



SAIU NO ANO PASSADO!

TRANSMISSÃO DE LUZ EM PLACAS TRANSPARENTES

MANUELA RAMOS SILVA^a E PEDRO PEREIRA DA SILVA^b

CFisUC, DEPARTAMENTO DE FÍSICA, UNIVERSIDADE DE COIMBRA^{a,b}

manuela@uc.pt^a e psidonio@uc.pt^b

Saber as respostas às perguntas do exame do ano passado é um dos principais interesses dos alunos, quer no ensino secundário, quer no ensino universitário, especialmente se se aproxima o dia do exame do corrente ano. É um tópico atraente que não precisa de estratégia pois são normalmente os alunos que se dirigem aos professores, interessados em entender as perguntas e saber as respostas. Aproveitando esse interesse natural e baseados na pergunta 4 do caderno 1 do exame de Matemática do ano letivo de 2017/2018, apresentamos uma atividade de fácil execução para a aula de Física-Matemática [1]. A pergunta em causa apresentava a fórmula

$$I = I_0(1 - R)^{2k}e^{-\lambda kd} \quad (1)$$

que corresponde à intensidade da luz transmitida (potência por unidade de área) através de uma pilha de k placas, com coeficiente de reflexão R , coeficiente de absorção λ , e espessura d . I_0 é a intensidade original da luz que incide perpendicularmente na placa.

A TEORIA

Quando raios luminosos atravessam uma placa transparente, como uma lâmina de vidro ou uma folha de acetato, sofrem dois efeitos principais que lhes modificam a intensidade: atenuação da intensidade da luz por absorção e reflexão da luz pelas interfaces vidro-ar ou ar-vidro.

Ao atingirem uma superfície de separação de dois meios com índices de refração diferentes, dá-se o fenómeno

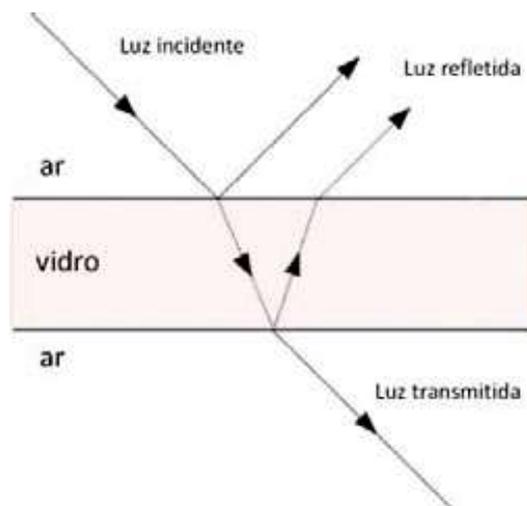


Figura 1. Diagrama de raios luminosos que atravessam superfícies de separação entre meios de diferente índice de refração.

de reflexão e da refração: uma pequena parte do feixe é refletido (cerca de 4% para o par vidro-ar, numa incidência perpendicular) e a maior parte é refratada, ou seja, muda de direção de propagação ao entrar no segundo meio. Enquanto estiver dentro do vidro, propaga-se em linha reta, mas a sua intensidade sofre atenuação de acordo com a expressão matemática

$$I = I_0e^{-\lambda d}, \quad (2)$$

onde I_0 é a intensidade de entrada, λ o coeficiente de absorção e d a distância percorrida dentro do vidro, ou seja, a espessura da placa para uma incidência perpendicular. Ao atingir nova superfície de separação entre meios, a luz sofre novamente reflexão e assim sucessivamente pelas k placas de vidro. Cada lâmina que se acrescenta ao caminho da luz traz duas novas superfícies de separação, e, em cada uma, a intensidade R é refletida, 4%, e $T = (1R)$, 96%, é transmitida, fazendo diminuir a intensidade de $(1R) \times (1R)$, pelo que k placas fazem diminuir a luz de

$$I = I_0((1 - R)^2)^k. \quad (3)$$

Combinando os dois efeitos, chegamos à fórmula do problema, que nos diz como varia a intensidade da luz que incide perpendicularmente num conjunto de k placas transparentes, empilhadas umas sobre as outras.

$$I = I_0(1 - R)^{2k}e^{-\lambda kd} \quad (4)$$

Devem problemas da vida real fazer parte da aula de matemática? Assim prevê o Programa Curricular em vigor e aqui fica uma sugestão de atividade para a aula de Física-Matemática.

Uma demonstração simples destes dois efeitos consiste em segurar uma pilha de lâminas de vidro com a mão e tentar ver um objeto através delas. A observação é fácil se as lâminas estiverem de lado, pois os raios de luz só atravessam duas interfaces, mas difícil se olharmos de topo, pois a luz refletida, nas múltiplas interfaces, transforma a lâmina num espelho.



Figura 2. Fotografia de uma toalha de mesa através de uma pilha de lâminas de vidro. À esquerda, com as lâminas de lado, o padrão é perfeitamente visível. À direita, consegue-se ver a imagem da câmara que tira a fotografia.

A PRÁTICA

Para medir este efeito combinado, é necessário material muito simples e a atividade pode facilmente realizar-se em sala de aula: são necessários um conjunto de *slides* (lâminas) de vidro para microscópio, uma lanterna ou um candeeiro ou um apontador *laser*, e um *smartphone*. Os *smartphones* vêm equipados com um luxímetro, ou seja, um sensor de luz ambiente, mais ou menos sofisticado, e existem muitas *apps* gratuitas que permitem usar este sensor. Esta é uma forma de utilizar o *smartphone* nas aulas de Física



Figura 3. Montagem experimental mostrando o *smartphone* Android onde foi instalada a *app* gratuita Lux Meter.

ou Matemática em vez de o banir da sala de aula [2-4].

No nosso ensaio, e numa sala escurecida, colocámos o sensor de luz por baixo de um candeeiro e fomos empilhando lâminas de vidro entre o sensor e a fonte de luz. Os resultados obtidos, em lux, ou seja em Watt/m^2 , encontram-se no gráfico seguinte depois de normalizados, onde se representam os pares de valores (k, I_{exp}) :

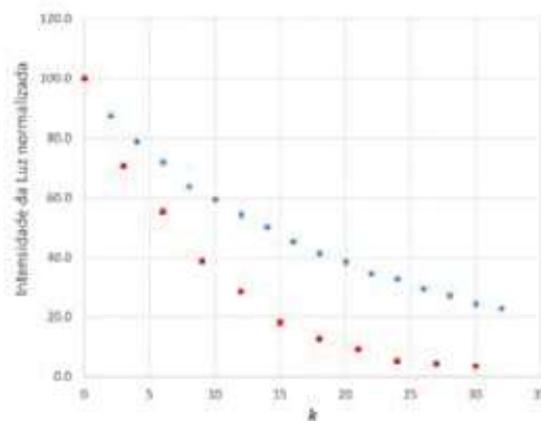


Figura 4. Intensidade da luz transmitida em função do número de placas sobrepostas. Os círculos azuis representam a intensidade da luz medida pelo luxímetro usando um candeeiro como fonte de luz. Os quadrados vermelhos correspondem à intensidade de luz usando um *laser* vermelho como fonte de luz.

Mais interessante é a representação do logaritmo da intensidade normalizada, pois:

$$\begin{aligned}
 I &= I_0(1 - R)^{2k}e^{-\lambda kd} \Rightarrow \ln(I) = \ln(I_0(1 - R)^{2k}e^{-\lambda kd}) \\
 &\Rightarrow \ln(I) = \ln(I_0) + 2k\ln(1 - R) - \lambda kd \\
 &\Rightarrow \ln(I) = \ln(I_0) - (\lambda d - 2\ln(1 - R))k
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Ou seja, espera-se uma dependência linear entre $\ln(I)$ e k , pois quer R quer λ quer d são constantes nesta experiência.

A dependência linear é fácil de confirmar visualmente e é possível um bom ajuste pelo método dos mínimos quadrados, figura 5. No caso de uma fonte de luz coerente, monocromática e direcionada, como o apontador *laser*, a perda de intensidade por reflexão, após k placas, é bastante drástica, sendo menos acentuada no caso da luz do candeeiro, não coerente, policromática e menos direcionada.

Para uma situação real, com uma fonte de luz comum, e com uma pilha de lâminas de vidro imperfeita, intercalada por camadas de ar não uniformes, a transmissão T é

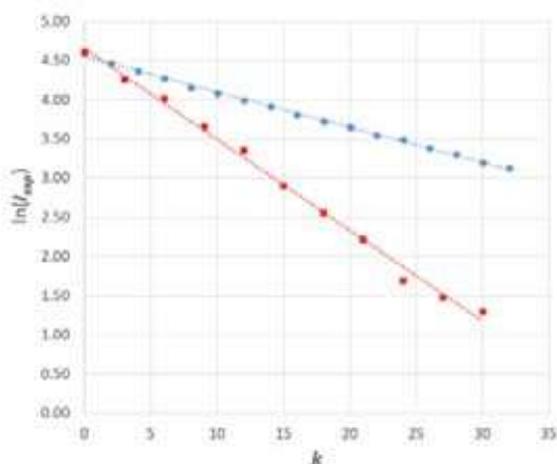


Figura 5. $\ln(I)$ em função do número de camadas usando a fonte de luz *laser*. Os círculos azuis e os quadrados vermelhos correspondem às medidas usando um candeeiro ou um *laser* como fonte de luz. Para a luz branca, um ajuste de mínimos quadrados leva à equação $\ln(I) = -0.045k + 4.552$ com $r^2 = 0.998$ e para a luz *laser*, $\ln(I) = -0.116k + 4.653$ com $r^2 = 0.995$.

diferente de 96% mas mantém-se a forma da equação para a intensidade da luz transmitida através de uma pilha de k placas, ver ref. [5]:

$$I = I_0(T)^{2k} e^{-\lambda kd} \quad (6)$$

Em conclusão, apresentamos neste artigo uma atividade simples de realizar em sala de aula (ou até mesmo sugerida como trabalho para casa) que permite apresentar e discutir os fenómenos físicos por detrás da fórmula (1), onde a perda de intensidade da luz pelas múltiplas reflexões segue a lei de uma progressão geométrica e a da absorção da luz dentro de um meio homogêneo segue a lei de um decaimento exponencial. A partir desta pequena atividade experimental, os alunos são convidados a treinar o uso da função logaritmo e a perceber a sua importância no tratamento e na interpretação dos dados de experiências científicas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Exame Final Nacional de Matemática A, Prova 635, 1.^a Fase, Ensino Secundário, Instituto de Avaliação Educativa, 2018.
- [2] V. Pereira, P. Martín-Ramos, P.P. da Silva, M. Ramos Silva, *Studying 3D Collisions with smartphones*, *Phys. Teach.*, 55 (2017) 312-313.
- [3] J. Imazeki, "Bring-Your-Own-Device: Turning Cell Phones into Forces for Good", *The Journal of Economic Education*, 45 (2014) 240-250.
- [4] P. Martín-Ramos, M. Ramos Silva, P.S. Pereira da Silva, *Smartphones in the Teaching of Physics Laws: Projectile motion | El Teléfono Inteligente en la Enseñanza de las Leyes de la Física: Movimiento de Projectiles*, RIED. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 20 (2017) 213.
- [5] M. V. Berry, S. Klein, *Transparent Mirrors: rays, waves and localization*, *Eur. J. Phys.* 18 (1997) 222-228.

SOBRE OS AUTORES

Manuela Ramos Silva é professora auxiliar com agregação no Departamento de Física da FCTUC. Desenvolve investigação na área da Física da Matéria Condensada, especialmente no campo do Magnetismo Molecular.

Pedro Pereira da Silva tem doutoramento em Física da Matéria Condensada e trabalha como técnico superior na plataforma tecnológica TAIL da FCTUC. A sua atividade de investigação incide especialmente no estudo das Propriedades Óticas dos Materiais.