

---

## ÓTICA GEOMÉTRICA: INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA <sup>1</sup>

---

*J. D. Sandoval*

Laboratório de Luminotecnia – UNT

*J. Salinas de Sandoval*

Instituto de Física – UNT

Tucumán – Argentina

### **Resumo**

*O trabalho, destinado a professores de Física de cursos de nível médio e universitário básico, propõe complementar o tratamento meramente descrito dos fenômenos de reflexão e refração da luz (a que parece se reduzir uma percentagem importante dos textos habituais nas referidas etapas educacionais), mediante uma instrução que, partindo das concepções prévias presentes no aluno, o conduza à problemática da interação da luz com a matéria como modo de procurar encontrar uma resposta aos questionamentos que suscitam tais fenômenos, introduzindo-o no estudo de um modelo básico que lhe será útil também para compreender os fenômenos da ótica física.*

### **I. Introdução**

É incontestável que o acelerado ritmo de crescimento dos avanços científicos e tecnológicos suscita a necessidade de uma análise profunda dos objetivos que se persegue no processo ensino-aprendizagem.

Em uma realidade tão rapidamente mutável, que em pouco tempo pode tornar obsoletas conquistas recentes, parece que a instrução deveria oferecer, além da informação, a capacidade de incorporar-se a esta dinâmica de permanente evolução.

---

<sup>1</sup> Traduzido pelo Conselho Editorial do CCEF.

A compreensão de que o conhecimento não é um estado, mas um processo mediante o qual se aprofundam e ampliam permanentemente nossos esquemas conceituais, deveria estar presente no planejamento, no desenvolvimento e no controle dos ganhos do processo de instrução.

O problema docente parece complicar-se. Com efeito, acreditamos que seja assim. É mais simples desenvolver uma aula, por maior complexidade matemática ou conceitual que apresente o tratamento, do que conseguir organizar uma unidade de modo a incentivar no aluno aquelas condutas de nível elevado (tais como análise, síntese, avaliação), que necessitará para poder integrar-se de forma ativa e criadora nas transformações que o rodeiam.

A instrução deve pretender que o aluno aprenda a pensar e a atuar reflexivamente sobre a realidade. Longe de apresentar-lhe um corpo de conhecimentos “comprovadamente verdadeiros”, que ele deve aceitar e que, nos fatos assim tratados, se transforma em dogma de fé que se aplica acriticamente, a Física deveria aparecer a seus olhos como o que realmente é, isto é, como um conjunto de modelos e teorias que pretendem explicar a realidade com graus variáveis de aproximação.

Caso se apresente uma teoria física sem que apareçam explicitamente as condições em que suas medições estão mais próximas dos resultados experimentais, isto é, se o aluno não raciocina sobre os limites de validade do tratamento que está dando ao problema, isto fará com que ele seja incapaz de discernir, em um caso concreto, sobre o modelo que pode ser mais útil.

Caso se apresente uma descrição meramente fenomenológica, acompanhada de relações entre grandezas (“fórmulas”) que aparecem como resultados experimentais sem um tratamento teórico capaz de deduzi-las a partir de um conjunto de hipóteses, ou sem um modelo que evidencie as razões físicas do comportamento observado, a Física aparecerá aos olhos dos estudantes como um grande livro de receitas dentre as quais ele terá que aplicar aquela na qual intervenham os dados que aparecem no problema proposto pelo professor.

Nada pode estar mais distante de uma aprendizagem real da disciplina do que a adoção de qualquer um destes procedimentos.

Este trabalho tentará mostrar a conveniência de introduzir modificações no tratamento que tradicionalmente se dá a alguns conteúdos da Física. Ainda que os comentários se refiram a temas concretos como são a reflexão e a refração da luz, pretendemos que eles se estendam a outros de características similares.

## II. Os modelos físicos e a aprendizagem “em espiral”

Para poder integrar uma organização conceitual operativa, é necessário que a nova informação que se recebe seja capaz de vincular-se significativamente à estrutura mental pré-existente (Moreira). No caso dos fenômenos de reflexão e refração da luz, o vínculo entre o conteúdo da instrução e o que o aluno já sabe pode ser dado pelas experiências da vida diária que fornecem inúmeros exemplos de tais fenômenos.

Porém, o tratamento fenomenológico e descritivo deles não pode conduzir a uma teoria geral que os contenha como casos particulares, pois se reduz a estabelecer relações entre grandezas observadas sem a proposta de um modelo que dê sentido físico a estas relações. Com efeito, as leis da reflexão e da refração luminosa não são suficientes para explicar algumas situações nas quais intervêm estes fenômenos como, por exemplo, a alta opacidade dos metais, o elevado poder refletivo das superfícies condutoras polidas (comportamentos que se aceitam como óbvios e naturais), assim como tampouco podem explicar a dependência do índice de refração com a cor da luz que atravessa o meio ou com as densidades de fluxo incidente refletido e transmitido. Assim como estes, existem inúmeros exemplos de fatos cotidianos nos quais a luz se reflete e se refrata, os quais as leis de reflexão e refração não parecem explicar, razão pela qual é conveniente que os estudantes reflitam para que se conscientizem da magnitude do problema que estão enfrentando.

Ao se estabelecerem as leis que estamos tratando usando raciocínios mais ou menos geométricos, baseados nos princípios de Huygens e Fermat e no teorema de Malus, praticamente não se apresentam dificuldades matemáticas importantes. Menos ainda se as apresentamos como resultados experimentais. Porém, o excesso na simplicidade de cálculo traz, como contrapartida, a perda da compreensão do mecanismo físico responsável pelo fenômeno, sem que esta consequência seja, na realidade, inevitável.

Propomos, então, organizar a instrução partindo dos fenômenos conhecidos pelos estudantes nos quais intervêm a reflexão e a refração da luz, conduzindo-os a refletirem sobre a interação entre a luz e a matéria, em um processo permanente de análise dos modelos mais adequados e de controle de suas predições relacionadas com os temas em estudo.

A introdução ao estudo da ação da onda luminosa sobre as partículas que constituem a matéria pode servir no duplo sentido de fornecer um modelo com o qual se chega a explicar o observado, assim como de proporcionar uma fundamentação intuitiva dos resultados mais rigorosos da Mecânica Quântica, apropriados para descrever o comportamento de átomos e moléculas e sua interação com a luz.

Pode-se argumentar que a problemática da interação da luz com a matéria é de uma complexidade tal que seu tratamento é impossível no nível de um curso

secundário ou universitário básico. Mas a isto se pode responder com o modelo de aprendizagem em espiral.

Na realidade, compartilhamos a opinião de que “qualquer idéia, problema ou conjunto de conhecimentos pode ser suficientemente simplificado para ser entendido por qualquer estudante” (BRUNER), sem que esta simplificação signifique um resumo ou particularização que descaracterize tal conhecimento.

Propomos discutir com o estudante um modelo que explique os fatos básicos da interação da luz com a matéria que são relevantes nos fenômenos de reflexão e refração. Sem necessidade de complicadas ferramentas matemáticas, pode-se introduzir considerações elementares capazes de conduzir, nesta etapa, a análises qualitativas para explicar comportamentos observados e que poderão ser retomadas outras vezes quando de aproximações mais e mais rigorosas. O mesmo modelo básico mostrar-se-á assim adequado para orientar o estudante na compreensão dos fenômenos das chamadas óticas geométrica e física.

A seguir, desenvolvemos o que consideramos ser uma possível apresentação da ótica geométrica incluindo uma primeira aproximação ao tema da interação da luz com a matéria.

### **III. A ótica geométrica e o modelo das ondas secundárias**

De acordo com as considerações feitas o docente deveria começar perguntando aos estudantes sobre o que eles acreditam que ocorre em algumas situações selecionadas da vida cotidiana nas quais intervêm os fenômenos de reflexão e de refração da luz, cuidando que entre os casos apresentados existam alguns que apareçam como uma verificação direta das leis da ótica geométrica e outros que mostrem as limitações destas leis para descrever ou explicar o que ocorre.

Desta forma pretende-se que a instrução apareça como um conjunto de problemas que desafia a capacidade de docentes e alunos para enfrentar seu tratamento.

A lista de exemplos é, naturalmente, muito extensa. Daremos apenas alguns, para termos situações concretas às quais possamos nos referir no decorrer do texto:

- Por que parece quebrada uma colher submersa em um recipiente com água?
- Por que os metais são brilhantes?
- Por que aparecem cores nos pêlos de uma aranha ou nas bordas de um espelho chanfrado?
- Por que existem materiais transparentes enquanto outros são opacos?
- No que diferem a reflexão em um espelho e a reflexão em uma parede?
- É suficiente polir muito uma superfície qualquer para que esta atue como espelho?
- O que é um espelho?

A partir das respostas dadas pelos estudantes, o docente pode informar (em cursos de nível médio) ou relembrar (em cursos universitários básicos) que, quando iniciaram as pesquisas em ótica foram estabelecidas de forma experimental as três leis fundamentais da chamada ótica geométrica: a lei da propagação retilínea, a lei da reflexão e a lei da refração, as quais serão formuladas e explicadas.

Ao analisar com os estudantes os exemplos introdutórios selecionados, o docente procurará encaminhar a discussão no sentido de evidenciar o fato de que tais leis podem tornar compreensíveis somente alguns dos comportamentos observados, enquanto que mostram sérias limitações para descrever ou explicar outros casos nos quais estão inseridos os mesmos fenômenos de reflexão e refração.

Como corolário desta discussão, o docente reforçará o fato de que, nos fenômenos mencionados, intervêm sempre a luz e um meio material e que, portanto, na interação entre eles poder-se-ia buscar as razões dos comportamentos observados.

Para procurar compreender tal interação, devemos dispor de modelos da luz e da matéria.

Que modelo suporemos para a luz? Nós a consideraremos um feixe de corpúsculos energéticos ou uma perturbação ondulatória contínua?

Na análise das características dos fenômenos que pretendemos explicar, é natural supor que o modelo corpuscular será particularmente útil para o estudo de fenômenos descontínuos discretos, como são, por exemplo, os de emissão e absorção da luz, enquanto que o modelo ondulatório mostrar-se-á adequado em situações como a reflexão e a refração, nas quais parece haver uma propagação contínua de energia.

Quanto ao modelo da matéria, a observação e a experiência nos indicam que podemos diferenciar comportamentos distintos quando o meio é bom ou mau condutor de eletricidade. A partir deste fato, podemos suspeitar da conveniência de efetuar um tratamento diferenciado do problema em ambos os casos (Rossi).

### **III.1 A luz e os meios dielétricos**

No caso das substâncias não condutoras, substituiremos em nosso modelo as moléculas reais que constituem a matéria por um conjunto de dipolos elétricos oscilantes nos quais consideraremos somente o movimento da partícula mais leve, reservando para a mais pesada o papel de centro fixo de atração.

Quando uma onda luminosa chega à região do espaço ocupada pelo dipolo: sobre a partícula móvel carregada estará atuando uma força elétrica restauradora, uma força de atrito e uma força harmônica externa.

Pode-se analisar com os alunos as características qualitativas do movimento da partícula oscilante: uma vez alcançado o regime estacionário, a frequência da

oscilação forçada coincide com a da onda incidente, e a amplitude das oscilações, que depende da diferença entre a frequência natural de oscilação livre e a frequência da oscilação forçada, torna-se máxima quando ambas as frequências se igualam (ressonância). O amortecimento limita a amplitude da oscilação na ressonância.

Os diferentes fenômenos que são observados quando a luz interage com um material dielétrico podem adquirir razão física se levamos em conta o papel que em tal interação têm as ONDAS SECUNDÁRIAS originadas nas oscilações dos dipolos microscópicos forçados a vibrar pelo campo elétrico da onda luminosa.

A energia será reirradiada por estes osciladores forçados mediante tais ondas, as quais interferirão entre si e com a onda incidente, reforçando-se ou reduzindo-se, sendo tanto maior a interferência quanto maior for o grau de regularidade da estrutura do meio, dando como resultado as ondas refletida e refratada.

O cálculo direto das grandezas de interesse (por exemplo, as energias, as direções de propagação, etc.), em tal situação, complica-se enormemente já que é o campo elétrico total interno do material aquele que determina as características das oscilações dos dipolos, e estas oscilações afetam, por sua vez, o campo total.

Para os fins a que nos propomos esta dificuldade não constitui um impedimento, já que a aproximação utilizada pelo docente para explicar o fenômeno, nesta etapa, é de ordem basicamente qualitativa, no entendimento de que o mesmo modelo, que logo pode ser elaborado em níveis crescentes de complexidade e precisão, é muito útil para dar ao estudante uma compreensão física do que está ocorrendo.

Na análise do movimento oscilatório pode-se notar que um oscilador forçado não está sempre em fase com a perturbação externa. As ondas secundárias que se superpõem à onda incidente para dar a onda refratada resultante manterão com ela uma diferença de fase que depende da frequência impulsiva. O modelo clássico prediz que a oscilação forçada estará em fase com a excitação harmônica somente a frequências relativamente baixas. As ondas secundárias começam a atrasar-se à medida que aumenta a frequência do campo eletromagnético incidente, chegando o atraso a  $90^\circ$  na ressonância e aumentando depois até quase  $180^\circ$  para frequências impulsivas muitas vezes maiores do que a frequência natural de oscilação da carga. Desta forma, a onda refratada pode estar adiantada ou atrasada com relação à onda incidente; o processo é acumulativo e, à medida que a luz atravessa o material, a fase está continuamente avançando ou atrasando.

Este mesmo modelo de comportamento dos dielétricos a nível atômico pode ser empregado para deduzir facilmente uma expressão que dê a dependência entre o índice de refração da substância e a frequência da luz incidente (ver, por exemplo, Hecht-Zajac, p. 42), chegando-se, mediante considerações clássicas, à equação de dispersão, um resultado essencialmente igual ao que se deduz no tratamento quântico.

### III.2 A luz e os meios condutores

No caso das substâncias condutoras, suas propriedades óticas características (opacidade e elevada reflexibilidade) podem ser explicadas por sua alta condutividade elétrica, que se deve à presença dos elétrons livres de condução, isto é, de cargas elétricas não ligadas de forma permanente a átomos determinados, mas sim que podem se deslocar de um átomo para outro (Alonso-Finn). Nosso modelo, neste caso, considerará os elétrons de condução como partículas materiais carregadas submersas em um meio viscoso. Estamos representando o metal como um meio contínuo, aproximação que é razoável para baixas frequências (grandes comprimentos de onda), como por exemplo, as correspondentes ao infravermelho, já que, neste caso, o fato da matéria realmente não ser contínua não é importante. Mas, à medida que a frequência aumenta, este modelo começa a mostrar discrepâncias mais e mais importantes com os resultados experimentais. No limite desta aproximação, cujas limitações o docente deve ressaltar frente aos estudantes, quando chega uma onda luminosa à região do espaço ocupada pela partícula, sobre ela estarão atuando uma força de atrito e uma força harmônica externa.

Nestas condições, a partícula carregada, após superar o período transitório, descreverá um movimento oscilatório linear, com a frequência da onda incidente. Mas, ao contrário do que ocorria com os dielétricos, o deslocamento de um elétron livre oscilante apresenta uma diferença de fase de  $180^\circ$  com a força impulsiva e, desta forma, ondas secundárias serão irradiadas, as quais tenderão a se anular com a perturbação incidente, resultando uma onda refratada que decai rapidamente (Hecht-Zajac).

Como a condutividade do condutor perfeito é infinita, os elétrons forçados a oscilar nestas condições por um campo externo se limitariam a seguir as variações do campo e haveria somente um fenômeno puro de reemissão de energia; assim, a superfície do condutor perfeito atuaria como refletor perfeito. Falando em geral, quanto maior é o coeficiente de condutividade, maior é a capacidade refletora do metal.

Porém, nos metais reais, os elétrons se chocam constantemente com os íons agitados termicamente, assim como com as imperfeições da rede, perdendo energia eletromagnética na forma de calor e a onda refratada se amortece rapidamente dentro do metal. É, portanto, evidente que a absorção de energia da onda incidente varia inversamente com a condutividade do condutor.

Um condutor muito bom como, por exemplo, o sódio apresenta uma absorção insignificante e uma reflexão de até 99,8% da intensidade incidente, enquanto um condutor não tão bom como, por exemplo, o ferro apresenta reflexões de 30 a 40% e absorções próximas a 60% em películas muito delgadas (partes de micron) (Landsberg).

Como a densidade de elétrons livres é muito elevada em bons condutores (aproximadamente  $10^{22}$  em cada  $\text{cm}^3$ ), as ondas secundárias são capazes de anular a perturbação refratada em camadas muito finas do metal, as quais refletem a maior parte da luz incidente e são, geralmente, praticamente opacas. Na realidade, nos materiais transparentes, a profundidade de penetração (distância na qual a densidade de fluxo luminoso decai a aproximadamente  $1/3$  do seu valor) é grande em comparação com sua espessura, enquanto que um bom condutor como o cobre tem profundidades de penetração que variam entre 0,6 mm e 6 mm para freqüências da luz variando entre o ultravioleta e o infravermelho, respectivamente.

Os condutores não oxidados apresentam o brilho metálico característico devido a uma alta refletância, originada por sua vez pelo fato de que a onda incidente não é capaz de penetrar efetivamente no material.

Na realidade, um condutor tem osciladores forçados amortecidos não ligados (sem forças restauradoras) e ligados (similares aos dos dielétricos). A freqüências baixas (infravermelho) são os elétrons livres que determinam basicamente as propriedades óticas do condutor. Porém, quando se avança até as regiões do espectro visível e ultravioleta, começam a se tornar importantes as contribuições dos elétrons ligados, cuja participação no fenômeno dá lugar às chamadas propriedades óticas não metálicas. Desta maneira, um bom condutor como a prata, que na zona visível apresenta características óticas próprias de um metal (notória absorção e elevada reflexão), na zona ultravioleta apresenta má reflexão e grande transparência. Certamente terá impacto sobre os alunos o inteirar-se de que, quando se ilumina um pedaço de prata com luz ultravioleta de 316 nm de comprimento da onda, a capacidade refletora que ela apresenta é de aproximadamente 4%, vale dizer, um comportamento similar ao que tem o vidro na zona do visível.

#### **IV. Os passos da espiral da aprendizagem**

Até este momento, os alunos incorporaram à descrição fenomenológica dos fenômenos de reflexão e refração da luz um tratamento que lhes tem dado compreensão física dos mesmos e que, se não lhes tem permitido deduzir teoricamente as leis conhecidas, lhes tem possibilitado contar com um modelo que também lhes será útil para compreender os limites da ótica geométrica e os princípios gerais da ótica física.

Ao continuar a instrução, envolvendo-se os estudantes no estudo e discussão do princípio de Huygens e/ou Fermat e/ou do teorema de Malus, aparecerá um tratamento que permitirá deduzir as leis da reflexão e da refração da luz e, ainda que se trate de um desenvolvimento basicamente geométrico, constituirá um avanço relativo à descrição fenomenológica de sua obtenção experimental.

Um novo avanço na espiral da aprendizagem será dado pela teoria eletromagnética da luz, para não mencionar a teoria quântica dos fenômenos luminosos. Mesmo que se considere que existem limitações definitivas de tempo para desenvolver com algum grau de detalhe (e com o grau de complexidade matemática que seja possível) este importante tratamento, pode sem dúvida ser muito útil “apresentar” a teoria aos estudantes, mostrando-lhes seus êxitos e suas limitações, para o caso concreto de análise dos fenômenos de reflexão e refração.

Será útil ressaltar que, na teoria de Maxwell, a matéria é caracterizada por três constantes (condutividade elétrica, permeabilidade magnética e constante dielétrica) e que não se examina a estrutura atômica do meio, a não ser que se queira descrever formalmente a influência da substância sobre o campo eletromagnético (Frish-Timoreva).

A teoria, que acrescenta muito à compreensão dos fenômenos de reflexão e refração, não só é capaz de deduzir as leis da ótica geométrica, mas, além disso, fornece informação sobre as amplitudes e fases das ondas refletida e refratada.

Ficaria então a cargo do docente a coordenação geral de uma sessão final de discussão na qual se tentaria estruturar uma síntese dos diferentes graus de complexidade e de capacidade de explicação dos diversos tratamentos com que se tem encarado o problema.

Desta maneira, começará a ficar claro para os estudantes que, no desenvolvimento da Física, o crescimento do conhecimento tem dado lugar a tratamentos cada vez mais completos, ainda que também mais complexos, dos mesmos fenômenos, assim como na realidade, o que se tem conseguido no processo de ensino e aprendizagem, no qual têm participado, tem sido nada mais nada menos que se iniciarem no estudo de uma problemática vasta e ainda inexplorada em muitos aspectos.

## V. Conclusões

Apresentamos o resultado de uma tentativa de estruturar a instrução de um tema de ótica desde a perspectiva da aprendizagem em espiral baseada no que o aluno já conhece sobre o tema, com a certeza de que é possível adequar um conteúdo a distintos níveis de tratamento e complexidade sem tirar-lhe rigorismo conceitual, empregando-o, por exemplo, como neste caso, para dar racionalidade física a um comportamento observado.

### **Referências Bibliográficas**

1. ALONSO, M.; FINN, E. **Física**. U.S.A.: Fondo Educativo Interamericano, 1970.
2. BRUNER, J. S. **Uma nova teoria de aprendizagem**. Rio de Janeiro: Bloch, 1969.
3. FRISH, S.; TIMOREVA, A. **Curso de Física geral**. Moscou: Mir, 1973.
4. HECHT, E.; ZAJAC, A. **Optica**. U.S.A.: Fondo Educativo Interamericano, 1977.
5. LANDSBERG, G. S. **Optica**. Moscou: Mir, 1984.
6. MOREIRA, M. A. **Uma abordagem cognitivista ao ensino da Física**. Porto Alegre: Ed. da Universidade, 1983.
7. ROSSI, B. **Fundamentos de óptica**. [s.l.]: Reverté.