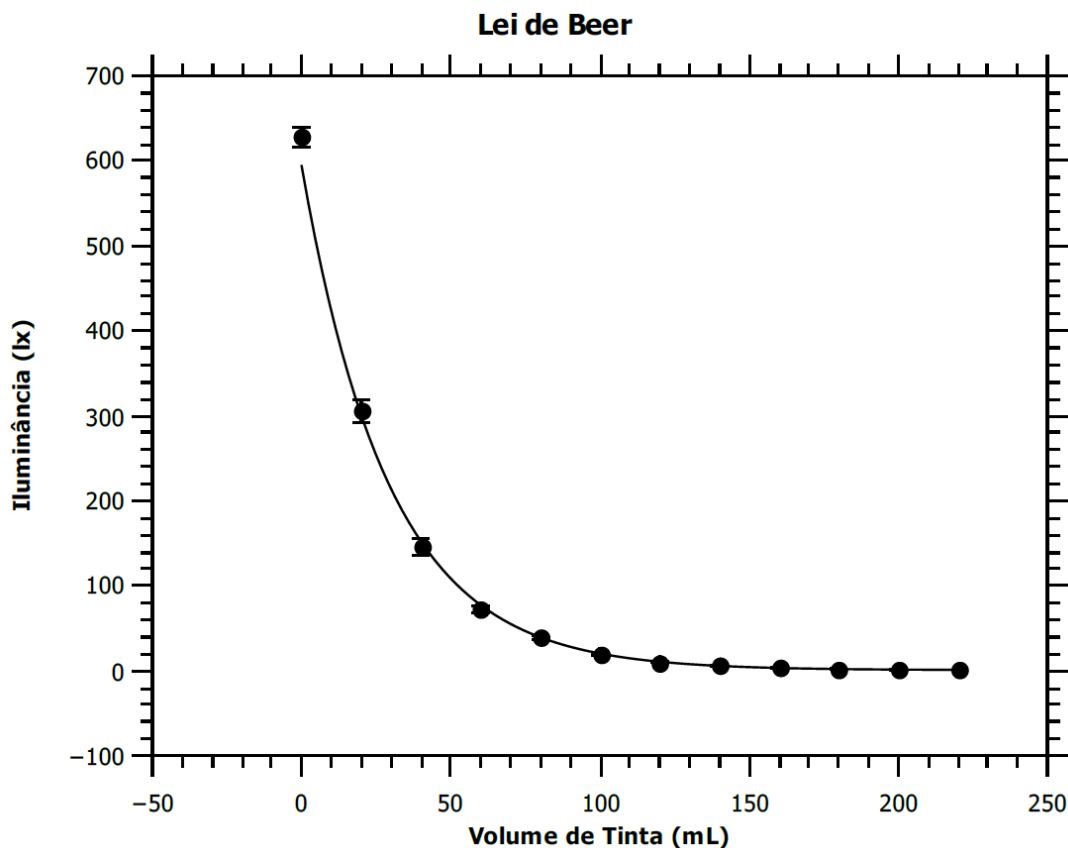


Figura 4.7: Gráfico da iluminância versus volume de tinta.

$$Y = A \cdot \exp(-x_2/t) + C, \quad (4.4)$$

onde A representa a intensidade luminosa incidente, x_2 volume de tinta, t parâmetro de extinção e C a luz de fundo.

A coleta de dados e a análise do QtiPlot, resultaram nos seguintes valores para as variáveis da equação 4.4,

$$A = (593 \pm 16) \text{ lx}$$

$$t = (29,3 \pm 0,4) \text{ mL}$$

$$C = (0,8 \pm 0,1) \text{ lx}$$

Entenda concentração no contexto desse trabalho como sendo uma grandeza proporcional ao volume de tinta. Sendo a constante de proporcionalidade entre essas grandezas o volume total de líquido.

Por que uma exponencial?

De forma optativa, no final da atividade o professor pode explorar mais a função exponencial presente nos experimentos, indagando os motivos que impossibilitam um decaimento linear, visto que os fótons sempre atravessam distâncias iguais. Como sugestão, o professor pode realizar uma prática bem simples retirada do projeto chamado *Eliminando Quadrados*, da coleção Matemática Multimídia desenvolvido pela Universidade Estadual de Campinas.

Disponível em: [file:/Users/Home/Downloads/TELA-eliminando_quadrados---o_experimento%20\(2\).pdf](file:/Users/Home/Downloads/TELA-eliminando_quadrados---o_experimento%20(2).pdf).

Resumo da prática:

Quadrinhos de papel com faces de cores diferentes (uma verde e a outra marrom), são lançados sobre uma mesa e todos aqueles que caem com a cor marrom voltada para cima, são retirados. Repete-se o processo com as sobras até que reste apenas um quadrinho. As quantidades de quadrinhos marrons de cada evento são contabilizadas em uma tabela e também usadas na

construção de um gráfico que relacionam o número de jogadas e os pedaços de papel.



Figura 4.8: Pedacos de papel com faces de cores diferentes. **Fonte:** Matemática Multimídia – Unicamp.

Essa prática simples permite que o discente relacione o comportamento dos pedaços de papel lançados sobre a mesa, com o decaimento da intensidade luminosa. Em cada lançamento, uma quantidade diferente de papéis é lançada (sempre a sobra do lançamento anterior) e a redução é aproximadamente constante em cada lançamento, podemos supor que diminui em torno de 50% pra cada arremesso, ou seja, em cada evento uma quantidade diferente de papéis é virada. De maneira análoga, acontece com a intensidade luminosa, para mesmas espessuras do meio óptico atravessada, ocorre uma redução mais ou menos constante na irradiância transmitida, que como visto, não pode ser uniforme.

Atividade 2: Introdução aos Conceitos de Espalhamento e Absorção da luz

Atividade 2.1: Espalhamento de Luz por Cacos de Vidro Colorido

O propósito dessa ação prática é mostrar a variação de brilho e da cor e a dependência do tamanho de cacos de vidro. Então, os grupos devem prever se ocorrerá alguma variação de brilho para um tamanho bem pequeno de vidro colorido (pó de vidro) em relação a um pedaço maior. Feito o palpite, o vidro colorido deve ser triturado na presença da turma, para observação dos mesmos.

Motivação: Por que o vidro colorido triturado é mais claro que um pedaço grande?

Objetivos da atividade: explorar os conceitos de espalhamento múltiplo e absorção da luz.



Figura 4.9: Variação de brilho/cor para tamanhos diferentes de vidro.

Após o procedimento, o docente deve promover uma discussão sobre o fenômeno observado, avaliando as repostas prévias e questionando sobre as possíveis explicações para o evento estudado. Por fim, deve esclarecer que o mecanismo de absorção está vinculado ao tamanho da área de absorção, e ao passo que essa diminuiu a absorvidade também diminuiu. Em contraponto, o espalhamento múltiplo aumenta, deixando o conjunto mais brilhoso.

Atividade 2.2: Processos de Extinção da Luz

Essa prática experimental foi desenvolvida para ser usada na discussão sobre os processos de extinção da luz através dos mecanismos de espalhamento e absorção. O experimento consiste em analisar imagens de dois recipientes idênticos projetadas na parede por um retroprojetor.

Motivação: Como podemos explicar o fato de que, em um dia chuvoso, a nuvem apresenta cor cinza para quem olha do solo e, para uma pessoa sobrevoando a mesma nuvem, a cor é branca?

Objetivos da atividade:

- Mostrar que, em muitas situações, não é possível identificar o mecanismo de extinção da luz, se por espalhamento ou absorção.

Inicialmente os recipientes são colocados sobre a região de projeção vazios, para mostrar que não existem diferenças entre os objetos. Então, fez-se uma mistura de 500 mL de água e uma gota de tinta preta e outra mistura com as mesmas proporções, porém com tinta branca (tintas de mesmo fabricante). Dessas misturas foram retirados 20 mL (seringa) e inserido em cada um dos frascos. Esses procedimentos são feitos sem que os alunos vejam, inclusive o retroprojetor é envolvido por um papel preto de modo que os estudantes não conseguem ver as vasilhas. Nesse momento os discentes divididos em grupos respondem qual das imagens está com a mistura de água e tinta preta e água e tinta branca (Figura 4.10.a). Seguidamente, sem retirar o líquido dos recipientes foram adicionados uma gota de tinta preta na mistura preta e uma gota de tinta branca na mistura branca e o resultado é a imagem da Figura 4.10.b, novamente

foi preciso responder em quais recipientes estavam as mistura das tintas e também se havia alguma diferença nas imagens e se era possível distinguir os mecanismos de extinção.



Figura 4.10.a



Figura 4.10.b

Figura 4.10: Projeções de dois recipientes idênticos cada um contendo mistura de água e tinta preta e água e tinta branca com concentrações parecidas.

O objetivo dessa análise é mostrar que nem sempre é possível identificar o mecanismo de extinção predominante no meio óptico, o resultado da Figura 4.10.b mostra que é impossível identificar onde tem tinta preta (mecanismo de absorção) e onde tem tinta branca (mecanismo de espalhamento). Um exemplo interessante relacionado a essa ideia é o caso das nuvens escuras em dias frios. A princípio pode se pensar que existe um domínio de partículas absorventes sobre as espalhadoras e por isso o brilho da nuvem diminui. Contudo, a imagem da mesma nuvem vista por cima revela a cor branca e o brilho comum dos dias ensolarados. Então, o que está ocorrendo não é a absorção dos fótons, mas sim um múltiplo espalhamento da luz, diminuindo a transmissividade através da nuvem, fazendo com que o espalhamento domine o processo de extinção da luz que chega a um observador no solo. Essa concepção é ilustrada pela Figura

4.10.b, o recipiente da direita está com tinta branca e a espalhamento é tão grande que pouca luz atravessa o meio para atingir o anteparo.

Atividade 3: Propagação de Luz em Lâminas Transparentes e em Meios Ópticos Homogêneos e Heterogêneos

Atividade 3.1: Lâminas Transparentes

O experimento das lâminas transparentes foi elaborado com a finalidade de discutir a possibilidade de se obter um espelho a partir de materiais transparentes e também para examinar a variação de brilho em meios porosos, como areia.

Motivação: Um espelho pode ser construído a partir de materiais transparentes?

Objetivos da atividade:

- Observação da variação de brilho quando se aumenta o número de lâminas transparentes e a verificação da formação de um espelho.

✓ **Formação de um espelho:**

Consiste em questionar aspectos como transparência, opacidade, brilho e ausência de brilho à medida que placas transparentes de acetato são adicionadas formando uma pilha.

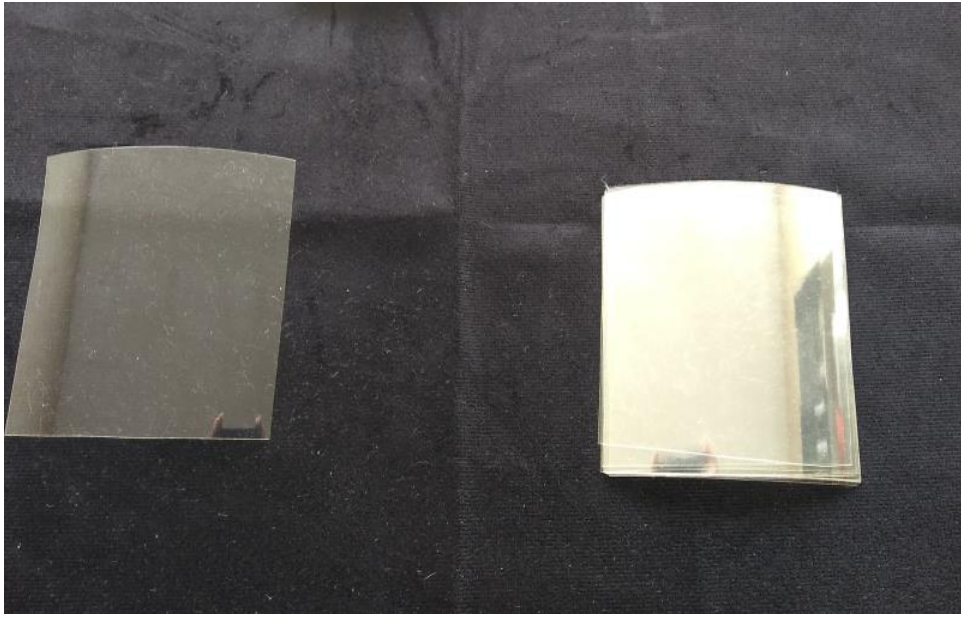


Figura 4.11.a: brilho de uma placa transparente versus brilho de 10 placas transparentes sobrepostas. As placas são idênticas.



Figura 4.12.b: brilho de uma placa versus brilho de 50 placas.

Os alunos precisam prever o comportamento das placas transparentes antes de verem a pilha formada, então os mesmos respondem algumas

perguntas sobre o que possivelmente irá ocorrer. Após observarem o conjunto sobreposto de lâminas transparentes, os discentes são questionados se o sistema pode ser encarado como um espelho. E por fim precisam estimar a quantidade mínima de chapas necessárias para a formação do espelho.

Posteriormente, os estudantes recebem um esclarecimento físico sobre o fenômeno estudado. A saber, quando a luz incide sobre uma placa, esquema da esquerda da figura 3.5, parte da luz é refletida e outra parte é transmitida. A estrutura da direita da mesma figura mostra a incidência, reflexão e transmissão em duas placas. Nota-se que a luminosidade transmitida pela primeira placa é a incidência da segunda e, portanto, parte dessa energia será transmitida para o meio e outra será refletida, essa refletividade da segunda placa atingirá a primeira placa e novamente parte será transmitida e outra parte refletida. Logo, é natural concluir que a primeira placa sempre refletirá uma quantidade de luz maior que as placas inferiores, porque cada lâmina inferior refletirá uma porção de luz que será transmitida ao início.

A parcela de energia luminosa que é transmitida pela placa superior é chamada de irradiância ascendente; essa grandeza depende do produto da fração de energia luminosa que atingiu a placa inferior pela refletividade da placa. A irradiância descendente representa a energia luminosa que atinge a placa inferior, e está relacionada com a transmissividade que ocorre na placa superior e a irradiância emitida pela inferior. Isto é, a transmissividade da primeira placa somada ao produto da irradiância ascendente e a refletividade da lâmina superficial, como visto na seção 3.3.2.



Figura 4.13: Refletividade de uma pilha de placa paralelas. Resultado que se aproxima de um espelho.

Os dados experimentais dessa prática, intensidade luminosa sobre placas transparentes, são mostrados nas figuras 4.16 e 4.17, onde foram medidos a intensidade luminosa versus o número de placas de dois materiais diferentes. É possível verificar um crescimento exponencial que sugere a formação de um espelho pelo conjunto de lâminas.

O aparato experimental mostrado na figura 7.14, foi desenvolvido para medir a variação de brilho com a adição de transparências. Para a coleta de dados utilizou-se o luxímetro do aplicativo Physics Toolbox instalado no aparelho *smarphone*.



Figura 4.14: Aparato experimental utilizado para medir a variação de brilho no conjunto de lâminas.



Figura 4.15: Pilha X, transparências usadas em retroprojeto, um dos lados da lâmina possui uma porosidade perceptível. Pilha Y, agrupamento de acetato, superfícies idênticas em ambos os lados. Uma e outra possuem a mesma quantidade de placas.

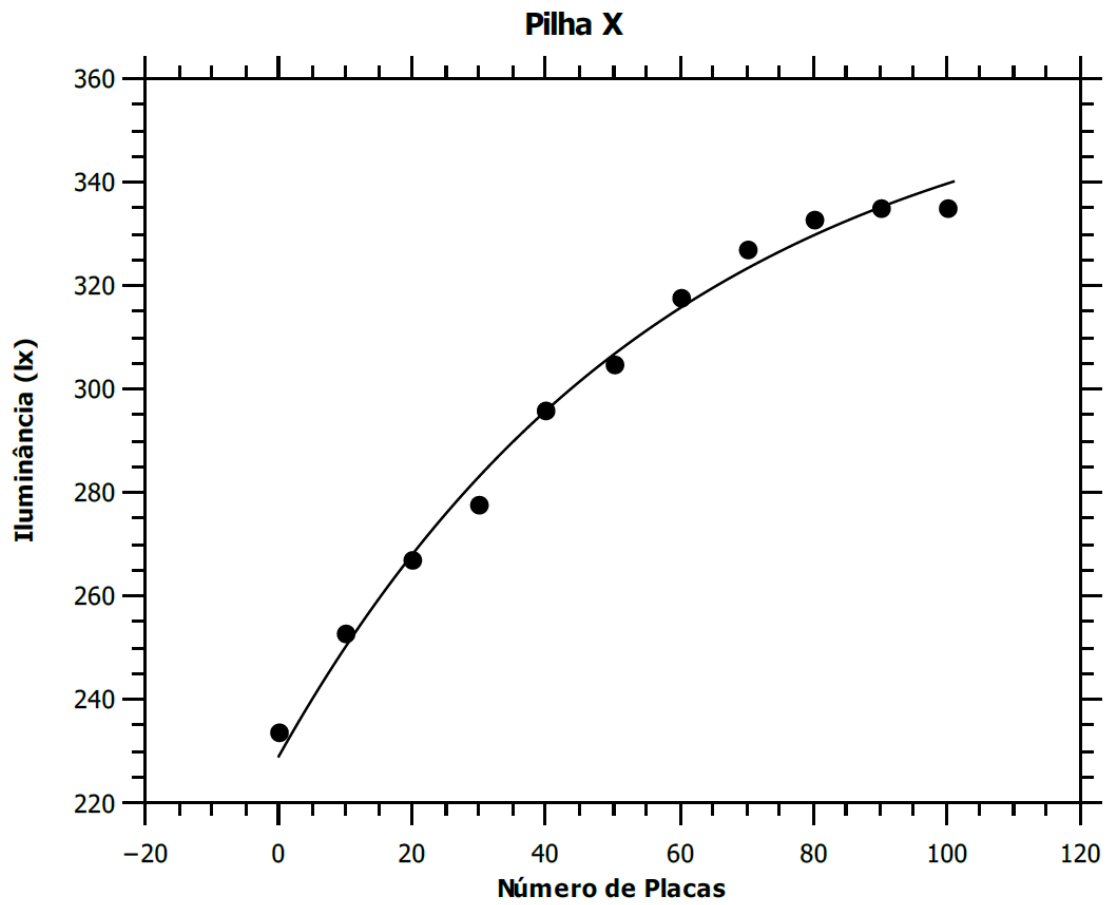


Figura 4.16: Gráfico da variação da intensidade luminosa versus o número de transparências (placas porosas).

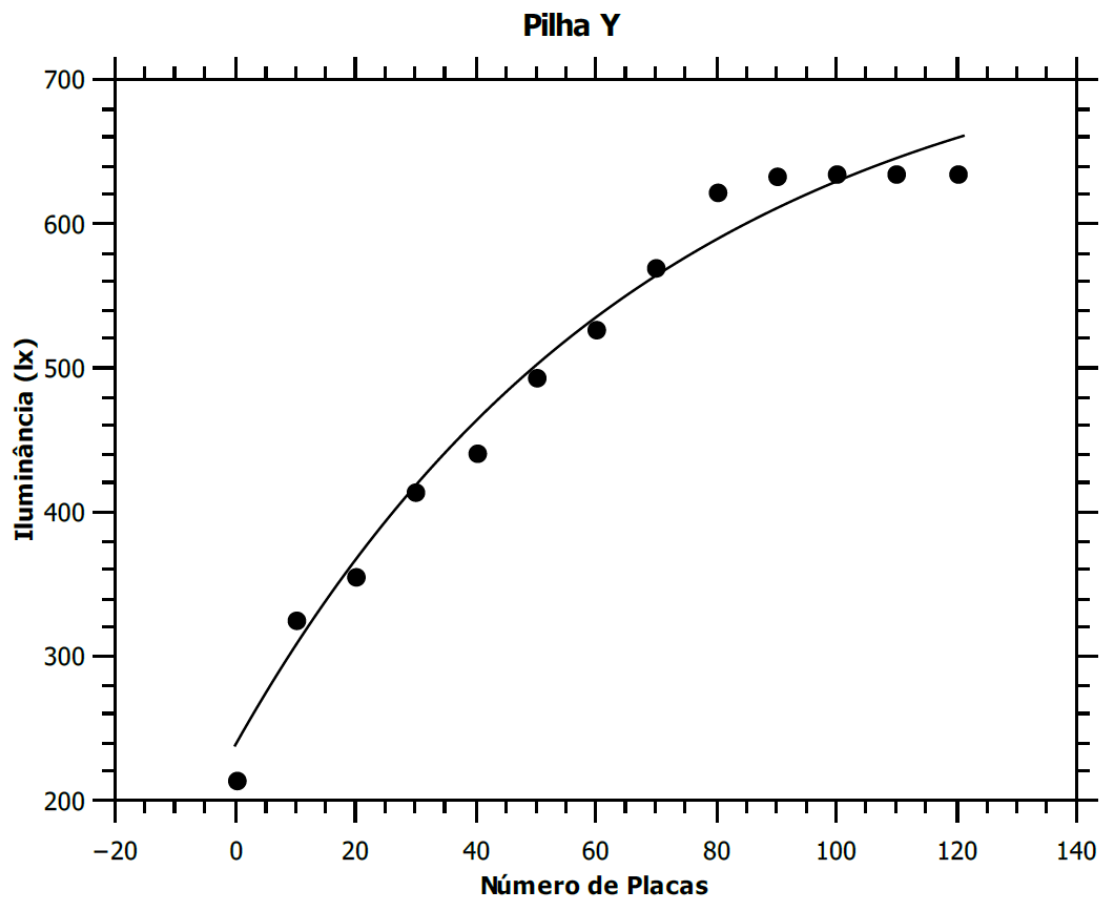


Figura 4.17: Gráfico da variação da intensidade luminosa versus o número de transparências (placas sem porosidade).

Os gráficos acima foram analisados semelhantemente aos experimentos realizados na atividade 1. Segue, a função

$$Y = A \cdot \exp(-x_3/t) + C \quad (4.5)$$

onde x_3 é o número de placas transparentes, t o livre caminho médio percorrido pela luz, C a reflexão máxima quando o número de placas tende ao infinito e $A+C$ descreve a intensidade da luz de fundo.

A coleta de dados e a análise do QtiPlot, resultaram nos seguintes valores para as variáveis da equação 4.5,

Pilha X:

$$A = (-135 \pm 8) \text{ lx}$$

$$t = (59 \pm 12)$$

$$C = (364 \pm 12) \text{ lx}$$

Pilha Y:

$$A = (-511 \pm 41) \text{ lx}$$

$$t = (69 \pm 17)$$

$$C = (749 \pm 55) \text{ lx}$$

O livre caminho médio percorrido pela luz no contexto do experimento da pilha de placas transparentes, é interpretado como o número médio de placas que o fóton atravessa sem ser espalhado ou absorvido.

Atividade 3.2: Brilho em Meios Porosos

O estímulo causador da elaboração dessa prática é a variação de brilho da areia seca para a areia molhada. Quer dizer, a areia úmida é mais escura que a seca. Os aspectos pertinentes para a discussão são o tamanho da partícula (visto na prática cacos de vidro) e a homogeneização do índice de refração do meio circundante. A ênfase será para o último ponto, pois a discussão sobre o tamanho foi melhor detalhada na seção 3.3.4.

Motivação: Por que existe uma diferença de cor entre a areia seca e a areia molhada?

Objetivos da atividade:

- Variações de brilho quando mudamos de meio óptico.

O professor deve estimular a classe a prever as possíveis alterações no brilho das pilhas de lâminas transparentes quando mergulhadas na água e na glicerina. Mergulhadas as placas, um debate deve ser levantado para explorar o efeito presenciado e se estava de acordo com as previsões realizadas.

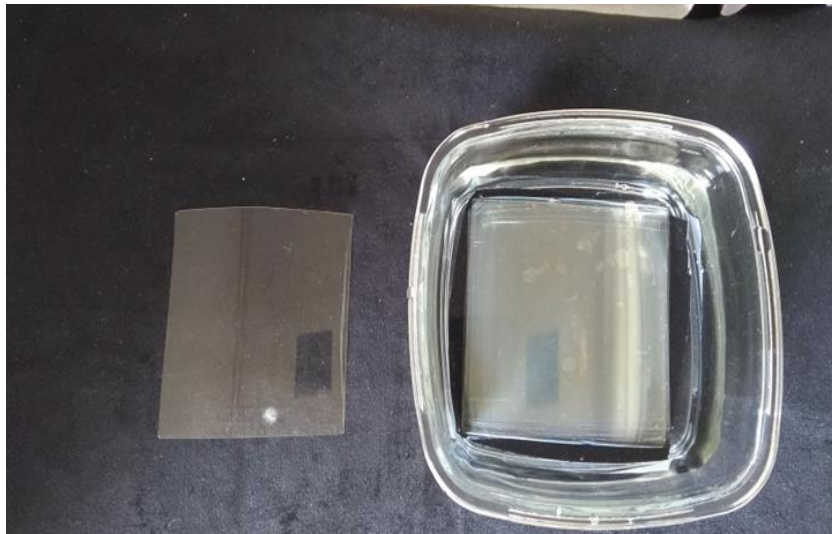


Figura 4.18: Lâminas mergulhadas em água.



Figura 4.19: Lâminas mergulhadas em glicerina.

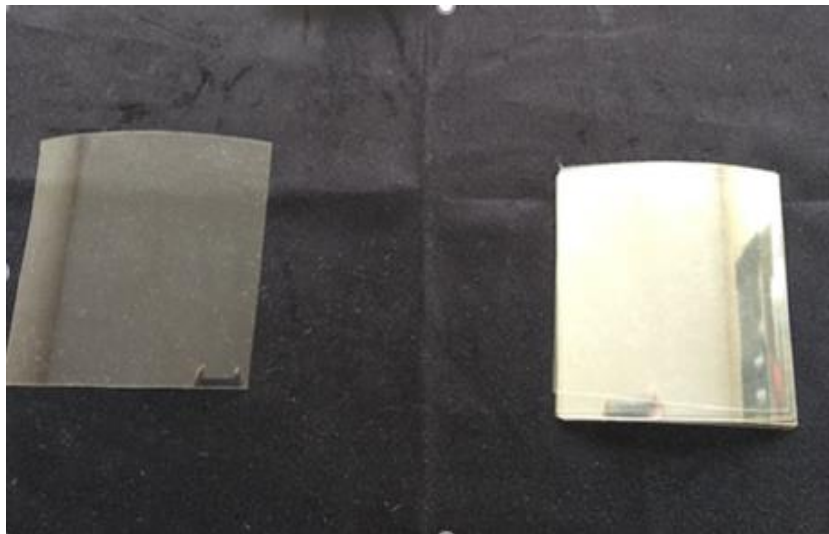


Figura 4.20: Lâminas no ar.

De acordo com os registros acima, é nítida a diferença de brilho nas três imagens. A causa dessa distinção é explicada pela disparidade entre os índices de refração das placas e do ambiente envolvente. Quanto mais próximos os índices de refração dos materiais envolvidos, menor a refletividade, pois ocorre uma homogeneização das propriedades óticas do meio, e os fótons não distinguem um material do outro, como mostrado na figura 4.19. O índice de refração dos grãos de areia têm valor mais próximos ao índice de refração da água do que o ar e, conseqüentemente, o espalhamento é menor e por isso menos luz chega ao nosso olho.

Capítulo 5

Descrição da Prática

Abordaremos neste capítulo as aplicações feitas em sala de aula das atividades propostas, mostrando os resultados e conclusões obtidos pelos alunos. A estratégia didática utilizada para as práticas consiste em previsão do fenômeno, justificativa, observação, conflito, discussão e conclusão. Essa metodologia permite que os alunos participem ativamente da construção do conhecimento, adquirindo mais autonomia no processo de ensino aprendizagem.

As atividades práticas foram aplicadas numa turma de 3º ano do Ensino Médio, em um colégio particular. A turma é composta de 18 alunos e eles possuem 4 tempos de 45 minutos de aulas de Física por semana. As atividades foram aplicadas entre os dias 05 a 23 de agosto de 2019, utilizando um total de 12 tempos de aula.

Primeiramente os alunos foram expostos a algumas questões do dia a dia, com o propósito de mostrar a área da Física que iríamos explorar. Além dos experimentos, também utilizamos roteiros com perguntas e imagens que

contribuíram para a discussão. Esses materiais estão disponíveis nos apêndices A, B e C.

5.1 Atividade 1: Lei de Lambert-Beer

A proposta dessa atividade é explorar o decaimento da intensidade luminosa à medida que a mesma percorre um meio óptico cujo comprimento e a concentração variam. Isto é, nosso objetivo é realizar uma análise para a variação do comprimento e outra para a variação da concentração. E também discutir a curva correspondente a coleta dos dados e identificar eventos do cotidiano relacionado com o fenômeno observado.

Para a realização dessas atividades os alunos são divididos em grupos, 3 grupos com 5 alunos e 1 grupo de 3 alunos (escolha dos alunos). Em seguida, algumas perguntas são feitas, com a finalidade de propor uma reflexão a respeito do comportamento da luz. Nessa etapa os discentes não precisavam escrever as respostas.

Perguntas iniciais:

1. Como explicar a baixa intensidade da luz a metros de profundidade do mar?
2. Por que conseguimos enxergar através de um copo com água, mas não conseguimos fazer observações por meio desse mesmo copo se uma gota de tinta for adicionada? (Os estudantes vislumbraram esse resultado com uma demonstração).
3. Por que a presença da tinta dificulta a passagem da luz, de maneira que não vemos por meio da mistura?

Após esse início, explicamos aos alunos que a prática que eles realizarão ajudará a compreender o que acontece com a luz quando atravessa um meio

óptico. Então, os grupos recebem um roteiro (apêndice C) da análise experimental, que contém uma pequena introdução sobre a Lei de Lambert-Beer, a expressão da mesma, tabelas para que anotem as leituras, espaços milimetrados para construções dos gráficos e algumas perguntas para explorar mais o conteúdo. No primeiro experimento, analisamos o decaimento da intensidade luminosa à medida que a profundidade do meio óptico aumenta. O aparato experimental (Figura 4.5) é apresentado a classe e explicado como deve ser usado.

Um recipiente de vidro cilíndrico de aproximadamente 4,5 L é posicionado dentro de um caixote de MDF. Na base do cilindro são fixadas duas borrachas escolares idênticas com uma altura maior que a espessura de um *smartphone*. Dois *smartphones* são utilizados, um com a finalidade de ser a fonte de luz (lanterna) e o outro instrumento de medição da intensidade luminosa (luxímetro disponível no aplicativo Phisycs Toolbox). Posicionamos o celular com o luxímetro em baixo do vaso e alinhamos a lanterna de forma que a luz incida sobre o luxímetro para a leitura da intensidade luminosa. Para diminuir os efeitos da luz ambiente, o conjunto experimental foi envolvido com papel preto, deixando apenas um lado aberto e as lâmpadas da sala de aula foram apagadas, essas intervenções minimizam os efeitos da luz de fundo.

Antes do início das práticas experimentais, realizamos uma pequena demonstração para introduzir os conceitos de absorção e espalhamento da luz. Então, mostramos um copo com água e perguntamos se era possível ver através desse sistema. Todos concordaram que sim. Seguidamente, adicionamos uma gota de tinta preta a água presente no copo e realizamos a mesma pergunta, logo, assentiram não serem capazes de observar por meio do copo. Repetimos o mesmo processo com tinta branca e foram unânimes quanto à visibilidade. Assim sendo, questionamos se nos dois casos (tinta preta e branca) os processos que impediam a passagem da luz eram iguais. Um aluno, respondeu dizendo que no arranjo com tinta preta ocorria a absorção e com tinta branca a luz era desviada pra várias direções. Apoiamos sua resposta e descrevemos os dois mecanismos para a turma, a saber, o espalhamento é o resultado na mudança de direção do feixe incidente, isto é, a interação da luz com a matéria

produz uma projeção da mesma em outras direções. E a absorção decorre da interação das moléculas com ondas luminosas cujo os comprimentos são compatíveis com o espectro de absorção das mesmas. Utilizamos os exemplos de cor de um corpo, um assunto de domínio dos alunos, mostrando que se um corpo é visto como verde, significa que as outras cores do espectro visível foram absorvidas e apenas o verde foi espalhado.

Lei de Lambert: Decaimento da luminosidade com o aumento do comprimento.

Inicialmente os alunos enchem uma garrafa pet com 2 L de água e colocam uma gota de tinta preta e balançam a mistura para que se uniformize. É indispensável a presença da tinta, porque somente a água numa quantidade pequena não produzirá a atenuação luminosa desejada. Em seguida, despejam-se 240 mL dessa mistura dentro do recipiente. Esse procedimento padroniza uma condição inicial, ou seja, a leitura será a partir dessa quantidade, para minimizar os efeitos de lente resultantes da base do cilindro, o que poderia prejudicar os resultados desejados. Logo, a primeira leitura no luxímetro é feita nesse momento, correspondendo ao comprimento inicial, 0 cm.

Seguidamente, os alunos vão acrescentando 120 mL (aproximadamente 1 cm de altura no frasco) da mistura e verificando a leitura dada pelo luxímetro, esse processo se repete até que a intensidade luminosa não varie mais. Os dados obtidos de cada grupo e o gráfico corresponde são mostrados a seguir.



Figura 5.1: Alunos realizando a prática que ajuda a compreender a Lei de Lambert.

Seguem os dados coletados por cada grupo juntamente com a representação gráfica. Para eficiência dessa prática alguns cuidados devem ser considerados, como despejar devagar a mistura dentro do recipiente, ser sempre o mesmo aluno a verificar a medida, não ficar na frente do aparato experimental (é preciso evitar sombras), não pode ocorrer alterações no sistema (como mexer na posição dos *smartphones*), nenhuma outra fonte de luz pode estar atuando no local e evitar abrir portas, janelas e cortinas durante a prática.

Apenas o grupo 1 conseguiu realizar satisfatoriamente o experimento gerando o gráfico 1.1 que mostra que o decaimento da intensidade luminosa é exponencial quando a profundidade do meio aumenta. Esse resultado já era esperado, porque a execução dessa prática é mais complicada, inclusive repetimos muitas vezes a coleta para encontrar dados relevantes. O ideal era que os experimentos fossem refeitos com mais cuidado, porém essa é uma

prática muito longa com duração aproximada de 90 minutos para toda a turma. Ficamos satisfeitos que pelo menos um grupo conseguiu atingir a expectativa permitindo a discussão sobre o fenômeno.

Grupo 1: Filipe, Heitor, Lucas, Brenno e Jhonny.

Grupo 2: Lucas, Yan, Júlia, Melissa e Marcelly.

Grupo 3: Kamilla, Bruna e Viviane.

Grupo 4: Lucas, Miguel, Ítalo, Rian e Nathan.

Tabela 1.1 – Grupo 1	Comprimento (cm)	Intensidade Luminosa (lx)
	0	160
	1	108
	2	75
	3	55
	4	46
	5	45
	6	31
	7	21
	8	15
	9	11
	10	8
	11	6
	12	5
	13	4
	14	3
	15	2
	16	1
17	0	

Tabela 1.2 – Grupo 2	Comprimento (cm)	Intensidade Luminosa (lx)
	0	67
	1	61
	2	46
	3	20
	4	19
	5	20
	6	19
	7	20
8	19	

Tabela 1.3 – Grupo 3

Comprimento (cm)	Intensidade Luminosa (lx)
0	93
1	93
2	63
3	61
4	60
5	56
6	11
7	10
8	10
9	9
10	9
11	8
12	7
13	7
14	7
15	6
16	0

Tabela 1.4: Grupo 4

Comprimento (cm)	Intensidade Luminosa (lx)
0	107
1	102
2	100
3	99
4	94
5	91
6	47
7	20
8	19
9	15
10	15
11	14
12	14
13	14
14	13
15	13
16	13

Gráfico 1.1: Grupo 1

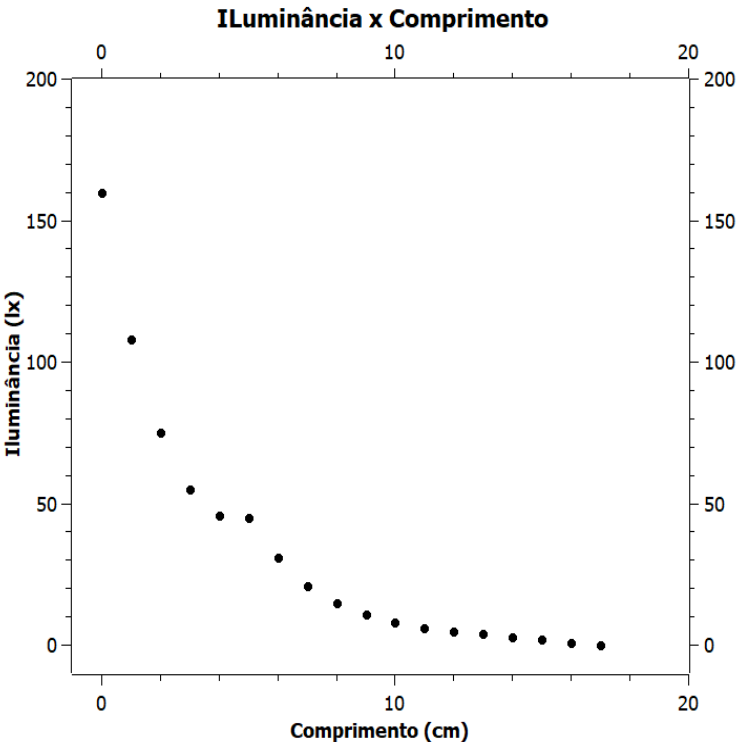


Gráfico 1.2: Grupo 2

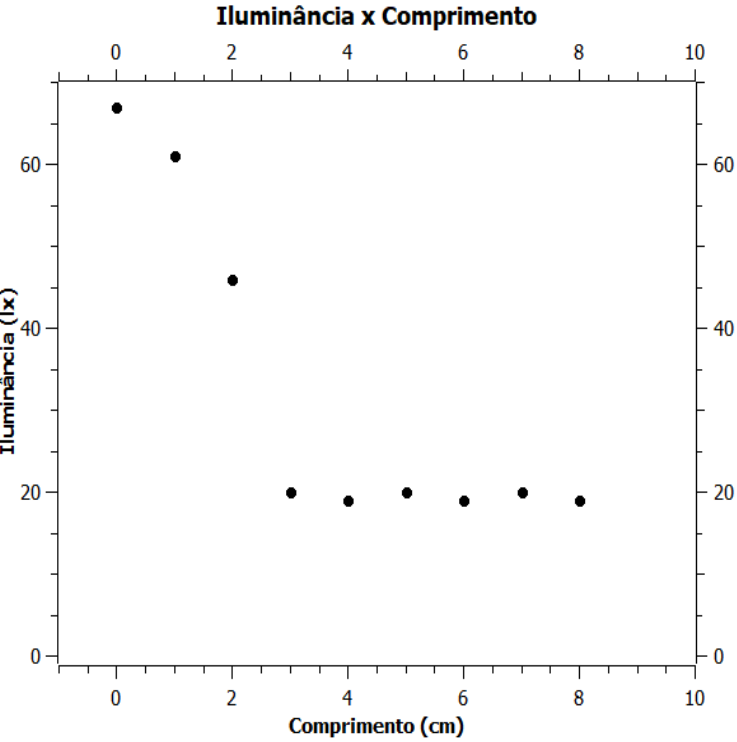


Gráfico 1.3: Grupo 3

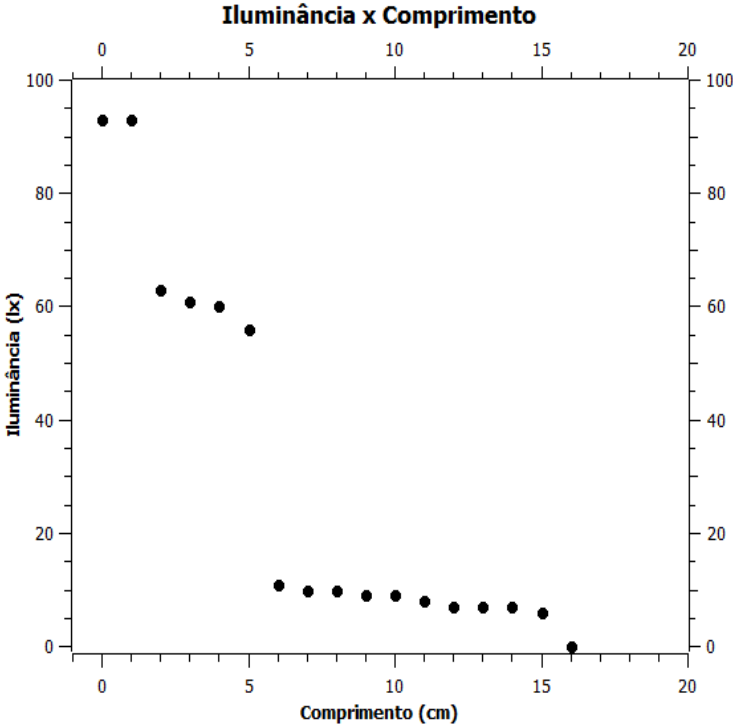
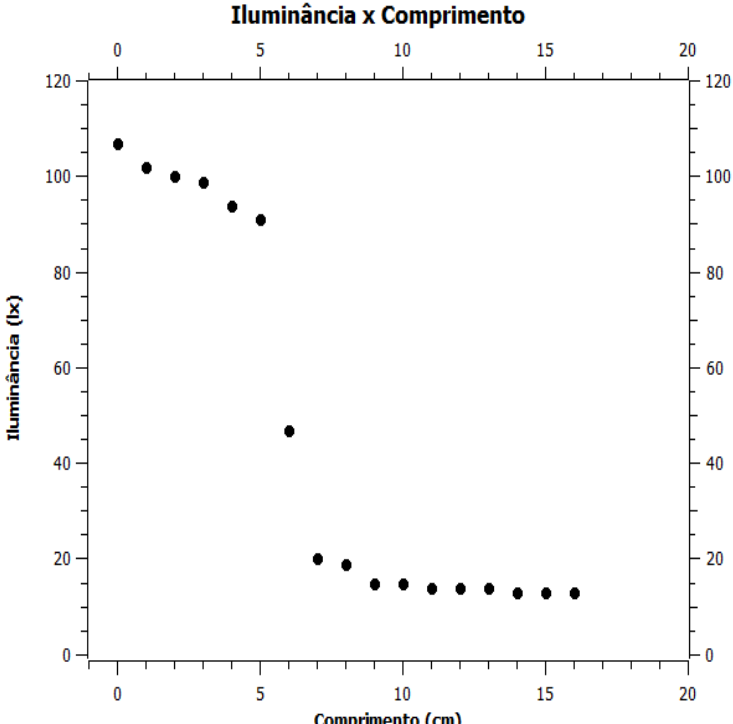


Gráfico 1.4: Grupo 4



Lei de Beer: Decaimento da luminosidade com o aumento da concentração.

Na segunda parte da atividade 1, os educandos inicialmente colocam 500 mL de água dentro do recipiente para minimizar os efeitos de lentes, como já explicado. A primeira leitura no luxímetro é feita nesse com essa quantidade de água, ou seja, concentração nula de tinta.

Entenda concentração no contexto desse trabalho como sendo uma grandeza proporcional ao volume de tinta. Sendo a constante de proporcionalidade entre essas grandezas o volume total de líquido.

Então, os alunos fazem a mesma mistura da primeira parte, 2 L de água para 1 gota de tinta preta. Em seguida, utilizam uma seringa de 20 mL como medidor para liberar a mistura sobre a água contida no cilindro. A concentração aumenta de 20 em 20 mL e em cada acréscimo um novo valor é registrado pelo luxímetro. Os dados coletados por cada grupo juntamente com a representação gráfica, são mostrados nessa seção. Os grupos 2 e 4 conseguiram dados razoáveis para prática.

Grupo 1: Filipe, Heitor, Lucas, Brenno e Jhonny.

Grupo 2: Lucas, Yan, Júlia, Melissa e Marcelly.

Grupo 3: Kamilla, Bruna e Viviane.

Grupo 4: Lucas, Miguel, Ítalo, Rian e Nathan.

Tabela 2.1 – Grupo 1

Concentração (mL)	Intensidade Luminosa (Ix)
0	475
20	464
40	413
60	404
80	371
100	350
120	339
140	305
160	288
180	261
200	234
220	223
240	193
260	181
280	165
300	125
320	114
340	98
360	103
380	84
400	80

Tabela 2.2 – Grupo 2

Concentração (mL)	Intensidade Luminosa (Ix)
0	419
20	385
40	366
60	350
80	333
100	317
120	302
140	276
160	233
180	209
200	180
220	162
240	156
260	142
280	129
300	116
320	93
340	84
360	83
380	72
400	64

420	60
440	56
460	50
480	45
500	40
520	38
540	32
560	28
580	26
600	25
620	23
640	21
660	20
680	19
700	18
720	16
740	14
760	13
780	12
800	11
820	10
840	9

Tabela 2.3 – Grupo 3

Concentração (mL)	Intensidade Luminosa (Ix)
0	220
20	183
40	173
60	141
80	161
100	146
120	108
140	85
160	85
180	74
200	116
220	74
240	46
260	32
280	21
300	19
320	19
340	19

Tabela 2.4 – Grupo 4

Concentração (mL)	Intensidade Luminosa (Ix)
0	236
20	195
40	159
60	132
80	129
100	123
120	110
140	85
160	81
180	76
200	67
220	63
240	58
260	55
280	50
300	48
320	45
340	38
360	36
380	33

400	31
420	28
440	27
460	24
480	21
500	19
520	17
540	15
560	13
580	12
600	11
620	10
640	9
660	8
680	7
700	6
720	5
740	4
760	3

(1)

(2)

Gráfico 2.1: Grupo 1

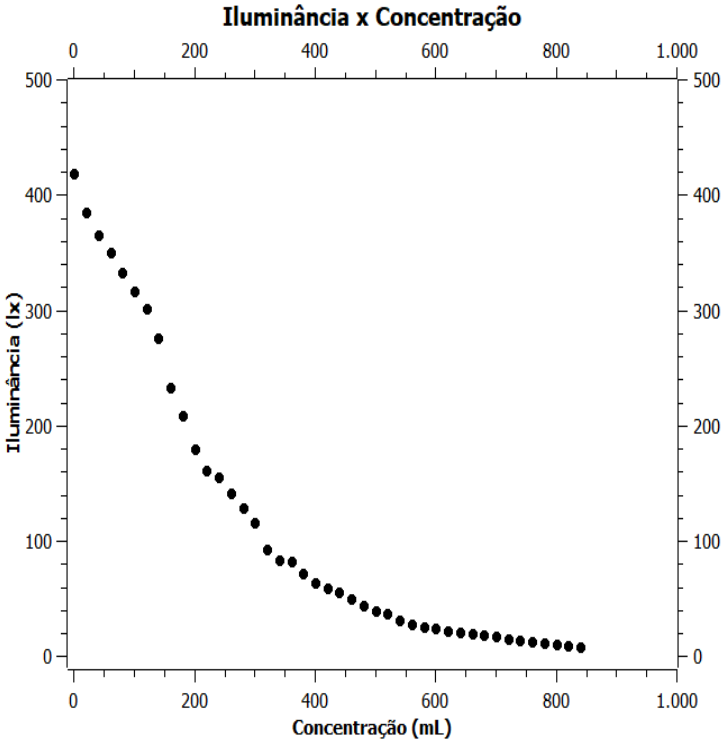


Gráfico 2.2: Grupo 2

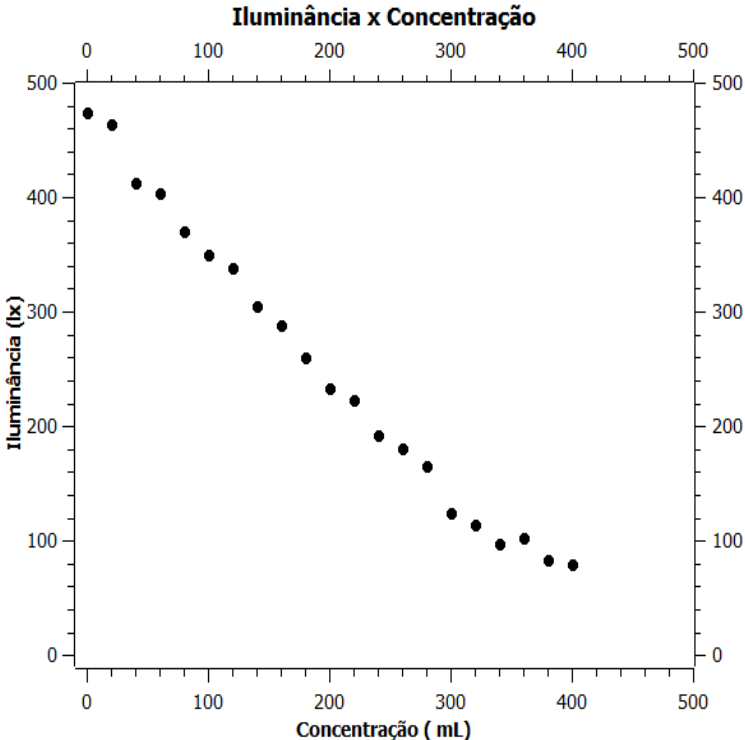


Gráfico 2.3: Grupo 3

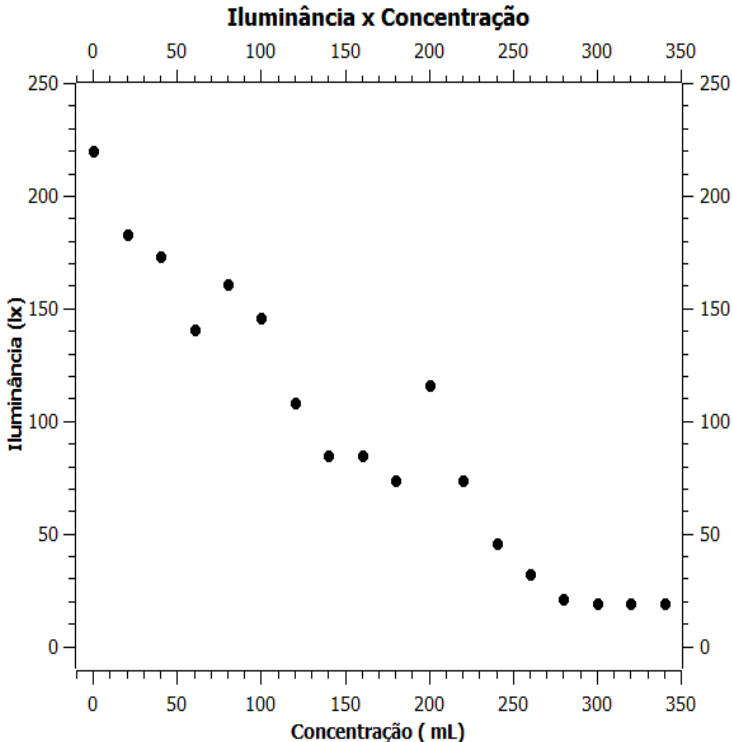
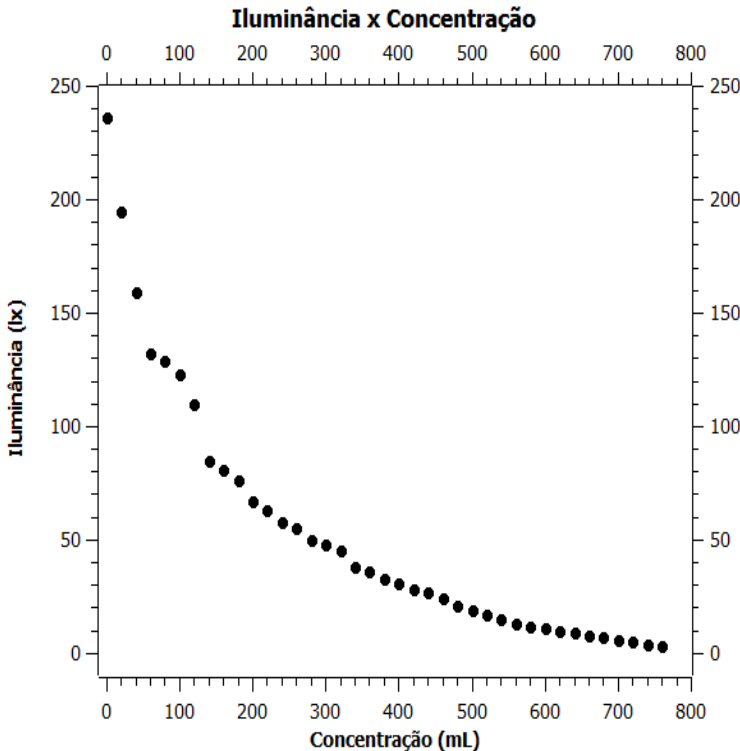


Gráfico 2.4: Grupo 4



Utilizamos 4 tempos de aula para a execução completa da coleta de dados pelos grupos e 2 tempos para discussão dos fenômenos analisados. Parte do debate foi usado para explicar porque a atenuação luminosa é representada por uma função exponencial e análise dos gráficos e na outra parte os grupos responderam algumas perguntas sobre o estudado.

Para explicar porque a iluminância diminui exponencialmente à medida que o comprimento ou a concentração aumentam em proporções iguais, realizamos um experimento simples (detalhes na seção 4.2) onde pedaços de papel com lados de cores diferentes são lançados sobre a mesa. Em cada lançamento são coletados apenas uma das cores, a ação é repetida até que reste apenas um papel da cor escolhida. Então, mostramos aos estudantes que nunca vira a mesma quantidade de papel da mesma cor em cada lançamento, o que ocorre é a repetição de uma taxa aproximadamente constante em cada evento, podemos pensar que aproximadamente metade dos papéis restantes são virados em cada episódio, ocasionando numa diminuição sobre uma quantidade cada vez menor.

Concluído essa etapa da discussão da função exponencial, realizamos uma breve análise dos gráficos obtidos. Os alunos se atrapalharam na hora de construir os gráficos, e por isso, geramos os gráficos no programa QtiPlot (gráficos mostrados acima) e os expomos numa apresentação de slides na sala. Nos gráficos de Lambert (Gráficos 1.1; 1.2; 1.3; 1.4), apenas o grupo 1 conseguiu dados interessantes, Gráfico 1.1, e um dos fatores citados pelos membros dos mesmos é que procuraram despejar a mistura lentamente. Condição não observada pelos outros grupos. Outro problema observado é que por ser uma prática longa, em dado momento os estudantes deixavam de realizar os procedimentos adequadamente resultando em dados mal coletados. Na prática que investiga a Lei de Beer, dois grupos conseguiram boas curvas, gráficos 2.1 e 2.4. Esse experimento produziu melhores resultados do que de Lambert (afirmação baseada nas muitas vezes que esses dois experimentos foram repetidos).

Agora analisaremos o questionário contido no roteiro que foi respondido após o fechamento das práticas e a interpretação da curva. Nem todos os grupos

finalizaram essa etapa, por conta do tempo. Examinaremos as respostas obtidas. Abaixo seguem as questões presentes no roteiro:

1. Por que para alguns metros de profundidade no mar a intensidade da luz é baixa? Justifique sua resposta.
2. Cite outros exemplos que encontramos na natureza que podem ser justificados pela Lei de Lambert-Beer.
3. Discuta sobre os dados experimentais encontrados e a previsão teórica.

As respostas para a primeira pergunta, são compatíveis com o que foi apresentado e discutido durante o experimento, porém os alunos não enfatizaram o fato de o decaimento luminoso ser exponencial. Ficou entendido que a luz diminui à medida que a profundidade ou a concentração aumentam, mas faltou mais clareza pra enfatizar como acontece a atenuação da luz. Seguem, as repostas apresentadas pelos grupos que responderam:

Grupo 1: A intensidade da luz diminui à medida que a profundidade do meio aumenta.

Grupo 3: Porque quanto mais profundo a intensidade luminosa menor é.

Na segunda questão os grupos responderam que outro exemplo do cotidiano se aplica o efeito da atenuação luminosa. Os alunos apontaram que a escuridão em abismos e vales estão relacionados com o estudado.

Grupo 1: A intensidade da luz e os abismos e vales.

Grupo 3: Podemos observar qualquer buraco e veremos que está lei se aplica. Quanto mais profundo for menos luz terá.

Apenas um grupo apresentou uma resposta para o terceiro questionamento. Mas, não souberam fazer uma comparação com o experimento e a base teórica apresentada na introdução da atividade.

Grupo 1: *À medida em que foi adicionado água no meio aquoso, a iluminação daquele meio ia diminuindo.*

Segundo as respostas dos grupos e as discussões promovidas em sala de aula, concluímos que a atividade 1 cumpriu parcialmente com a proposta de explorar a Lei de Lambert-Beer. Vê-se que as repostas foram mais fundamentadas na Lei de Lambert e nada foi dito sobre a atenuação luminosa por ação da concentração assim como a presença da função exponencial no fenômeno foi ignorada nas respostas.

Acreditamos que a falta de traquejo com aulas práticas e com maior participação em discussões atravancaram um pouco o processo. Contudo, ficamos satisfeitos com os resultados obtidos, visto que mesmo diante de dificuldades conseguimos explorar um tema da Óptica com pouca visibilidade no ensino de Física. Também gostaríamos de sugerir aos docentes que queiram realizar essa atividade que optem em fazer apenas a coleta da Lei de Beer, porque o processo é demorado nos dois casos, mas os resultados obtidos na análise do aumento da concentração são melhores.

Nossa abordagem não se preocupou em calcular o coeficiente de absorção e nem o livre caminho médio percorrido pela luz, porque demandaria mais tempo e necessitaria de outros recursos, como computador e programa de análise gráfica.

Nas duas práticas utilizamos tinta preta, conseqüentemente o mecanismo de extinção da luz predominante foi a absorção, mas fica a critério do professor utilizar outra cor de tinta. Como sugestão o professor pode dividir o experimento pra ser feito com tinta preta e branca, a fim de uma comparação com efeitos produzidos por cada tintura no processo de atenuação luminosa.

5.2 Atividade 2: Introdução aos Conceitos de Espalhamento e Absorção da luz

Na atividade 2, estudamos outro conceito da Óptica com pouco espaço na área de ensino, o espalhamento múltiplo da luz. Dois experimentos compõem essa elaboração, o primeiro analisamos a mudança na coloração dos cacos de vidros e no segundo discutimos os mecanismos de extinção da luz. Quatro tempos de aula foram utilizados para a realização dessas práticas e mantemos os mesmos grupos da atividade 1. Inicialmente os alunos receberam os roteiros com perguntas motivacionais cujo propósito era mostrar o que a análise pretendia discutir, questões prévias para conhecer a compreensão dos alunos e perguntas pós observação.

Atividade 2.1: Espalhamento de Luz por Cacos de Vidro Colorido

O objetivo dessa prática é mostrar a variação de brilho da luz com a dependência do tamanho da partícula. Então, pedimos aos grupos que fizessem uma previsão do que ocorreria com o brilho das partículas de vidro quando ficassem bem pequenas (pó de vidro) em relação ao um pedaço maior. Feito o palpite, o vidro colorido foi triturado na presença da turma, para observação dos mesmos. Por questões de segurança não permitimos que os estudantes manipulassem os cacos de vidro, a figura 5.2, exibe como foi feito.

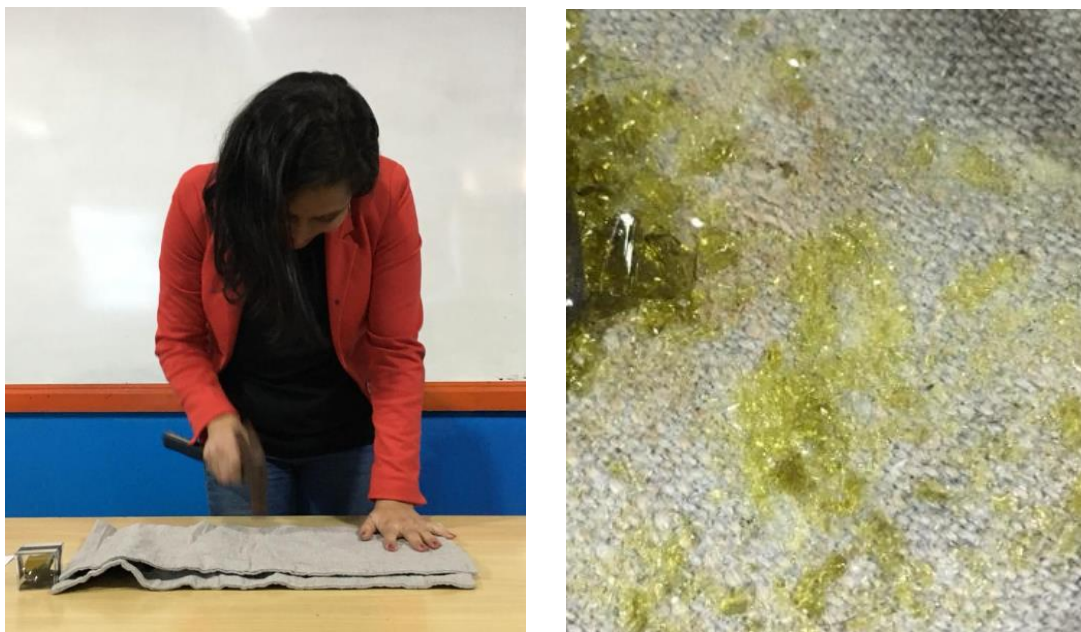


Figura 5.2: Cacos de vidro sendo triturados e o resultado ao lado evidenciando a diferença de brilho.

Atividade 2.2: Processos de Extinção da Luz

Na atividade 2.2, propomos uma investigação sobre os mecanismos de extinção da luz, absorção e espalhamento. Inicialmente, dois recipientes vazios são colocados sobre a região de projeção de um retroprojeter, pra mostrar que não existem diferenças entre os objetos. Então, fez-se uma mistura de 500 mL de água e uma gota de tinta preta e outra mistura com as mesmas proporções, porém com tinta branca (tintas de mesmo fabricante). Dessas misturas foram retirados 20 mL (seringa) e inserido em cada um dos frascos. Esses procedimentos são feitos sem que os alunos vejam, inclusive o retroprojeter é envolvido por um papel preto impedindo a visibilidade das vasilhas pelos estudantes. Nesse momento os discentes divididos em grupo respondem qual das imagens está com a mistura de água e tinta preta e água e tinta branca. Seguidamente, sem retirar o líquido dos recipientes foram adicionados uma gota de tinta preta na mistura preta e uma gota de tinta branca na mistura branca. A figura 5.3 mostra os efeitos dos procedimentos citados. Novamente os grupos responderam em quais recipientes estavam as misturas das tintas e também se

tinha alguma diferença nas imagens e se era possível distinguir os mecanismos de extinção.



Figura 5.3: Projeção de dois recipientes idênticos, um contendo mistura de água e tinta branca e outro água e tinta preta. Na imagem da esquerda as tintas são diluídas em 500 mL de água. Na direita uma gota de cada tinta em 20 mL de água.

Seguem, todas as perguntas e as repostas dadas pelos grupos, assim como a análise das mesmas. Identificamos que as perguntas prévias foram respondidas após o fim das atividades, o que infelizmente nos impediu de interpretar os conhecimentos iniciais sobre a manifestação Física abordada, mas como esse não era o objetivo principal dos questionamentos, não pedimos que corrigissem.

Perguntas da atividade 2.1:

Perguntas prévias:

1. O que você acha que irá acontecer com o pedaço de vidro no fim do processo? Por quê?
2. Faça uma previsão para a cor do vidro quando bem triturado. Dê uma explicação para essa especulação.

Dois aspectos foram discutidos pelos grupos quando responderam a questão 1, teve grupo que comentou a questão do brilho e outros falaram sobre a diminuição do tamanho. Os elementos considerados são relevantes e possíveis já que a pergunta foi aberta e não especificou um determinado conceito.

Grupo 1: Ficar com maior transparência, pelo fato dos menores pedaços de vidro terem maior dificuldade em refletir a luz.

Grupo 2: Vai ficar mais transparente (com aparência de cristal) por causa das partículas menores.

Grupo 3: Ele vai virar um farelo, pois foi elevado uma pressão em cima do vidro.

Grupo 4: O vidro ficará moído, pelo fato de estar sendo quebrado pelo martelo.

Para a pergunta 2 a maioria dos estudantes previu que os pedacinhos de vidro ficariam mais claro ao passo que as dimensões diminuíssem. Um dos grupos explicou durante a aula, que a intensidade da cor iria diminuir porque um pedaço de vidro muito pequeno possui pouca matéria e, portanto, mais claro.

Grupo 1: Ficar transparente, pois quanto menores os pedaços, maior será a intensidade da luz.

Grupo 2: Cristal, pela sua menor concentração de pedaços inteiros.

Grupo 3: Ele vai ficar branco, pois quanto menor o grão mais claro fica.

Grupo 4: *Escuro, porque a cor do vidro é verde e quando é quebrado fica dividido em pequenas partículas.*

Perguntas pós observação:

1. Descreva o que ocorreu com a cor do vidro no fim da atividade. Está de acordo com a previsão do grupo?
2. Discuta com seus colegas e apresente uma resposta para o fenômeno da mudança de cor do vidro.
3. Existe alguma relação com o tamanho da partícula? Por quê?

Após palpitarem sobre o que aconteceria com cor do vidro, os alunos puderam observar o pó de vidro triturado e então comparar e discutir com as respostas anteriores. Teve grupo que interpretou como transparente, outro como amarelo-esverdeado, mas foram unânimes em dizer que erraram em suas previsões. Porém, mostramos pra eles que na verdade foram corretos em suas previsões pois o vidro clareou, resultado que a maioria apostou. Também ressaltamos que a cor do vidro tende ao branco à medida que o tamanho diminui.

Grupo 1: *A cor do vidro ficou esverdeado. Não, prevemos que a cor seria transparente.*

Grupo 2: *Não. Ficou um amarelo-esverdeado, parecendo areia.*

Grupo 3: *Não, achamos que iria ficar branco, porém de certa forma clareou.*

Grupo 4: *Não, pensamos que a cor ficaria mais concentrada.*

Consideramos a resposta do grupo 3 interessante, segundo a análise do grupo, quanto mais compacto estiver as moléculas de vidro colorido mais escuro torna o material. Aproveitamos essa abordagem e perguntamos, o que aconteceria se esfarelássemos uma garrafa de cerveja (marrom) e depois

colocássemos tudo dentro de um pequeno copo transparente? Ficaram divididos mais a maioria respondeu que ficaria claro. Ou seja, quisemos provar que a mesma quantidade de matéria produz efeitos ópticos diferentes.

Grupo 1: *Quando o vidro foi triturado, houve menor área de contato entre os cacos e a partícula de luz, mudando a cor do vidro.*

Grupo 2: *As partículas menores ficam mais claras do que o vidro grande, ou tudo junto.*

Grupo 3: *Pois foi triturado e quanto mais compactado os grãos mais escuros ficam, ou seja, quando separou o vidro ficou mais claro.*

Grupo 4: *A cor dispersou porque foi dividido em inúmeras partes.*

Todas as afirmações dadas para a questão 3, concordam que existe uma dependência do tamanho do grão, do objeto. Eles não conseguiram explicar o fenômeno a partir dos conceitos de absorção e espalhamento.

Grupo 1: *Sim, pois quanto menor a partícula, mais fácil é a partícula de luz passar entre as partículas de vidro.*

Grupo 2: *Sim, pois na maior o vidro está mais concentrado.*

Grupo 3: *Sim, pois quanto menor mais claro fica.*

Grupo 4: *Sim, pois ficou minúsculo ao ser triturado. Quanto menor, mais claro fica.*

O objetivo dessa atividade era mostrar que conforme o tamanho do corpo diminui, também decai sua capacidade de absorção, pois depende da área, provocando um vidro mais claro, tendendo ao branco. A cor branca também é resultado do espalhamento da luz, pois à medida que aumentamos a quantidade de interfaces, ou seja, números de grãos de vidro, mais a luz é espalhada igualmente em todas as direções e esse efeito é responsável por gerar a cor branca. A coloração branca das nuvens está baseada nesse processo.

Para analisar melhor os efeitos do espalhamento múltiplo, elaboramos algumas questões para ajudar na investigação do fenômeno. Nossa meta era causar a curiosidade sobre o esclarecimento da formação da coloração branca em elementos formados por materiais transparentes, como neve, sal, nuvem, etc.

Consolidando o Aprendizado

1. De acordo com a imagem o floco de neve pode ser considerado um material transparente?



Figura 5.4: Imagem de um grão de neve e um boneco representado um aglomerado de flocos de neve.

2. Acima temos a imagem de um boneco de neve. De acordo com a imagem ele pode ser considerado um material transparente? Explique.
3. Aponte uma diferença nas imagens do floco de neve e do boneco de neve para que sejam materiais opticamente diferentes.
4. Explique como os raios de luz se comportam diante de um material transparente.
5. O açúcar representa outro exemplo do dia a dia onde observa-se o fenômeno do espalhamento múltiplo da luz. Cite outros exemplos do cotidiano em que se aplica esse fenômeno.

A primeira pergunta é bem simples e todos responderam corretamente.

Grupo 1: *Sim, mas isolado.*

Grupo 2: *Sim, parece um cristal.*

Grupo 3: *Sim.*

Grupo 4: *Sim.*

Na questão 2, dois grupos observaram que a densidade de flocos permitia que a luz fosse refletida várias vezes, para então formar o branco. Ou seja, resultado do espalhamento múltiplo.

Grupo 1: *Não, porque ele está obstruindo a passagem por ele.*

Grupo 2: *Não, com a junção das partículas mais a reflexão da luz, tem-se branco visualmente.*

Grupo 3: *Não, pois ele é a junção de vários flocos transparentes de neve que refletem a luz e o torna branco.*

Grupo 4: *Não, pois uma quantidade de flocos de neve foi concentrada.*

Os grupos responderam na terceira questão que quantidade de partículas, uma molécula e um aglomerado, produziam efeitos ópticos diferentes. Em um grão transparente, não ocorrem múltiplos espalhamentos como em um montante.

Grupo 1: *A sua concentração.*

Grupo 2: *A quantidade de flocos juntas.*

Grupo 3: *O boneco de neve é a junção de vários flocos de neve tendo uma diferença de cor.*

Grupo 4: *Questão da quantidade, em uma há concentração, na outra não.*

Na quarta questão os grupos responderam que a luz atravessa um material transparente ou espalham. Nenhum dos grupos respondeu que parte da

luz atravessa e outra parte é espalhada. Mas, foram capazes de perceber que não ocorre somente a transmissão de luz quando a mesma incide sobre algo transparente.

Grupo 1: *As partículas espalham a luz.*

Grupo 2: *Eles o atravessam, como por exemplo a água em estado líquido.*

Grupo 3: *O material transparente recebe a luz, interage e distribui a luz recebida.*

Grupo 4: *Eles atravessam o material.*

Os alunos responderam bem à questão 5, o grupo que mencionou a questão da água, recebeu a explicação do caso das nuvens, que são formadas em sua maior parte por água e o resultado é o branco.

Grupo 1: *Na nuvem, na neve, no sal.*

Grupo 2: *A água. Uma gota é transparente, quando junta também, mas depende das reflexões, das partículas e até de como enxergamos.*

Grupo 3: *O sal, vidros, a coloração das nuvens e a cor do céu.*

Grupo 4: *Sal, vidro, etc.*

Perguntas da atividade 2.2:

Perguntas prévias:

1. Existe diferença de brilho na primeira imagem projetada?
2. Identifique as imagens que representam o recipiente com tinta branca e o com tinta preta. Explique.

3. Existe diferença de brilho na última projeção? É possível distinguir quais são os mecanismos que produzem a escuridão em cada uma das figuras? Explique.

A primeira imagem projetada corresponde a projeção da esquerda da figura 5.3. Está nítido que existe uma diferença entre os recipientes.

Grupo 1: *Sim.*

Grupo 2: *Sim.*

Grupo 3: *Sim.*

Grupo 4: *Sim.*

Os alunos ficaram bastante divididos com o questionamento da pergunta 2, mas a maioria respondeu que a imagem mais escura continha tinta branca, resultado do espalhamento. Porém, é o contrário. Essa confusão era esperada e achamos interessante que a maioria dos alunos não escolheu a resposta mais óbvia, indicando que eles acreditam que o processo de espalhamento é tão eficiente quanto a absorção.

Grupo 1: *O mais escuro o branco o mais claro o preto, pois o branco espalha a luz enquanto o preto absorve.*

Grupo 2: *Há divergências nas opiniões, metade acha que a mais clara é branca a outra escura, e o mesmo com a preta.*

Grupo 3: *O recipiente 1 tem tinta branca e o 2 tintas preta.*

Grupo 4: *O preto absorve a luz enquanto a branca reflete a luz.*

Também constatamos uma confusão para responder à questão 3, teve grupo que não achou diferença na imagem e teve grupo que percebeu distinção (imagem da direita figura 5.3). Apesar de opiniões contrárias, não existem

contrastes entre as duas imagens, sendo impossível identificar os processos que causaram a escuridão das imagens apenas olhando para a projeção na parede.

Grupo 1: *Não. Não, os dois possuem grande concentração de partículas.*

Grupo 2: *Não, tudo ficou com a mesma cor.*

Grupo 3: *Sim, a cor preta absorve a luz e a cor branca espalha.*

Grupo 4: *Sim, a concentração de uma nova substância corante 1 branco e 2 preto.*

Pergunta pós observação:

Após a revelação da cor de cada recipiente, discuta se sua previsão está de acordo com a realidade. Apresente uma explicação para o fenômeno apresentado.

As respostas dadas após a revelação das cores dos recipientes, foram muito confusas, por exemplo, o grupo 1 responde na questão 1 que a imagem mais clara continha tinta preta, errado. Mas, quando respondem à questão pós dizem que estavam certos. Identificamos um desalinho das ideias quando compararmos as próprias respostas.

Grupo 1: *Todos acertamos, a adição da tinta interrompeu a passagem da luz pela água.*

Grupo 2: *Metade certa, metade errada. O fenômeno ocorreu em questão de um refletor, cujo funcionamento é igualmente a um espelho. Assim é trocado a posição dos potes, ficando ao contrário.*

Grupo 3: *Sim, pois o branco refletiu a cor do preto.*

Grupo 4: *Por causa que a cor preta tem a tendência de absorver os raios de luz enquanto o branco refleti-los.*

Concluimos a atividade 2.2 esclarecendo que nem sempre é possível identificar o mecanismo de extinção predominante na natureza. Para ilustrar, mencionamos que a mesma nuvem cinza (visão do solo), pode ser branca e brilhante se vista por uma pessoa no avião (visão por cima). Inicialmente, pensamos que a nuvem está cinza porque as partículas presentes na sua composição estão absorvendo a luz, porém, com a afirmação de que por cima está brilhante concluimos que a direção de espalhamento mudou, direcionado para frente, e por isso a luz não é transmitida para o solo. E o processo dominante na atenuação da luz é o espalhamento.

Observação importante: dependendo da tinta que for usada, o resultado pode ser diferente. Na primeira vez que executamos essa prática para a nossa própria análise, a imagem mais escura era produzida pela tinta branca e a mais clara pela tinta preta, figura 5.5. Mas as tintas não foram as mesmas que usamos na sala de aula, manipulamos com tinta guache, enquanto que na sala de aula utilizamos um corante líquido, também testado previamente. Optamos por realizar na sala de aula o experimento com corante, porque eles vêm em frascos conta gota nos permitindo realizar uma mistura com densidades semelhantes para cada tinta.

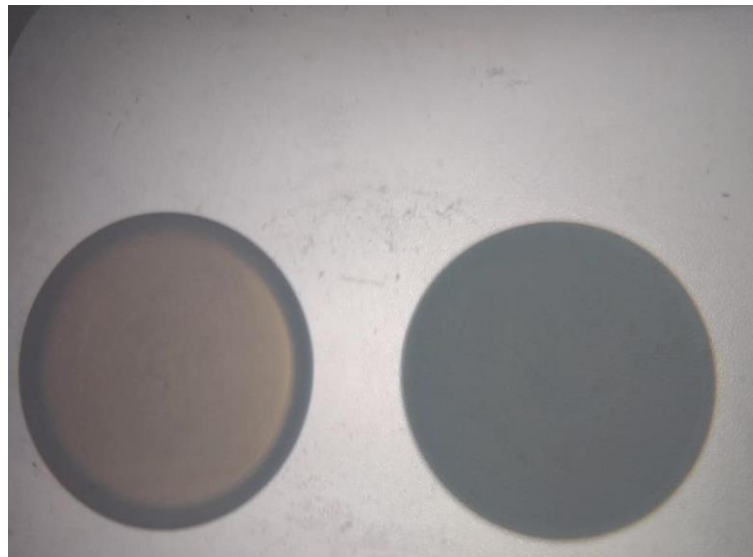


Figura 5.5: Projeção de dois recipientes idênticos. A imagem da esquerda contém mistura de água e tinta preta, direita água e tinta branca.

As propostas desenvolvidas para a atividade 2, surtiram resultados razoáveis. Mesmo os alunos não possuindo nenhum conhecimento na área estudada e respondendo as questões de modo confuso, foi possível discutir e investigar fenômenos interessantes e que fazem parte do cotidiano. Não podemos afirmar que as práticas possibilitaram aos alunos um domínio dos conceitos expostos, mas oportunizaram uma vivência diferente do que normalmente fazem nas aulas de Física.

5.3 Atividade 3: Propagação de Luz em Lâminas Transparentes e em Meios Ópticos Homogêneos e Heterogêneos

Nos experimentos anteriores focamos no processo de extinção da luz através da absorção e espalhamento. A atividade 3, abrange em uma de suas práticas uma abordagem diferente, veremos a intensidade luminosa aumentar, encadeamento contrário ao visto até o momento. Também discutiremos as implicações dos índices de refração do meio óptico nas interações com as partículas do meio. Para a realização dessas práticas, usamos 2 tempos de aula e os alunos permaneceram divididos em grupos com os mesmos componentes.

Atividade 3.1: Lâminas Transparentes

A atividade 3.1 questiona a formação de um espelho a partir de materiais transparentes. Os grupos recebem o roteiro com as perguntas desenvolvidas para a discussão da prática e respondem as prévias. Em seguida, uma placa quadrada de acetato transparente é mostrada a turma, e então outras placas são adicionadas a primeira até formar uma pilha. Os alunos observam o que acontece com o brilho do conjunto de placas e respondem as questões pós exame. No fim, explicamos o que acontece com a luz quando, as lâminas são adicionadas. Para tal, desenhamos no quadro um esquema semelhante ao da figura 3.5 e realizamos a seguinte descrição: quando a luz incide sobre uma placa, parte da luz é refletida e outra parte é transmitida. A luminosidade transmitida pela primeira placa é a incidência da segunda e, portanto, parte dessa energia será transmitida para o meio e outra será refletida, essa refletividade da segunda placa atingirá a primeira placa e novamente parte será

transmitida e outra parte refletida. Logo, é natural concluir que a primeira placa sempre refletirá uma quantidade de luz maior que as placas inferiores, porque cada lâmina inferior emitirá uma porção de luz que será transmitida ao início. À medida que o número de placas aumenta, a refletividade continua aumentando, até atingir um ponto de diminuir os retornos, em que a adição de outra transparência não produz um aumento considerável. Essa explicação foi feita apontando para o esquema desenhado e também desconsideramos os efeitos de absorção, com o objetivo de simplificar e facilitar o entendimento.

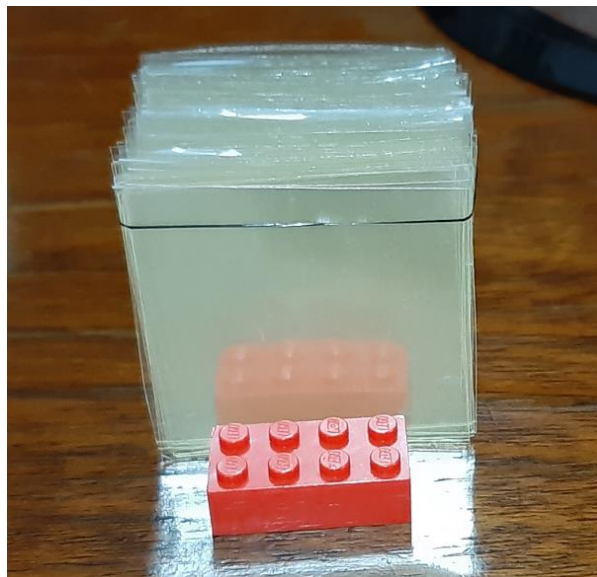


Figura 5.5: Pilha de placas de acetato transparentes.

Atividade 3.2: Brilho em Meios Porosos

As lâminas transparentes também foram empregadas no desenvolvimento da atividade 3.2. O projeto consiste em analisar o que ocorre quando pilhas de acetato, com quantidades iguais, são mergulhadas em substâncias diferentes, no caso, ar, água e glicerina. Pedimos, aos alunos que comparassem o brilho de cada um dos montantes e discutissem sobre os efeitos observados.

Observação: cada lâmina precisa ser mergulhada no fluido separadamente.

Quando o fluido circundante possui um índice de refração muito próximo do índice de refração do material transparente decorre a homogeneização do meio, e a luz interage como se fosse apenas um único meio, diminuindo os efeitos de espalhamento. Por isso, a placa que está no ar é a mais brilhante, pois a diferença entre os índices de refração é o maior.

$\Delta 1$ = Diferença entre os valores dos índices de refração do acetato e do ar.

$\Delta 2$ = Diferença entre os valores dos índices de refração do acetato e da água.

$\Delta 3$ = Diferença entre os valores dos índices de refração do acetato e da glicerina.

$$\Delta 1 > \Delta 2 > \Delta 3$$

Toda essa explicação foi feita no fim da atividade, depois que os alunos já tinham respondido todas as perguntas. Também questionamos a turma se eles percebiam alguma relação com o fato de a areia seca ser mais clara que a areia escura. E a resposta foi positiva, disseram que o grão de areia possuía índice de refração mais próximo da água do que do ar, e, portanto, o espalhamento seria menor no grão molhado do que no seco, produzindo essa diferença de brilho entre as partículas.

As perguntas e os argumentos dados pelos educandos para a atividade 3 estão descritos abaixo, assim como as reflexões sobre as mesmas.

Perguntas da atividade 3.1:

Perguntas prévias:

1. É possível fazer observações de objetos através da lâmina transparente apresentada pelo professor? Por quê?
2. Faça uma previsão do que irá acontecer à medida que o número de lâminas transparentes aumentar. Considerando aspectos como transparência, opacidade e brilho.

Respostas esperadas para a primeira questão.

Grupo 1: *Sim, pois é transparente.*

Grupo 2: *Sim, porque é apenas uma lâmina.*

Grupo 3: *Sim.*

Grupo 4: *Sim, pois a luz consegue atravessar facilmente.*

Segundo as respostas dadas pelos grupos para pergunta 2 à medida que placas são adicionadas, a nitidez para observar objetos por meio das mesmas diminui. E o grupo 4, mencionou uma possível formação de imagem por reflexão.

Grupo 1: *Perderá a nitidez.*

Grupo 2: *Nosso grupo acredita que vai ficar embaçado\desfocado.*

Grupo 3: *Conforme o número de lâminas aumenta, vai embaçando.*

Grupo 4: *O foco vai diminuindo, até chegar um momento que ela reflete o que pôr na frente dela.*

Perguntas pós observação:

1. Descreva o que ocorreu com o conjunto de lâminas transparentes no final do processo, está de acordo com a previsão do grupo?
2. Discuta com seus colegas e apresente uma proposta para o fenômeno observado.
3. Estime a quantidade mínima de lâminas que torna o efeito observado possível.

Os grupos puderam observar que a pilha de placas transparentes passou a refletir a imagem de um objeto, figura 5.5. A previsão que eles fizeram também foi acertada, pois eles destacaram que o conjunto perderia a visibilidade por meio das lâminas.

Grupo 1: *Ele refletiu o objeto.*

Grupo 2: *Sim, ficou fosco\desfocado, porém o objeto ainda é refletido.*

Grupo 3: *Sim, foi ficando embaçado, quanto mais colocou, menos dava para ver.*

Grupo 4: *Eles ficaram com a “função” de um espelho. Não.*

Os estudantes conseguem perceber que o sistema está funcionando como um espelho. Segundo o grupo 3, isso ocorre por causa dos efeitos de transmissão e reflexão entre as placas.

Grupo 1: *Pois quando há junção das lâminas, torna-se um espelho perfeito.*

Grupo 2: *O objeto foi refletido, porque as lâminas juntas tornam-se um espelho.*

Grupo 3: *O fenômeno ocorreu por conta da transmissão e reflexão das lâminas.*

Grupo 4: *Chega ao ponto que se uma parte da luz bate e a outra parte volta.*

Consideramos que a quantidade mínima de lâminas sobrepostas capazes de produzir uma imagem nítida de um objeto, como num espelho, é de 25 placas. E os alunos fizeram boas previsões a respeito, apenas um grupo discordou, apontando 9 lâminas como a quantidade mínima necessária para a formação da imagem.

Grupo 1: 20

Grupo 2: 25

Grupo 3: 23 a 25

Grupo 4: *25 não é possível enxergar, até 9 é possível.*

Perguntas da atividade 3.2:

Perguntas prévias:

1. Faça uma previsão do que irá acontecer com o conjunto de lâminas transparentes quando forem mergulhadas em água e em glicerina. Justifique.

Os grupos se dividiram, teve grupo que disse que iria aumentar o brilho das placas quando na água e diminuir na glicerina e teve opinião contrária dizendo que o brilho seria maior na glicerina.

Grupo 1: *A água vai distorcer a imagem, e haverá um brilho, mas distorcido, com glicerina o brilho irá aparecer.*

Grupo 2: *O reflexo da água vai parecer maior o brilho.*

Grupo 3: *Vai aumentar o brilho na água. Com a glicerina vai diminuir.*

Grupo 4: *A glicerina ficará com a reflexão menor. E na glicerina o índice de refração é menor.*

Pergunta pós observação:

1. Discuta se sua previsão está de acordo com o que foi observado. Apresente uma explicação para o fenômeno apresentado. Associe com alguns exemplos cotidianos.

Nenhum dos grupos previu corretamente que o brilho diminui quando as placas estão mergulhadas na água e na glicerina e que na glicerina é menor de todos os três meios. Além do mais, não conseguiram identificar com fenômenos cotidianos.

Grupo 1: *Na água houve brilho, diferente da glicerina, em que o índice de refração é quase nulo.*

Grupo 2: *O brilho diminuiu, na glicerina fica invisível, distorcido e sem brilho.*

Grupo 3: *Não, dentro da água reflete menos na água. Sim, o índice de refração é menor, a luz passa como se fosse o único meio.*

Grupo 4: *O fenômeno ocorre por causa da refração.*

A abordagem desenvolvida para a atividade 3, obteve resultados medianos, similarmente as duas primeiras atividades. Mas, conseguimos promover uma discussão interessante e com aspectos do cotidiano, como o caso da areia molhada.

Ficamos satisfeitos com as práticas desenvolvidas e aplicadas em sala, pois oportunizamos aos estudantes acesso a um conteúdo pouco discutido nas aulas de Física, mas com muita aplicação no dia a dia.

O fato de as práticas experimentais terem tido uma duração grande, prejudicou o processo de ensino-aprendizagem. Gostaríamos de poder enfatizar mais aspectos relacionados aos efeitos de espalhamento e absorção e em alguns casos, refazer o experimento (experimento da lei de Lambert-Beer). Por isso, sugerimos que o docente foque em uma atividade, a fim de, investigar de modo mais relevante para o entendimento dos alunos os fenômenos.

Capítulo 6

Considerações Finais

A abordagem didática apresentada nesse trabalho e aplicada em sala de aula, teve uma aceitação favorável pelos alunos porque discutiu efeitos do cotidiano que, apesar de familiares, não tinham explicação científica conhecida para eles. Assim, não só adquiriram um novo conhecimento, mas foram ativos no processo de ensino aprendizagem podendo colaborar com suas observações e percepções a respeito dos fenômenos.

Os resultados obtidos atingiram parcialmente seus objetivos pois os alunos puderam apreciar uma discussão nova no campo da Óptica. Porém quando olhamos para as soluções apresentadas por eles, percebemos muitas dificuldades em associar com os conceitos de espalhamento e absorção da luz. Uma das possíveis causas para esse desfecho, pode estar relacionada com o tempo de aplicação e discussão dos experimentos. Devido á quantidade de práticas que precisavam ser aplicadas (atividade de Lambert-Beer muito longa),

acabamos fazendo tudo em um período muito curto, insuficiente. E, portanto, os debates foram prejudicados.

Em virtude disso, sugerimos que o professor foque em uma determinada atividade e a realize sem pressa para que as discussões sobre a temática sejam bem aprofundadas. Especificamente, para o professor que escolher o experimento que investiga a Lei de Lambert-Beer, aconselhamos que realize o experimento da concentração, porque esse sempre gera dados melhores, permitindo um ganho de tempo no processo de coleta de informações.

Os roteiros experimentais expostos aqui, podem ou não serem aplicados em sala. O docente deve avaliar se as perguntas são pertinentes para sua turma e conforme julgar melhor, pode realizar mudanças necessárias a fim de atingir os objetivos traçados.

Apêndice A

Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas

Taísa de Oliveira Vieira

&

Felipe Arruda de Araújo Pinheiro e Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Taísa de Oliveira Vieira, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas

A Óptica representa um grande campo de estudo da Física com grande variedade de aplicações no cotidiano. O significado da palavra sugere obter informações sobre o comportamento da luz com a matéria e seus efeitos. Porém, o ensino de óptica no ensino médio está tipicamente limitada ao estudo da óptica geométrica. Essa afirmação é facilmente comprovada quando consultamos os livros didáticos de Física para o Ensino Médio. Os conteúdos encontrados nos mesmos não contemplam assuntos como extinção, absorção e espalhamento múltiplo da luz. A explicação de vários fenômenos presentes no nosso cotidiano como o céu azul, a cor branca da neve, açúcar, sal, espumas, a escuridão no fundo do mar, tom azulado do gelo, areia molhada mais escura que areia seca, dentre outros, tipicamente não é abordada em salas de aula do ensino médio.

Diante deste cenário, o presente trabalho pretende explorar ramos da Óptica com pouca visibilidade na sala de aula proporcionando aos docentes um conjunto de experimentos de baixo custo a fim de investigar vários efeitos luminosos interessantes e envolvendo os estudantes de forma ativa e participativa. O avanço científico e tecnológico têm proporcionado acesso a uma variedade de ferramentas que podem contribuir para a produção de aulas práticas enriquecendo o processo de ensino-aprendizagem. O *smartphone* é um excelente instrumento para fins educacionais, porque possui uma variedade de sensores acessíveis à maioria dos discentes. Ao considerar a viabilidade dos usos de *smartphones* e *tablets* em sala de aula, Vieira (2013, p. 10) destaca que:

A diversidade de sensores encontrados em *smartphones* e *tablets* torna possível realizar um grande número de experimentos e observações sem a utilização de sistemas externos de aquisição de dados. Mais ainda, a extrema portabilidade dos aparelhos facilita a montagem de experimentos em salas de aulas regulares, dispensando em muitos casos o deslocamento dos alunos a um laboratório (que pode nem existir na escola).

Seguem as descrições dos fenômenos luminosos investigados, as propostas experimentais que foram elaboradas e a combinação e análise desses experimentos para a discussão dos conceitos físicos presentes na propagação da luz em meios complexos. As práticas abordadas aqui não seguem uma sequência didática e, portanto, são independentes e podem ser aplicadas como o professor desejar.

Os experimentos expostos nessa seção têm como foco a discussão pedagógica, ou seja, não nos preocuparemos com a descrição do aparato experimental; esse detalhamento está presente no capítulo 5 do livro *Fundamentals of Atmospheric Radiation*, de Bohren e Clothiaux (2006) e em *Clouds in a Glass of Beer—Simple Experiments in Atmospheric Physics*, de Bohren (2001).

Fenômenos Ópticos

Cores do Céu

O céu pode ser considerado uma grande tela de pintura em constante mudança, ora é muito azul, cinza, vermelho-alaranjado, com nuvens, sem nuvens, com a presença do Sol e também da Lua e as estrelas. Mesmo sendo tão comum a observação no cotidiano, muitas e muitas vezes somos fascinados

pelas composições de cores e de formas diante dos nossos olhos. Essas observações nos instigam a querer compreender a causa dessas colorações.

Todas essas variações de cor e brilho observadas no céu ocorrem devido à presença de moléculas e partículas na atmosfera. A interação desses corpúsculos atmosféricos com a luz visível transmitida pelo Sol produz efeitos de espalhamento e absorção da luz. Isto é, determinados comprimentos de onda, quando incidem sobre as partículas são mais espalhados ou absorvidos que outros comprimentos de onda, e esse efeito é responsável pelo domínio de determinada cor. A remoção da energia do feixe incidente pode ocorrer tanto por absorção, resultando na dissipação da energia quanto por espalhamento em direções diferentes da direção inicial. A combinação dos processos de absorção e espalhamento de luz resulta no que chamamos de extinção da luz. Para simplificação da discussão, iremos considerar nesta seção que a extinção é dominada pelo espalhamento, ou seja, o processo de absorção não será considerado nesta discussão. No capítulo 3, analisamos a conexão entre o comprimento de onda e o tamanho do espalhador. Vimos que os comprimentos de onda correspondentes a luz violeta e azul são mais espalhados do que o vermelho, porque as partículas que participam do processo de espalhamento possuem dimensões pequenas quando comparados aos comprimentos de onda da luz visível, o que caracteriza o espalhamento de Rayleigh, (Krapas e Santos 2002). A combinação desse fator somado à sensibilidade do olho humano (mais sensível ao azul do que ao violeta) geram a percepção do azul do céu que é visto na maior parte do dia. O fato de termos no nascer e pôr do Sol tom avermelhado é explicado pelo caminho óptico percorrido por cada frequência da luz visível. Sabe-se que o vermelho é o menos espalhado e, portanto, o mais transmitido. Logo, pra uma espessura atmosférica grande o vermelho será o mais transmitido enquanto que as outras frequências são extintas. Tanto no amanhecer quanto no entardecer, a luz se propaga por uma distância maior na atmosfera do que nos outros instantes do dia e, por essa razão, o céu se apresenta vermelho nesses horários.

Sempre que imaginamos o céu ensolarado também vem à mente a presença de grandes nuvens brancas. A presença das nuvens no nosso dia a dia é tão evidente que esse elemento é objeto de estudo logo nas séries iniciais

dos discentes e, no decorrer do ensino básico, o estudante será exposto a explicações sobre o processo de formação das nuvens mais de uma vez. Portanto, esse conhecimento é garantido para qualquer estudante. O que não é discutido é a questão da coloração da nuvem, o motivo de ser branca, ou a explicação para o tom cinza em dias frios.

O branco da nuvem é na maioria das vezes explicado como sendo o fruto do múltiplo espalhamento que a luz visível sofre ao atravessar um aglomerado de partículas que compõe a estrutura da nuvem. Mas espalhar todos os comprimentos de onda igualmente não é suficiente para a formação do branco. Se essa teoria fosse suficiente para explicar o branco o copo de leite seria azul, pois as partículas de leite espalham mais azul do que os outros comprimentos de onda, contudo isso não é verificado. Portanto, existem outros conceitos envolvidos nesse processo da formação do branco, a saber, o fato da nuvem ser opticamente espessa e fracamente absorvente. Por opticamente espesso, entende-se um meio com pequeno livre caminho médio em relação ao tamanho do sistema (ver seção 3.3.3). E fracamente absorvente está relacionado com a pequena dissipação no meio. Então, a formação de branco que vemos nas nuvens, no açúcar, no sal, no trigo, no leite, na neve e em outros elementos está relacionado com a combinação dos fatores citados acima. Um livre caminho médio pequeno e pouca absorção para a luz produz múltiplos espalhamentos e a formação da cor branca.

A mudança do branco para o cinza na coloração das nuvens em dias frios ou chuvosos também é pouco discutida na área de ensino, e por isso iremos tratá-lo aqui. Nesse contexto, podemos pensar que a extinção que provoca o escurecimento das nuvens está relacionada com a absorção, isto é, o meio óptico mudou e estão presentes uma quantidade relevante de partículas absorventes e por isso ocorre essa diminuição da intensidade de espalhamentos para formar o cinza. Porém, essa afirmação é desmentida quando observamos as nuvens por cima numa viagem de avião. As nuvens são brancas e brilhantes, diferentes da visão do solo. A conclusão imediata é que ocorreu uma mudança na direção do espalhamento e pouca luz é transmitida para quem encontra-se no solo. Esse desfecho possui explicação no conceito de espalhamento direcional (ver seção 3.3), pois essa grandeza define se o espalhamento ocorrerá

em todas as direções ou concentrada em uma direção. No frio ou chuva, as partículas que formam as nuvens são maiores do que em dias ensolarados. Um espalhador pequeno, produz o efeito de interferência construtiva das ondas emitidas pelos dipolos justamente pela proximidade das cargas e o resultado é um espalhamento em todas as direções. À medida que o tamanho do espalhador aumenta, os multipolos eletromagnéticos de ordem superior passam a contribuir para o espalhamento, possibilitando o fenômeno de interferência construtiva ou destrutiva numa determinada direção, de modo que o espalhamento é preferencialmente direcionado para frente.

Cores da Neve

Sabemos que a neve em geral apresenta coloração branca e o processo que causa essa cor é semelhante ao das nuvens estudado na seção anterior. Contudo, é possível observar um tom azulado em algumas estruturas de gelo encontradas na natureza, como por exemplo, as cachoeiras congeladas e glaciares, figura 1.



Figura 1: Cachoeiras congeladas. Minnehaha Falls, Estados Unidos.

A explicação para essa manifestação óptica está relacionada com a espessura do meio, um meio óptico composto por pouco espalhamento e muita absorção. O tom azulado aparece nas camadas finas de gelo, isso porque o espalhamento depende da distância entre as moléculas. O gelo com tonalidade azul é composto de bolhas de ar e por consequência ocorre um aumento no espaçamento entre os espalhadores, isto é, o livre caminho médio percorrido pelo fóton é maior e, portanto, a quantidade de luz espalhada será menor. Além disso, a probabilidade de um fóton ser absorvido quando incide uma única vez numa bolha aumenta quando o tamanho dos espalhadores aumenta e o gelo possui absorção mínima para o comprimento de onda da luz azul e é mais absorvente para a luz vermelha. O tom azulado de uma cachoeira de neve é devido à composição do meio óptico, pouco espalhamento e alta absorção, principalmente para o vermelho.

Durante esse processo os comprimentos de onda maiores (vermelho), são mais facilmente absorvidos e o espalhamento é mais relevante para os comprimentos de ondas curtos (azul). Desse modo, a luz azul será mais transmitida numa camada fina de gelo do que as outras faixas do visível, resultando o tom azulado de muitas estruturas de gelo.

Esse fenômeno muitas vezes é explicado usando como base teórica o conceito do espalhamento de Rayleigh, porém esses fundamentos são erroneamente aplicáveis. Sabe-se que o comprimento de onda correspondente ao azul é o mais espalhado na atmosfera e o menos transmitido, percorrendo uma distância atmosférica pequena a cor azul sobressai. Para uma distância grande o vermelho se sobressai, pois é o mais transmitido e o menos espalhado.. Mas, essa ideia não é observada na neve, pois quando os fótons se deslocam por uma camada fina de neve, como o gelo espumante, o azul é evidente. Contudo, quando se transita um caminho maior, como numa caverna de gelo, o azul continua sendo mais espalhado e não o vermelho como esperado pela lei de Rayleigh.

Espuma Branca

Nessa parte do capítulo, iremos expor a explicação para a cor branca da espuma, muito comum de vermos na água da praia, em produtos de limpeza e em certas bebidas como cerveja e refrigerante.

A espuma é caracterizada por um meio formado por bolhas finas de líquido ao redor do ar. A bolha tem a mesma capacidade de espalhar os fótons que uma gota feita do mesmo material líquido e com o mesmo tamanho, a diferença é que a capacidade de absorção da bolha é muito menor em comparação com a gota. Dessa forma, o meio óptico encontrado na espuma é favorável à formação da coloração branca, pois o espalhamento é muito maior que a absorção.

Escuridão no Fundo do Mar

Muitas pessoas já tiveram a oportunidade de mergulhar alguns metros de profundidade dentro do mar, e puderam constatar um conhecimento comum, que é menor luminosidade a certas profundidades, mesmo num dia muito ensolarado com abundância de luz na superfície. O principal motivo para a extinção da luz neste caso é o predomínio do mecanismo de absorção relativamente ao espalhamento e, por consequência, os fótons incidentes são rapidamente absorvidos, diminuindo exponencialmente a intensidade da luz com o aumento da profundidade, Lei de Lambert.

Areia Molhada

Nessa seção, discutiremos uma manifestação óptica muito interessante e que com certeza já foi contemplada por muitos. A diferença de brilho da areia seca para a areia molhada. Ninguém tem dúvida em dizer que a areia molhada é mais escura que a areia seca, mas decerto poucas pessoas foram esclarecidas sobre as razões desse efeito.

Já sabemos que, dependendo do tamanho do espalhador, o fóton pode ser preferencialmente espalhado numa direção específica. Partículas com tamanho reduzido em confronto ao comprimento de onda da luz incidente espalham em todas as direções (ângulo médio de espalhamento 90°) e espalhadores maiores que o comprimento de onda da luz incidente tendem a espalhar numa direção preferencial (ângulo médio de espalhamento menor que 90°).

A figura 2 ajuda a entender a importância do ângulo que o raio de luz incidente faz com o raio de luz espalhado. Na imagem da esquerda, o ângulo formado entre os raios é de 90° , e o caminho produzido por essa abertura é muito simples, e a luz rapidamente emerge. Na ilustração da direita, o ângulo entre os raios é menor que 90° e podemos verificar que a trajetória que os raios percorrem até emergir é muito maior.

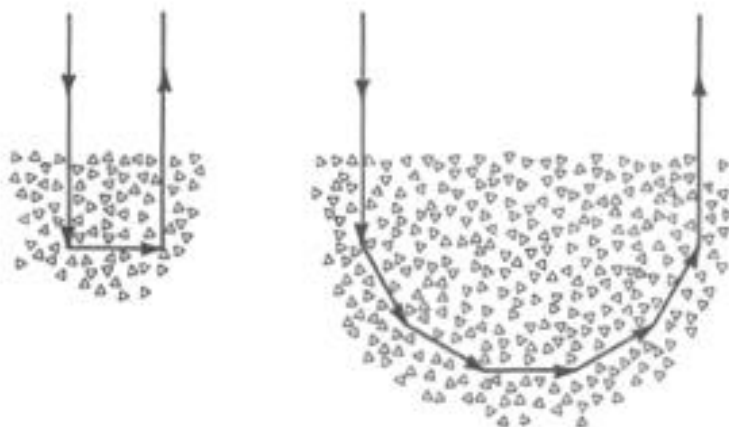


Figura 2: Dois possíveis caminhos que a luz pode seguir ao atravessar um meio óptico. Ilustração da esquerda, ângulo entre o raio incidente e o disperso é de 90° e na direita é menor que 90° . Essa diferença é relevante porque produz percursos distintos. A escolha do caminho é meramente ilustrativa, existem outras possibilidades. **Fonte:** Bohren (2001).

Como resultado desses caminhos ópticos distintos, é mais fácil a luz ser absorvida na segunda configuração do que na primeira, pois há mais colisões com centros espalhadores, intensificando as chances de absorção do fóton. Esse fator é uma propriedade importante para a definição do brilho de um corpo.

Para uma quantidade significativa de eventos de espalhamento, um fóton fica mais suscetível à absorção. Como decorrência deste efeito a areia tem menor brilho. Para o contrário, o efeito é de maior brilho.

Além da influência do tamanho dos espalhadores e/ou absorvedores, outro aspecto que precisa ser considerado é o meio óptico circundante, no caso da areia seca, o ar, e da areia úmida, a água. Quando o fluido circundante possui um índice de refração muito próximo dos índices de refração das partículas de areia o espalhamento da luz dentro do sistema é menor, porque o meio está mais homogêneo desviando pouco o raio luminoso, ou seja, o caminho óptico para a luz emergir é muito maior. Por isso, a areia molhada é mais escura. Essa homogeneização do meio gera um espalhamento preferencialmente na direção frontal, diminuindo ainda mais o brilho das partículas. Por este motivo, temos que quanto maior for a diferença entre os índices de refração do meio circundante e os índices de refração do espalhador, maior será o brilho do corpo.

Observação: Além da areia esse fenômeno pode ser observado em outros meios porosos, como cortiça, madeira, cimentos, cerâmicas e etc.

Garrafas Partidas

A figura 3 mostra pedaços de vidro com tamanhos diferentes. Os pedaços maiores são verdes escuros e os bem pequenos são verdes claros. Essa distinção de cores está diretamente relacionada com o tamanho do grão de vidro. À medida que a dimensão diminui a área de seção transversal de absorção também diminui, atenuando a capacidade de absorção dos grãos, pois a absorvidade da molécula está relacionada com o tamanho. O espalhamento por cada partícula também decai, porém o decaimento da absorção é mais rápido do que o espalhamento, resultando numa coloração cada vez mais clara.



Figura 3: pedaços de vidro

Pilha de Placas Paralelas e Transparentes

Um resultado muito instigante, é notado quando empilhamos uma quantia de placas transparentes. A intensidade de brilho é muito maior num conjunto de lâminas do que quando se tem apenas uma, figura 4.

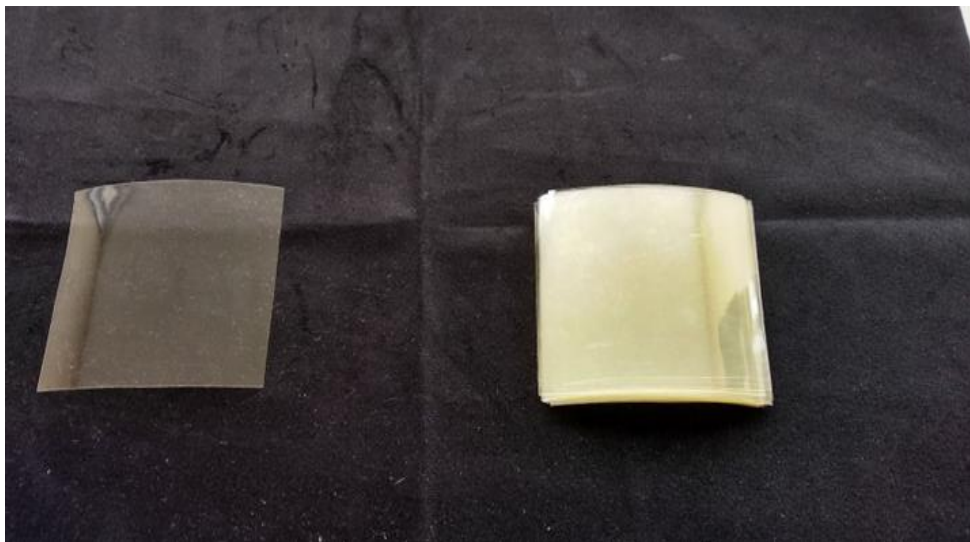


Figura 4: brilho de uma lâmina transparente versus brilho de 50 lâminas transparentes.

À medida que placas são adicionadas o conjunto torna-se cada vez mais brilhante, até alcançar um ponto em que a junção de outra transparência não

fornece uma expansão significativa no brilho. Outra informação relevante é a individualidade dos materiais transparentes usados, uma vez que, cada um terá um poder de reflexão e absorção específicos. E essas qualidades são responsáveis por definir a espessura óptica da pilha, ou seja, um número pequeno de transparências, mas com refletividade alta apresenta comportamento semelhante a um número grande de transparências, mas de material de baixa refletividade.

Quando a luz incide sobre uma placa, esquema da esquerda da figura 5, parte da luz é refletida e outra parte é transmitida. A estrutura da direita da figura mostra o raio incidente, refletido e transmitido em duas placas. Nota-se que onda transmitida pela primeira placa é a incidente da segunda e, portanto, parte dessa onda será transmitida para o meio e outra será refletida. O raio refletido na segunda placa atingirá a primeira placa e novamente parte dele será transmitido e outra parte refletido. Logo, é natural concluir que a primeira placa sempre refletirá uma quantidade de luz maior que as placas inferiores, porque cada lâmina inferior emitirá uma porção de luz que será transmitida ao início. Também é preciso levar em consideração a porção de energia que será absorvida durante o processo, de modo que os raios serão menos intensos a cada camada. À medida que o número de placas aumenta, a refletividade continua aumentando, até atingir um ponto de diminuir a luz espalhada, neste ponto, a adição de outra transparência não produz um aumento considerável da luz transmitida.

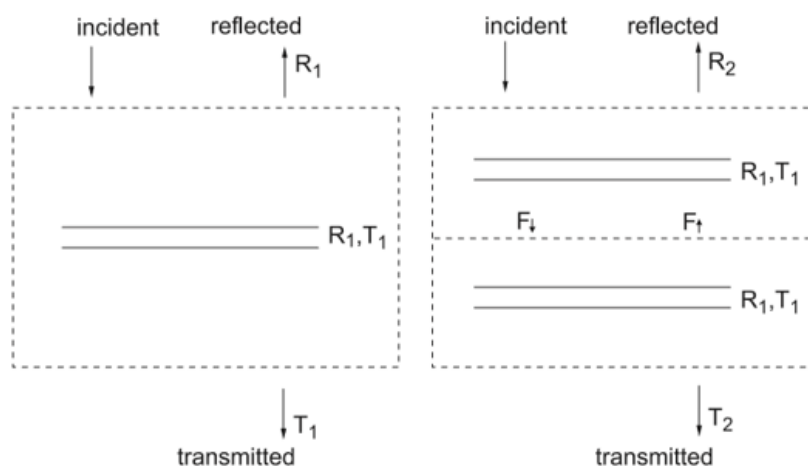


Figura 5: Esquema da esquerda representa uma placa uniforme infinita (em extensão lateral) com reflexividade R_1 e transmissividade T_1 . Segue que para

duas dessas placas paralelas (esquema da direita), suficientemente distantes (relativas ao comprimento de onda da iluminação incidente) sua refletividade R_2 e sua transmissividade T_2 são consequências das irradiâncias descendentes e ascendentes ($F \downarrow$ e $F \uparrow$) entre elas. **Fonte:** Bohren e Clothiaux (2006).

Lei de Lambert-Beer

Lei de Lambert

À medida que a luz atravessa um meio óptico sua intensidade luminosa diminuiu exponencialmente enquanto a espessura do meio óptico aumenta. Esse enunciado descreve a observação feita por Lambert (1870) sobre a transmissão de luz ao atravessar um meio. Esta lei é matematicamente expressa como, (vide derivação na seção 3.2.1)

$$I = I_0 e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

onde I representa a intensidade da luz transmitida, I_0 a luz incidente, α o coeficiente de extinção e l o comprimento do meio.

O coeficiente de extinção pode ser determinado experimentalmente e depende das partículas espalhadoras/absorventes e do comprimento de onda da luz incidente, possuindo dimensão correspondente ao inverso do comprimento

Lei de Beer

Segundo os estudos desenvolvidos por Beer (1852), a intensidade luminosa que incide sobre uma solução sofre alterações quando a concentração da mesma é alterada. Ou seja, se a concentração tiver um aumento linear a luminosidade decai exponencialmente. Essa ideia é expressa a seguir,

$$I = I_0 e^{-\gamma c}, \quad (2)$$

onde I representa a intensidade da luz transmitida, I_0 a luz incidente, γ o coeficiente de extinção e c a concentração do meio absorvente.

Entenda concentração no contexto desse trabalho como sendo uma grandeza proporcional ao volume de tinta. Sendo a constante de proporcionalidade entre essas grandezas o volume total de líquido.

Experimentos

Seguem os experimentos com fins didáticos baseadas nos conceitos discutidos acima. As práticas são baseadas nos livros *Fundamentals of Atmospheric Radiation*, de Bohren e Clothiaux (2006) e *Clouds in a Glass of Beer—Simple Experiments in Atmospheric Physics*, de Bohren (2001). Foram elaboradas com o objetivo de explorar a participação dos discentes no processo de construção do conhecimento.

Acreditamos que as atividades práticas são capazes de estimular o desenvolvimento da criatividade, da curiosidade e da capacidade de refletir criticamente despertando no aluno o interesse em conhecer a ciência e em aprendê-la através da própria vivência.

No decorrer das aulas experimentais, buscamos envolver ao máximo a participação dos alunos. Para tal, utilizamos o método científico, isto é, os alunos realizaram previsões a partir da elaboração de perguntas, construíram hipóteses, observaram a experimentação, confrontaram e por fim a conclusão a respeito do conceitos científicos presentes nos fenômenos.

Os roteiros das atividades estão presentes no apêndice B.

Atividade 1: Explorando a Lei de Lambert-Beer

Nessa seção, discutiremos o experimento proposto para a averiguação da Lei de Lambert-Beer. O aparato utilizado na prática está representado na figura 6. O intuito é realizar medidas que mostrem o decaimento da intensidade luminosa à medida que a profundidade aumenta e também quando a concentração de partículas absorvente se intensifica. Para esse fim, um aparelho *smartphone* com o luxímetro (instrumento composto de sensores capazes de medir a intensidade luminosa) ativo é colocado abaixo do recipiente (ver figura 6) para fazer a leitura da quantidade de luz (lanterna de um segundo *smartphone*) e de suas variações de acordo com as mudanças feitas no meio óptico. Os experimentos foram realizados com mistura de água e tinta preta e, portanto, o processo de extinção da luz é dominado pelo mecanismo de absorção.

Motivação: Por que para alguns metros de profundidade no mar a intensidade da luz é baixa?

Objetivos da atividade:

- Verificar o decaimento exponencial da intensidade luminosa com o comprimento;
- Verificar o decaimento exponencial da intensidade luminosa com a concentração;
- Discutir a curva exponencial.

Lei de Lambert

De acordo com a Lei de Lambert, a intensidade da luz ao atravessar um meio óptico diminui exponencialmente à medida que a profundidade aumenta. Então, para verificar experimentalmente esta lei, depositamos quantidades

iguais de mistura de água com tinta preta, correspondente a uma altura de 1 cm do recipiente e, a cada acréscimo do composto, um novo registro era feito.



Figura 6: Aparato experimental utilizado para a verificação da Lei de Lambert-Beer.

A proposta é fazer com que os discentes coletem os dados e depois marquem os pontos numa área quadriculada, para, à vista disso, analisarem o tipo de curva que foi medida. Essa atividade foi iniciada com a exposição conceitual da Lei de Lambert-Beer e os resultados foram empregados para comparar com a teoria. Mas o caminho inverso também é possível, ou seja, realizar primeiro a prática para assim conduzir os alunos ao entendimento do decaimento exponencial da luz.

Os procedimentos para análise de Beer são análogos ao experimento de Lambert, com a diferença que é a concentração do meio que aumenta linearmente.

Por que uma exponencial?

De forma optativa, no final da atividade o professor pode explorar mais a função exponencial presente nos experimentos, indagando os motivos que impossibilitam um decaimento linear, visto que os fótons sempre atravessam distâncias iguais. Como sugestão, o professor pode realizar uma prática bem simples retirada do projeto chamado *Eliminando Quadrados*, da coleção

Matemática Multimídia desenvolvido pela Universidade Estadual de Campinas.
Disponível em: [file:/Users/Home/Downloads/TELA-eliminando_quadrados---o_experimento%20\(2\).pdf](file:/Users/Home/Downloads/TELA-eliminando_quadrados---o_experimento%20(2).pdf).

No fim, o professor deve fazer o fechamento da aula discutindo as questões contidas no pós observação e analisar o entendimento adquirido pelos discentes.

Atividade 2: Introdução aos Conceitos de Espalhamento e Absorção da luz

Atividade 2.1: Espalhamento de Luz por Cacos de Vidro Colorido

O propósito dessa ação prática é mostrar a variação de brilho e da cor e a dependência do tamanho de cacos de vidro. Então, os grupos devem prever se ocorrerá alguma variação de brilho para um tamanho bem pequeno de vidro colorido (pó de vidro) em relação a um pedaço maior. Feito o palpite, o vidro colorido deve ser triturado na presença da turma, para observação dos mesmos.

Motivação: Por que o vidro colorido triturado é mais claro que um pedaço grande?

Objetivos da atividade: explorar os conceitos de espalhamento múltiplo e absorção da luz.



Figura 7: Variação de brilho/cor para tamanhos diferentes de vidro.

Após o procedimento, o docente deve promover uma discussão sobre o fenômeno observado, avaliando as repostas prévias e questionando sobre as possíveis explicações para o evento estudado. Por fim, deve esclarecer que o mecanismo de absorção está vinculado ao tamanho da área de absorção, e ao passo que essa diminuiu a absorvidade também diminuiu. Em contraponto, o espalhamento múltiplo aumenta, deixando o conjunto mais brilhoso.

Atividade 2.2: Processos de Extinção da Luz

Essa prática experimental foi desenvolvida para ser usada na discussão sobre os processos de extinção da luz através dos mecanismos de espalhamento e absorção. O experimento consiste em analisar imagens de dois recipientes idênticos projetadas na parede por um retroprojetor.

Motivação: Como podemos explicar o fato de que, em um dia chuvoso, a nuvem apresenta cor cinza para quem olha do solo e, para uma pessoa sobrevoando a mesma nuvem, a cor é branca?

Objetivos da atividade:

- Mostrar que, em muitas situações, não é possível identificar o mecanismo de extinção da luz, se por espalhamento ou absorção.

Inicialmente os recipientes são colocados sobre a região de projeção vazios, para mostrar que não existem diferenças entre os objetos. Então, fez-se uma mistura de 500 mL de água e uma gota de tinta preta e outra mistura com as mesmas proporções, porém com tinta branca (tintas de mesmo fabricante). Dessas misturas foram retirados 20 mL (seringa) e inserido em cada um dos frascos. Esses procedimentos são feitos sem que os alunos vejam, inclusive o retroprojetor é envolvido por um papel preto de modo que os estudantes não conseguem ver as vasilhas. Nesse momento os discentes divididos em grupos respondem qual das imagens está com a mistura de água e tinta preta e água e tinta branca (figura 8.a). Seguidamente, sem retirar o líquido dos recipientes foram adicionados uma gota de tinta preta na mistura preta e uma gota de tinta branca na mistura branca e o resultado é a imagem da figura 8.b, novamente foi preciso responder em quais recipientes estavam as misturas das tintas e também se havia alguma diferença nas imagens e se era possível distinguir os mecanismos de extinção.



Figura 8.a



Figura 8.b

Figura 8: Projeções de dois recipientes idênticos cada um contendo mistura de água e tinta preta e água e tinta branca com concentrações parecidas.

O objetivo dessa análise é mostrar que nem sempre é possível identificar o mecanismo de extinção predominante no meio óptico. Um exemplo

interessante relacionado a essa ideia é o caso das nuvens escuras em dias frios. A princípio pode se pensar que existe um domínio de partículas absorventes sobre as espalhadoras e por isso o brilho da nuvem diminui. Contudo, a imagem da mesma nuvem vista por cima revela a cor branca e o brilho comum dos dias ensolarados. Então, o que está ocorrendo não é a absorção dos fótons, mas sim um múltiplo espalhamento da luz, diminuindo a transmissividade através da nuvem, fazendo com que o espalhamento domine o processo de extinção da luz que chega a um observador no solo. Essa concepção é ilustrada pela figura 8.b, o recipiente da direita está com tinta branca e a espalhamento é tão grande que pouca luz atravessa o meio para atingir o anteparo.

Atividade 3: Propagação de Luz em Lâminas Transparentes e em Meios Ópticos Homogêneos e Heterogêneos

Atividade 3.1: Lâminas Transparentes

O experimento das lâminas transparentes foi elaborado com a finalidade de discutir a possibilidade de se obter um espelho a partir de materiais transparentes e também para examinar a variação de brilho em meios porosos, como areia.

Motivação: Um espelho pode ser construído a partir de materiais transparentes?

Objetivos da atividade:

- Observação da variação de brilho quando se aumenta o número de lâminas transparentes e a verificação da formação de um espelho.

✓ **Formação de um espelho:**

Consiste em questionar aspectos como transparência, opacidade, brilho e ausência de brilho à medida que placas transparentes de acetato são adicionadas formando uma pilha.



Figura 9.a: brilho de uma placa transparente versus brilho de 10 placas transparentes sobrepostas. As placas são idênticas.



Figura 9.b: brilho de uma placa versus brilho de 50 placas.

Os alunos precisam prever o comportamento das placas transparentes antes de verem a pilha formada, então os mesmos respondem algumas perguntas sobre o que possivelmente irá ocorrer. Após observarem o conjunto sobreposto de lâminas transparentes, os discentes são questionados se o sistema pode ser encarado como um espelho. E por fim precisam estimar a quantidade mínima de chapas necessárias para a formação do espelho.

Posteriormente, os estudantes recebem um esclarecimento físico sobre o fenômeno estudado. A saber, quando a luz incide sobre uma placa, esquema da esquerda da figura 5, parte da luz é refletida e outra parte é transmitida. A estrutura da direita da mesma figura mostra a incidência, reflexão e transmissão em duas placas. Nota-se que a luminosidade transmitida pela primeira placa é a incidência da segunda e, portanto, parte dessa energia será transmitida para o meio e outra será refletida, essa refletividade da segunda placa atingirá a primeira placa e novamente parte será transmitida e outra parte refletida. Logo, é natural concluir que a primeira placa sempre refletirá uma quantidade de luz maior que as placas inferiores, porque cada lâmina inferior refletirá uma porção de luz que será transmitida ao início.

A parcela de energia luminosa que é transmitida pela placa superior é chamada de irradiância ascendente; essa grandeza depende do produto da fração de energia luminosa que atingiu a placa inferior pela refletividade da placa. A irradiância descendente representa a energia luminosa que atinge a placa inferior, e está relacionada com a transmissividade que ocorre na placa superior e a irradiância emitida pela inferior. Isto é, a transmissividade da primeira placa somada ao produto da irradiância ascendente e a refletividade da lâmina superficial.



Figura 10: Refletividade de uma pilha de placa paralelas. Resultado que se aproxima de um espelho.

O aparato experimental mostrado na figura 11, foi desenvolvido para medir a variação de brilho com a adição de transparências. Para a coleta de dados utilizou-se o luxímetro do aplicativo Physics Toolbox instalado no aparelho *smartphone*.



Figura 11: Aparato experimental utilizado para medir a variação de brilho no conjunto de lâminas.

Atividade 3.2: Brilho em Meios Porosos

O estímulo causador da elaboração dessa prática é a variação de brilho da areia seca para a areia molhada. Quer dizer, a areia úmida é mais escura que a seca. Os aspectos pertinentes para a discussão são o tamanho da partícula (visto na prática cacos de vidro) e a homogeneização do índice de refração do meio circundante.

Motivação: Por que existe uma diferença de cor entre a areia seca e a areia molhada?

Objetivos da atividade:

- Variações de brilho quando mudamos de meio óptico.

O professor deve estimular a classe a prever as possíveis alterações no brilho das pilhas de lâminas transparentes quando mergulhadas na água e na glicerina. Mergulhadas as placas, um debate deve ser levantado para explorar o efeito presenciado e se estava de acordo com as previsões realizadas.

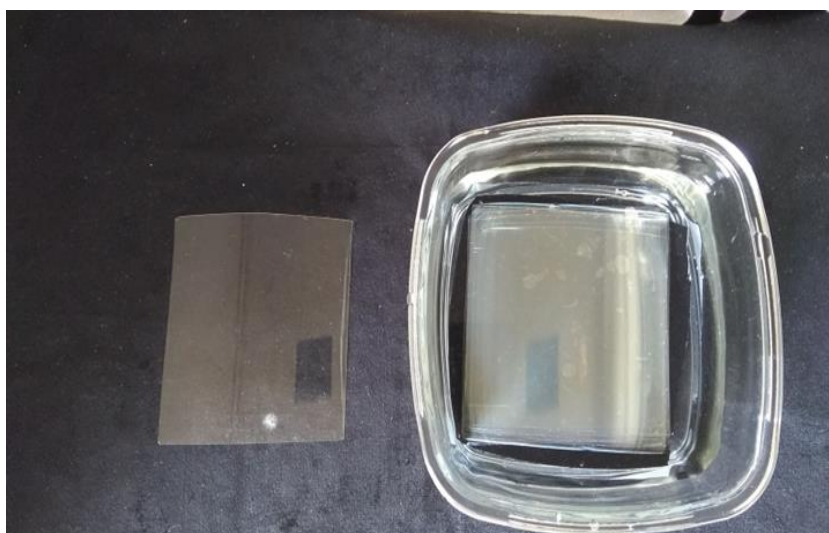


Figura 12: Lâminas mergulhadas em água.

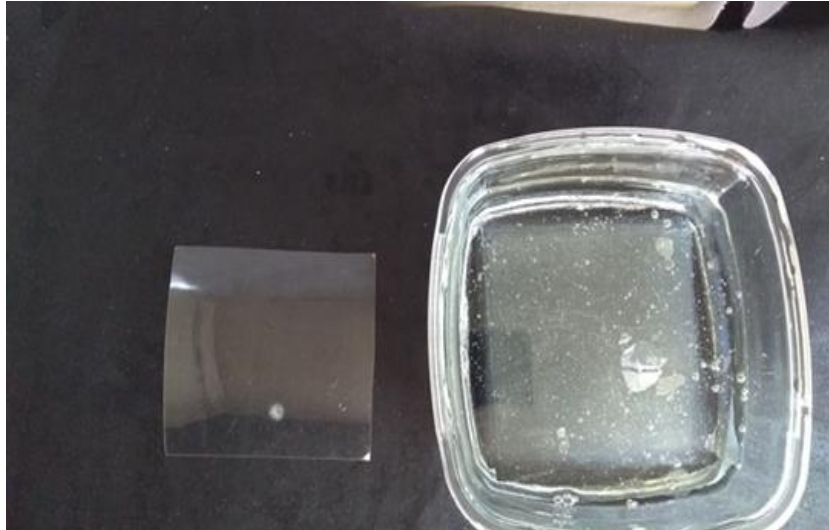


Figura 13: Lâminas mergulhadas em glicerina.

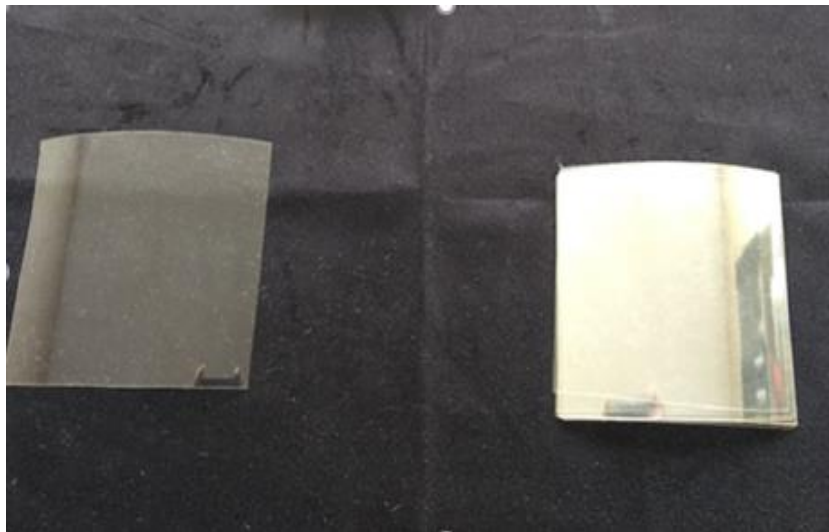


Figura 14: Lâminas no ar.

De acordo com os registros acima, é nítida a diferença de brilho nas três imagens. A causa dessa distinção é explicada pela disparidade entre os índices de refração das placas e do ambiente envolvente. Quanto mais próximos os índices de refração dos materiais envolvidos, menor a refletividade, pois ocorre uma homogeneização das propriedades óticas do meio, e os fótons não distinguem um material do outro, como mostrado na figura 13. O índice de

refração dos grãos de areia têm valor mais próximos ao índice de refração da água do que o ar e, conseqüentemente, o espalhamento é menor e por isso menos luz chega ao nosso olho.

Apêndice B

Manual dos Experimentos



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Manual dos Experimentos

Taísa de Oliveira Vieira

&

Felipe Arruda de Araújo Pinheiro e Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Taísa de Oliveira Vieira, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

Aparato Experimental da Atividade 1



Figura 1: Aparato experimental utilizado para a verificação da Lei de Lambert-Beer.

Materiais utilizados:

- ✓ Caixote de MDF.
- ✓ Um recipiente cilíndrico de 4,5 L.
- ✓ Duas borrachas idênticas e com espessura maior que de um *smartphone*.
- ✓ Um *smartphone* com o aplicativo Phisycs Toolbox.
- ✓ Uma lanterna, usamos a lanterna do celular.
- ✓ Tinta preta ou branca (figura 3)
- ✓ Água
- ✓ Um medidor de 240 mL e outro de 120 mL.
- ✓ Papel crepom preto.

Montagem: Cole com cola instantânea as duas borrachas na base do recipiente como na figura 2. Leve esse recipiente para o interior do caixote como na figura

1 e posicione de tal modo que o celular inferior, que está com o luxímetro capite a luz da lanterna enviada pelo celular superior (na base superior do caixote existe um orifício para encaixar a lanterna voltada para o interior do sistema). Posicionados de maneira que o luxímetro capite o máximo da intensidade luminosa proveniente da lanterna, realizam-se marcações dos celulares e das borrachas. Esse passo é necessário, pois queremos garantir que cada grupo tenha aproximadamente as mesmas condições iniciais. Por fim, envolvemos a caixa com o papel crepom preto.

Observações:

- Para esse recipiente, 1 cm de altura corresponde aproximadamente a 120 mL. Essa conta deve ser feita em casos de recipiente diferentes.
- Utilizamos a tinta preta (figura 3) porque permite ter um controle sobre a gota e ela é um corante que se desfaz mais facilmente na água.
- Manter a luz ambiente e de qualquer outra fonte luminosa apagados durante a coleta de dados.



Figura 2: posição das borrachas.



Figura 3: Tintas utilizadas.

Aparato Experimental da Atividade 2

Atividade 2.1: Espalhamento de luz por cacos de Vidro

Materiais utilizados:

- ✓ Vidro colorido.
- ✓ Martelo.
- ✓ Um pedaço de pano.

Atividade 2.2: Processos de extinção da Luz

Materiais utilizados:

- ✓ Um retroprojektor.
- ✓ Dois recipientes idênticos. Por exemplo duas placas de Petri.
- ✓ Tintas preta e branca (figura 3).
- ✓ Água.
- ✓ Uma seringa de 20 mL.
- ✓ Papel crepom preto.

Montagem: envolver o retroprojektor com o papel crepom de modo que os alunos não vejam o professor manipulando a prática.

Aparato Experimental da Atividade 3

Atividade 3.1: Lâminas Transparentes

Materiais Utilizados:

- ✓ Lâminas transparentes.
- ✓ Uma caixa preta.
- ✓ Um *smartphone* com o aplicativo Phisycs Toolbox.

Montagem conforme figura 4.



Figura 4: medidor da intensidade luminosa de placas transparentes.

Atividade 3.2: Brilho em meios porosos

Materiais Utilizados:

- ✓ Lâminas transparentes.
- ✓ Um recipiente transparente.
- ✓ Água e glicerina.

Apêndice C

Roteiros das Atividades



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Roteiros das Atividades

Taísa de Oliveira Vieira

&

Felipe Arruda de Araújo Pinheiro e Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Taísa de Oliveira Vieira, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2020

Escola: _____ Professor: _____

Alunos _____ do _____ grupo:

Turma: _____ Disciplina: _____

Tema: Uma Abordagem Didática Sobre Propagação de Luz em Meios Complexos e Desordenados em Situações Cotidianas

Atividade 1: Explorando a Lei de Lambert-Beer

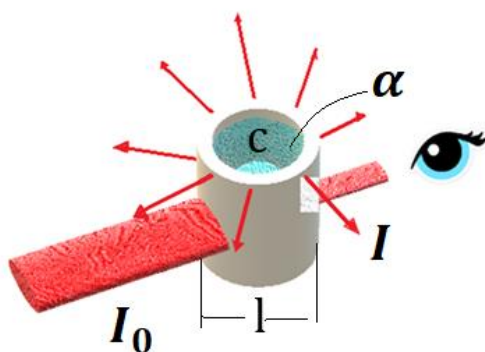
Introdução

Lei de Lambert

A intensidade da luz emitida decresce exponencialmente à medida que a profundidade do meio óptico aumenta.

Lei de Beer

A intensidade de um feixe de luz monocromático decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta no meio óptico.



Lei de Berr-Lambert:

$$I = I_0 e^{-\alpha(l \text{ ou } c)}$$

onde I é a intensidade luminosa incidente, I_0 intensidade luminosa emergente, α o coeficiente de extinção do meio óptico, l o comprimento do meio óptico e C a concentração do meio óptico.

Prática Experimental:

A prática consiste em medir a intensidade da luz quando aumentamos a concentração de tinta preta na água e quando aumentamos a profundidade dessa mistura.



Aparato experimental

- ✓ Recipiente cilíndrico de 4,5 L;
- ✓ Um caixote de MDF coberto com crepom preto;
- ✓ Celular de cima: fonte de luz através da lanterna.
- ✓ Celular de baixo, medidor da intensidade luminosa a partir do aplicativo Physics Toolbox;

Preencha a tabela 1 com as medidas experimentais:

Luz de fundo:

Tabela 1

Comprimento (cm)	Intensidade luminosa (lx)	Concentração (mL)	Intensidade luminosa (lx)

Gráfico 1: Iluminância x Concentração

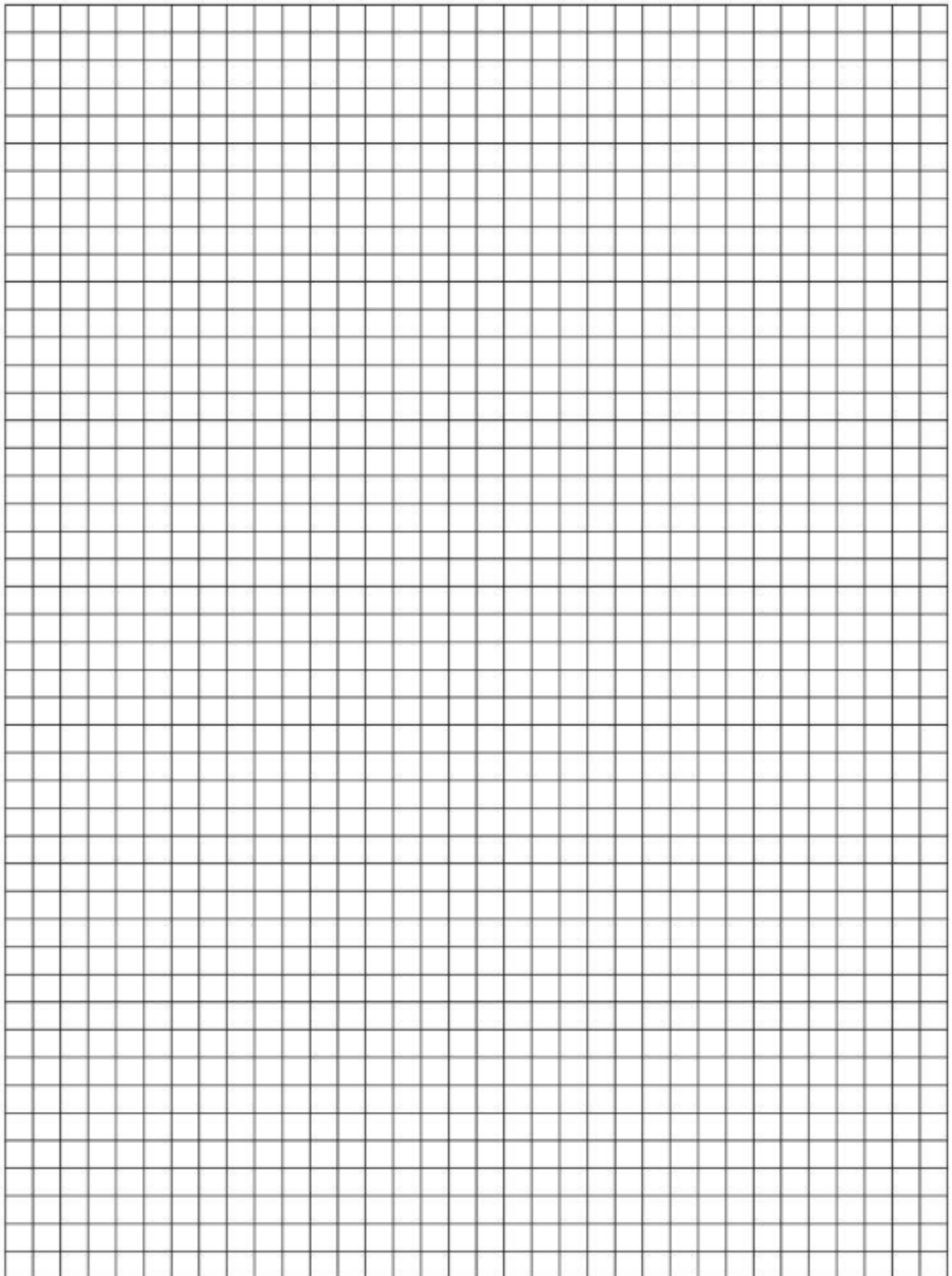
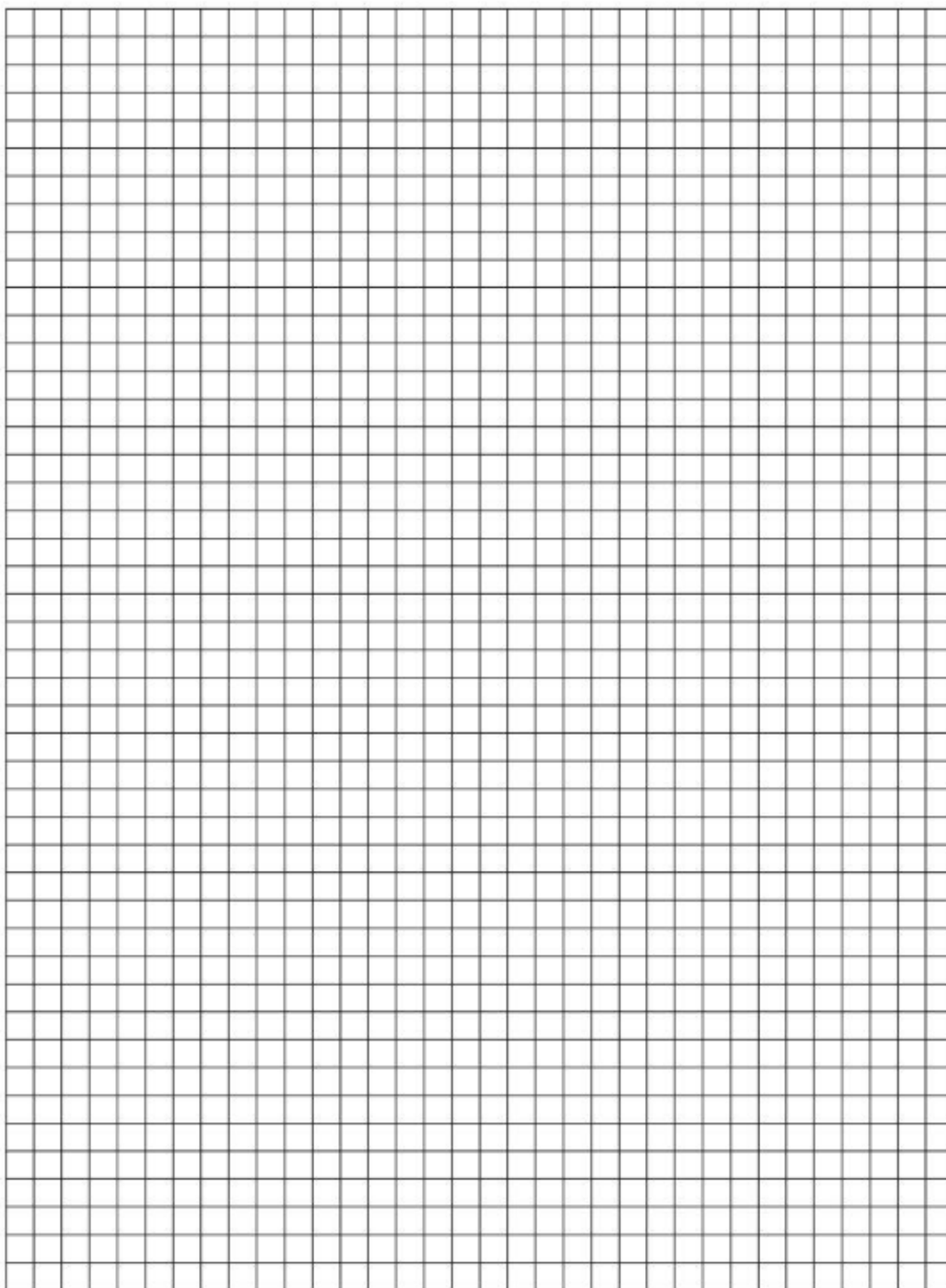


Gráfico 2: Iluminância x Comprimento



Discussão

1. Por que para alguns metros de profundidade no mar a intensidade da luz é baixa? Justifique sua resposta. A imagem abaixo ilustra a situação.



Como podemos ver a quantidade de luz é muito menor no fundo do mar do que na superfície.

2. Cite outros exemplos que encontramos na natureza que podem ser justificados pela Lei de Lambert-Beer.

3. Discuta sobre os dados experimentais encontrados e a previsão teórica.

Escola: _____ Professor: _____

Alunos _____ do _____ grupo:

Turma: _____ Disciplina: _____

Atividade 2: Espalhamento Múltiplo da Luz

Motivação 1: Por que a nuvem tem coloração branca?

Motivação 2: Como podemos explicar o fato que em um dia chuvoso a nuvem apresenta cor cinza para quem olha de baixo pra cima e para uma pessoa sobrevoando a mesma nuvem a cor é branca?

Atividade 2.1

Um pedaço de vidro colorido será triturado pelo professor na presença dos alunos.

Perguntas prévias:

3. O que você acha que irá acontecer com o pedaço de vidro no fim do processo? Por quê?

4. Faça uma previsão para a cor do vidro quando bem triturado. Dê uma explicação para essa especulação.

Perguntas pós observação:

4. Descreva o que ocorreu com a cor do vidro no fim da atividade. Está de acordo com a previsão do grupo?

5. Discuta com seus colegas e apresente uma resposta para o fenômeno da mudança de cor do vidro.

6. Existe alguma relação com o tamanho da partícula? Por quê?

Consolidando o Aprendizado

6. De acordo com a imagem o floco de neve pode ser considerado um material transparente?



7. Acima temos a imagem de um boneco de neve. De acordo com a imagem ele pode ser considerado um material transparente? Explique.

8. Aponte uma diferença nas imagens do floco de neve e do boneco de neve para que sejam materiais opticamente diferentes.

9. Explique como os raios de luz se comportam diante de um material transparente.

10. O açúcar representa outro exemplo do dia a dia onde observa-se o fenômeno do espalhamento múltiplo da luz. Cite outros exemplos do cotidiano em que se aplica esse fenômeno.



Atividade 2.2

Perguntas prévias:

1. Existe diferença de brilho na primeira imagem projetada?

2. Identifique as imagens que representam o recipiente com tinta branca e o com tinta preta. Explique.



Aparato experimental

3. Existe diferença de brilho na última projeção? É possível distinguir quais são os mecanismos que produzem a escuridão em cada uma das figuras? Explique.

Pergunta pós observação:

Após a revelação da cor de cada recipiente, discuta se sua previsão está de acordo com a realidade. Apresente uma explicação para o fenômeno apresentado.

Escola: _____ Professor: _____

Alunos _____ do _____ grupo:

Turma: _____ Disciplina: _____

Atividade 3: Efeitos Ópticos

Motivação: Por que a areia seca apresenta uma coloração diferente da areia molhada? Cite outros exemplos cotidianos que apresentam o mesmo efeito.

Atividade 3.1

Perguntas prévias:

1. É possível fazer observações de objetos através da lâmina transparente apresentada pelo professor? Por quê?

2. Faça uma previsão do que irá acontecer à medida que o número de lâminas transparentes aumentar. Considerando aspectos como transparência, opacidade, brilho e ausência de brilho.

Perguntas pós observação:

1. Descreva o que ocorreu com o conjunto de lâminas transparentes no final do processo, está de acordo com a previsão do grupo?

2. Discuta com seus colegas e apresente uma resposta para o fenômeno observado.

3. Estime a quantidade mínima de lâminas que torna o efeito observado possível.

Atividade 3.2

Perguntas prévias:

Faça uma previsão do que irá acontecer com o conjunto de lâminas transparentes quando forem mergulhadas em água e em glicerina. Justifique.

Pergunta pós observação:

Discuta se sua previsão está de acordo com o que foi observado. Apresente uma explicação para o fenômeno apresentado. Associe com alguns exemplos cotidianos.

Referências Bibliográficas

AFONSO, J.C.; CHAVES, F.A.B. *Uma proposta inovadora de ensino de física experimental no início do Século XX*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 1, p. 1601 (2015).

BOHREN, C.F. *Cloudsin a Glass of Beer: Simple Experiments in Atmospheric Physics*. Dover, 2001.

BOHREN, C.F.; CLOTHIAUX, E.E. *Fundamentals of Atmospheric Radiation*. Wiley, 2006.

BOHREN, C.F.; HUFFMAN, D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley, 1998.

CHAKRABORTI, S. *Verification of the Rayleigh Scattering Cross Section*. American Journal of Physics v. 75, p. 824 (2007).

COX. A.J.; DEWEERD. A.J.; LINDEN, J. *An Experiment to Measure Mie and Rayleigh Total Scattering Cross Sections*. American Journal of Physics v.70, p. 620 (2002).

GASPAR, A. *Atividades experimentais no ensino de física: uma nova visão baseada na teoria de Vigotski*. Editora Livraria da Física, 2014.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. 11. ed. Bookman, 2011.

KRAPAS, S.; SANTOS, P.A.M. *Modelagem do Espalhamento Rayleigh da Luz com Propósitos de Ensino e de Aprendizagem*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física v. 19, n.3, p. 341 (2002).

KUNTZLEMAN, T.S.; JACOBSON, E.C. *Teaching Beer's Law and Absorption Spectrophotometry with a SmartPhone: A Substantially Simplified Protocol*. Journal of Chemical Educacion v. 93, n. 7, p. 1249-1252 (2016).

LYKOS, P. *The Beer-Lambert Law Revisited. A Development without Calculus.* Journal of Chemical Education v. 69, n. 9, p. 730 (1992).

ROBERT, W.R.; MAURI, A.D.; LISA, P.N. *Discovering the Beer-Lambert Law.* Journal of Chemical Education v. 71, n. 11, p. 983 (1994).

VIEIRA, L. P. *Experimentos de Física com Tablets e Smartphones.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.