

# O TRATADO SOBRE A LUZ DE HUYGENS: IMPLICAÇÕES DIDÁTICAS

## HUYGENS' LIGHT TREATISE: DIDACTIC IMPLICATIONS

Sonia Krapas<sup>1</sup>  
Glória Queiroz<sup>2</sup>, Diego Uzêda<sup>3</sup>, José Paulo Correia<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup>Universidade Federal Fluminense/Departamento de Física/sonia@if.uff.br

<sup>2</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro/Departamento de Física Aplicada e Termodinâmica/ gloria@uerj.br

### Resumo

Huygens é conhecido no ensino introdutório de Física por dar conta da refração segundo um modelo ondulatório. Os livros didáticos lhe rendem homenagem atribuindo seu nome a um princípio, mas em sua obra máxima, *Tratado da luz*, é possível se ver muito mais: sua inventividade na defesa de um modelo ondulatório para a luz numa época em que o modelo corpuscular era um forte concorrente. Neste trabalho tenta-se capturar o raciocínio de Huygens, mostrando que sua obra continua bastante acessível. Explicações com possibilidades de didatizações inovadoras são destacadas. Analisando situações vividas por cientistas antigos, se percebe que a ciência tem se desenvolvido em meio a muitos debates, aos quais se encontram associados processos de construção de modelos, tornando evidente que houve um caminho sinuoso para se chegar ao que está sendo estudado hoje de forma atemporal. A modelagem dos fenômenos ópticos pode propiciar o crescimento intelectual de estudantes e professores.

**Palavras-chave:** Tratado da luz, Huygens, didática

### Abstract

Huygens is known among Physics introductory teaching for his study on refraction through a wavy model. Many didactic books honor him by giving his name to a principle. But in his masterpiece, *Treatise on Light*, it is possible to notice all his inventiveness to defend his wavy model in times when the corpuscular model was very strong among writers. This work tries to capture Huygens thinking in an attempt to show that his work is still accessible. Some explanations, with possible teaching innovations, are pointed out. Taking old scientists' experiences as a starting point, it is noticeable that science has been developed among many debates. Many of them involved the discussion of model construction. Because of that, it is evident that the path to what is studied nowadays was sinuous. The optical phenomena modeling can ignite students and teacher's intellectual growth.

**Keywords:** *Treatise on Light*, Huygens, teaching

### INTRODUÇÃO

A educação científica escolar tem caminhado para a simplicidade exacerbada dos conteúdos abordados em aulas específicas de diferentes disciplinas, atingindo o extremo de isolar até mesmo um conteúdo de outro dentro de uma mesma área. Tal fragmentação não deixa espaço para a complexidade das explicações que objetivam a construção de uma visão de mundo que tenha fundamentos na física, visão que se pretende na educação para a cidadania. A busca da simplicidade, que se opõe à dificuldade do acesso ao conhecimento pelos alunos, não implica necessariamente em um fator fragmentador da realidade a ser compreendida, nem para o professor nem para o aluno. Partindo de situações vividas por cientistas antigos, o ensino pode

trazer a complexidade para o reduto da sala de aula e a perspectiva de que o conhecimento científico tem sido construído em meio a controvérsias e debates, aos quais se encontram associados processos de construção de modelos.

Em trabalho anterior (Queiroz e Krapas, 1992) mostramos o debate entre Descartes e Leibniz em um momento em que desejavam decidir se a verdadeira medida da força era feita pela variação da quantidade de momento ou da *vis viva* (o dobro da energia cinética), questão que permaneceu trinta anos sem uma solução convincente até o momento em que D'Alembert acomodou as duas idéias mostrando que os dois caminhos são válidos, um pela variação da força no espaço e a outra no tempo. Guimarães e Fonte Boa (2001), autores da coleção didática Física para o Ensino médio, ao tomarem conhecimento desse trabalho, nela incorporaram parte de seu conteúdo, transferindo aos alunos a busca de solução para o debate histórico transformado em uma situação experimental hipotética do choque de dois veículos em movimento. Mais recentemente (da Silva e Krapas, no prelo) abordamos a controvérsia histórica da ação à distância versus ação mediada com vistas a abordagens didáticas inovadoras para as interações físicas. Com o mesmo intuito, vamos tratar no presente trabalho de outra controvérsia histórica: modelo corpuscular versus modelo ondulatório para a luz, pondo em relevo a contribuição de Huygens (1629-1695).

Modelos desempenham papel crucial tanto na prática da ciência como em momentos didáticos de ensino-aprendizagem. Muitas vezes, a representação de objetos, idéias ou eventos de interesse científico, que os modelos historicamente reconhecidos traduzem, participou da criação da ciência que se tem hoje e, mesmo assim, tem sido escondida dos alunos, sendo oferecidas a eles, em troca, simples equações para cálculos passíveis de serem avaliados em provas, empobrecendo o ensino e consequentemente a aprendizagem dos alunos. A riqueza que a modelagem qualitativa de fenômenos pode propiciar para o crescimento intelectual de estudantes e professores fica mais evidente quando se percebe que houve um caminho sinuoso para se chegar ao que está sendo estudado. No caso específico da Óptica, seu tratamento geometrizado – que lhe confere a denominação de Óptica Geométrica – é justificado por autores de livros didáticos pelo fato de que os fenômenos dos quais ela trata, e suas aplicações, podem ser analisados sem que seja necessário um conhecimento mais profundo sobre a natureza da luz. Uma análise mais detalhada, como a que será apresentada nesse trabalho, sustenta argumento oposto.

Huygens é conhecido por dar conta da refração segundo um modelo ondulatório. Os livros didáticos perpetuam a homenagem que um dia lhe foi dada, atribuindo seu nome a um princípio – Princípio de Huygens. Porém, em sua obra máxima, *Tratado sobre a luz*<sup>1</sup>, é possível se ver muito mais: sua inventividade na defesa de um modelo ondulatório para a luz numa época em que o modelo corpuscular se mostrava como um forte concorrente. Colocando seu modelo em funcionamento, ele dá explicações para diversas propriedades da luz conhecidas a sua época, propriedades que se encontram espalhadas de forma dispersa na referida obra.

Neste trabalho localizaremos as propriedades que se encontram nos três primeiros capítulos<sup>2</sup> da obra, explicitando diversos aspectos do modelo de Huygens e adicionando comentários sempre que se fizer necessário ao entendimento do texto. Respeitando a ordem de apresentação de suas idéias, tentamos capturar o raciocínio desenvolvido pelo autor, mostrando que, apesar de ter sido publicada há mais de trezentos anos, a obra continua bastante acessível (o

---

<sup>1</sup> A primeira publicação do *Tratado* é de 1690. No seu prefácio, Huygens informa que o comunicou em 1678 na Academia Real de Ciências (segundo Shapiro (1973, p. 207), ele a apresentou no ano seguinte), apesar de tê-lo escrito doze anos antes. Essa escrita, no entanto, deve ter sido muito preliminar, dado que o resultado de Romer sobre a medida da velocidade da luz – confessadamente fundamental para a sua teoria – foi anunciado na mesma Academia apenas em novembro de 1676 e, segundo Shapiro (1973, p. 218), chegado a Huygens cerca de um ano mais tarde.

<sup>2</sup> No quarto capítulo ele trata da refração da luz no ar, no quinto ele se dedica ao que hoje é conhecido como dupla refração e no sexto ele trata da geometria das superfícies próprias à refração e à reflexão.

que, do ponto de vista da didática, justifica a transcrição de muitos de seus trechos). Para isso, vamos lançar mão da tradução – e comentários – feita por Roberto de Andrade Martins (Huygens, 1986). Comentários da consagrada obra de Shapiro (1973), *Kinematic Optics: a study of the wave theory of light in the seventeenth century*, também serão considerados.

Além disso, elegemos entre as explicações dadas por Huygens para as propriedades da luz aquelas passíveis de didatizações inovadoras, apontando caminhos para isso.

## O TRATADO DE HUYGENS

Huygens inicia seu Tratado afirmando que “as demonstrações relativas à Óptica são fundamentadas sobre verdades tiradas da experiência” (p. 10)<sup>3</sup> tais como a propagação retilínea da luz, a igualdade dos ângulos de incidência e reflexão e o desvio do raio refratado segundo a regra dos senos. Apesar de admitir o valor dessas “verdades”, ele adverte: “A maior parte daqueles que escrevem sobre as diferentes partes da Óptica contentaram-se com pressupor essas verdades. Mas alguns mais curiosos quiseram pesquisar sua origem e suas causas” (p. 10). Diferentemente desses “curiosos”, sua intenção é “dar razões mais claras e verossímeis” (p. 10) para aquelas verdades experimentais.

Dada a recorrente referência ao “Sr. Des Cartes” – inclusive no que concerne a sua discordância quanto à afirmação, decorrente do uso de seu modelo corpuscular, de que “a luz passa mais lentamente através do vidro e da água do que através do ar” (p. 37)<sup>4</sup>, – é possível que entre esses curiosos se encontre Descartes. O empenho de Huygens se dá, então, no sentido de considerar as várias propriedades da luz, apontando as falhas do modelo corpuscular para explicar tais propriedades e evidenciando as potencialidades do modelo ondulatório.

### O modelo ondulatório: analogia com o som

Huygens inicia sua defesa em favor de um modelo ondulatório para a luz, argumentando que “não se pode duvidar que a luz consista no movimento de certa matéria” (p. 12), sendo a visão uma evidência disso:

*Considera-se certo que a sensação de visão é excitada pela impressão de algum movimento de uma matéria que age sobre os nervos no fundo de nossos olhos e essa é ainda uma outra razão para se crer que a luz consiste em um movimento da matéria que se encontra entre nós e os corpos luminosos. (p. 12)*

Outras “verdades experimentais” – a “extrema velocidade” da luz, seu espalhamento “por todos os lados” e “[os raios luminosos]<sup>5</sup> se atravessam uns aos outros sem se atrapalharem” (p. 12) –, tratadas mais adiante, o levam a se opor ao modelo da luz como conjunto de corpúsculos: “quando vemos um objeto luminoso, isso não poderia ocorrer pelo transporte de matéria que venha do objeto até nós, como uma flecha ou bala que atravessa o ar” (p. 12). Recorre, então, “ao nosso conhecimento da propagação do som no ar” (p. 12), aplicando-o à luz:

*Sabemos que, por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em toda a volta do lugar onde foi produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte do ar a outra. A propagação desse movimento se faz com igual velocidade para todos os lados e devem se formar como superfícies esféricas que crescem sempre e que chegam a atingir nossas orelhas. {...} Se a luz gasta tempo para essa passagem {de um corpo luminoso até nós} {...} seguir-se-á que esse movimento*

---

<sup>3</sup> Com o intuito de facilitar sua localização no *Tratado*, trechos são identificados com o número da página da qual foram retirados.

<sup>4</sup> O modelo de Descartes para a refração encontra-se descrito por André Koch Torres Assis em *Óptica* (1996).

<sup>5</sup> As expressões dentro dos colchetes são usadas pelo tradutor para adicionar esclarecimentos ao texto original. Nós utilizamos chaves com o mesmo propósito. Os parênteses são de Huygens.

*impresso à matéria é sucessivo e que, conseqüentemente, ele se espalha, assim como o som, por ondas esféricas.* (p. 12)

Ele admite, no entanto, que apesar das semelhanças, há diferenças nos dois domínios: “na primeira produção do movimento que os causa” (p. 16), no meio de sustentação da onda e na forma de propagação. No que diz respeito à **produção**, Huygens afirma que no caso do som esta se dá pelo “súbito abalo de um corpo inteiro, ou de uma parte considerável”, enquanto que no caso da luz “deve nascer como de cada ponto do objeto luminoso” (p. 17). Além disso, “a agitação das partículas que geram a luz deve ser muito mais rápida e brusca do que a que causa o som” (p. 17). Mais adiante, volta a insistir nesses aspectos da luz, tornando-os mais claros: “na chama de uma vela (figura 1), sendo distinguidos os pontos A, B e C, os círculos concêntricos descritos em torno de cada um desses pontos representam as ondas que deles provêm” (p. 21). A referência à agitação muito rápida das partículas produtoras de luz não significa, no entanto, que Huygens imaginava a luz sendo constituída de ondas periódicas<sup>6</sup>:

*Como as percussões no centro dessas ondas não possuem uma seqüência regular, também não se deve imaginar que as ondas sigam umas às outras por distâncias iguais: se essas distâncias o parecem nessa figura, é mais para indicar o progresso de uma mesma onda em tempos iguais, do que para representar várias [ondas] provenientes de um mesmo centro.* (p. 21).



**Figura 1: Desenho retirado do *Tratado*: ondas concêntricas a partir dos pontos A, B e C de uma vela.**

Com essa figura, Huygens deseja simular o que hoje se obtém com fotografias estroboscópicas: os círculos concêntricos indicam “o progresso de uma mesma onda em tempos iguais”; não representam o que se poderia obter com fotografia instantânea de uma onda periódica, sendo o comprimento de onda dado pela distância entre esses círculos.

O **meio de sustentação** da onda, no caso do som, é o ar; no caso da luz ele é obrigado a recorrer à “matéria etérea” (p. 17), usando como argumento os resultados de experiências de Boyle e de Torricelli sobre a propagação da luz mesmo em espaços donde se retira o ar. Quanto à **forma de propagação**, é do conhecimento de Huygens o que acontece com o som: “o ar é de natureza tal que pode ser comprimido e reduzido a um espaço muito menor do que ocupava ordinariamente; e que, à medida que é comprimido, esforça-se por aumentar” (p. 18). Convencido de que com esse modelo não conseguirá explicar uma série de propriedades da luz – entre elas a “extrema velocidade da luz” (p. 18) –, concebe a propagação de outra forma, entendendo-a por analogia com a propagação que ocorre através de esferas rígidas no que hoje é conhecido como berço de Newton<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Martins (Huygens, nota 11, p. 21) afirma que, como Hook, Huygens pensava em pulsos independentes e não em uma onda com comprimento de onda característico. Shapiro acredita que a negação da periodicidade das ondas advém de analogia com o som, suspeita que Huygens “reconheceu que sua teoria se aplicava igualmente a pulsos e ondas periódicas” e considera que, para ele, “a admissão da periodicidade seria uma restrição não justificada a sua teoria” (Shapiro, 1973, p. 222).

<sup>7</sup> Muito popular, esse aparato experimental é composto por pêndulos suspensos idênticos e contíguos.

Ele passa, então, a explicar uma série de propriedades da luz: velocidade extrema mas não infinita, constância da velocidade, propagação para frente, independência das ondas de luz, propagação a grandes distâncias, propagação retilínea, reflexão, refração e, correlata a essa última, transparência e opacidade. Ao mesmo tempo, seu modelo para a luz vai sendo detalhado.

### **Velocidade extrema mas não infinita**

Huygens considera inicialmente uma situação experimental que apontaria para a infinitude da velocidade da luz e argumenta contra essa conclusão, situação e argumento muito semelhantes aos que são apresentados por Galileu em *Dois Novas Ciências* (Galileu, 1985, p. 44), embora esse autor não tenha sido citado:

“aquelas {experiências} que se podem fazer na Terra, com fogos colocados a grandes distâncias, provam que a luz não gasta um tempo sensível para percorrer tais distâncias; mas pode-se dizer com razão que elas [as distâncias] são muito pequenas, e que *não se pode concluir senão que a passagem da luz é extremamente rápida.*” (p. 13)

Huygens considera ainda a situação física que levou Descartes a ser da “opinião que ela era instantânea” (p. 13). Trata-se de medidas obtidas a partir dos eclipses da Lua, que ele mostra que não são convincentes para se decidir sobre a velocidade da luz. Lança mão, então, da “engenhosa demonstração do Sr. Romer” (p. 15) – sobre a obtenção da velocidade da luz através de medidas de posição de um satélite de Júpiter<sup>8</sup> –, que ele apresenta em detalhe<sup>9</sup>. Para Huygens, o fato de o valor obtido para a velocidade da luz ser cem mil vezes maior do que a do som torna-se perfeitamente compreensível quando se apela para o berço de Newton: “não se trata do transporte de um corpo com tal velocidade, mas de um movimento sucessivo que passa de uns aos outros” (p. 14). Esse aspecto é explorado com muita propriedade por ocasião da descrição do dito aparato:

Tomando-se um grande número de bolas de igual tamanho, feitas de alguma matéria muito dura, e colocando-as em linha reta, de modo que se toquem, descobre-se que, batendo com uma bola semelhante contra a primeira delas, o movimento passa quase instantaneamente à última, que se separa da fila, sem que se perceba que as outras se tenham movido. E também aquela que bateu [na primeira] permanece imóvel como elas. {...} Mas note-se que *este progresso do movimento não é instantâneo, mas sucessivo, e que assim ele necessita tempo.* Pois se o movimento (ou, se preferirmos, a tendência ao movimento) não passasse sucessivamente por todas essas bolas, elas o adquiririam todas ao mesmo tempo, e portanto todas avançariam juntas – o que não ocorre. É a última que deixa a fila e adquire a velocidade daquela que foi lançada. (p. 18)

A analogia com o berço de Newton vai auxiliar Huygens a modelar o éter. Para que a propagação do movimento seja rápida, é necessário que as bolas sejam duras: “Aí se vê uma passagem de um movimento com uma velocidade muito grande, e que se torna ainda maior quando a matéria das bolas é ainda mais dura” (p. 18).

À dureza ele associa a elasticidade<sup>10</sup>, propriedade que usa para explicar o valor finito do “progresso do movimento” através das bolas:

Descobri pois que atingindo com uma bola de vidro ou de ágata um pedaço grande e bem espesso do mesmo material, que tinha superfície plana e um pouco embaçada pelo alento ou de outra forma, aí ficaram marcas redondas, maiores ou menores, conforme o golpe

---

<sup>8</sup> Para maiores esclarecimentos ver Bodanis (2004).

<sup>9</sup> Shapiro (1973, p. 218-9) discute a importância que Huygens atribui à Romer na construção do *Tratado*.

<sup>10</sup> Huygens não apresenta uma causa física para a dureza e para a elasticidade do éter.

fosse forte ou fraco. Isso mostra que *essas matérias cedem em seu encontro, e se restituem, sendo para isso necessário que elas gastem tempo*<sup>11</sup>. (p. 18)

Daí ele atribui ao éter as mesmas propriedades das bolas: “nada impede que imaginemos que as partículas do éter sejam de uma matéria tão próxima da dureza perfeita e de uma recuperação tão rápida quanto quisermos” (p. 18).

Além do valor finito da velocidade da luz, a elasticidade do éter permitirá a compreensão de outros comportamentos da luz, entre os quais a constância dessa velocidade.

### Constância da velocidade

A relação entre a elasticidade do éter e a constância da velocidade da luz é assim expressa:

Se tentássemos encontrar alguma outra maneira pela qual o movimento da luz se comunicasse sucessivamente, *não seria encontrada nenhuma que melhor conviesse do que a elasticidade à propagação uniforme*, que parece ser necessária; pois, se o movimento se tornasse mais lento à medida que se distribuisse entre mais matéria, afastando-se da fonte de luz, ele não poderia conservar sua velocidade a grandes distâncias. (p. 19)

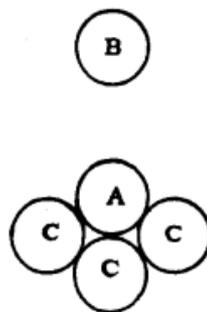
Shapiro (1973, p. 220) destaca que Huygens reconheceu corretamente que a velocidade de propagação de um pulso é função da elasticidade do meio e considera mais importante ainda para a sua teoria da luz o fato de ele também ter reconhecido que essa velocidade é independente do tamanho do impulso:

{...} supondo a elasticidade na matéria etérea, suas partículas terão a propriedade de restituir-se igualmente depressa, *seja quando empurradas fortemente ou fracamente*. Assim, o progresso da luz continuará sempre com uma velocidade igual”. (p. 19)

### Propagação para frente

Valendo-se de uma “lei do movimento” que é “verificada pela experiência”, Huygens defende a propagação da luz “sempre para a frente”, apesar de as partículas do éter não estarem “alinhadas em retas, como em nossa fila de bolas, mas confusamente” (p. 19). Referindo-se à figura 2, ele afirma:

Quando uma bola como A, aqui, toca várias outras bolas CCC, se ela é atingida por outra bola B, de modo que ela pressione todas as CCC que toca, ela lhes transmite todo seu movimento e após isso permanece imóvel, como também a bola B. (p. 19-20)



**Figura 2: Desenho retirado do *Tratado*: choque entre bolas que representam partículas do éter luminífero**

<sup>11</sup> Mais adiante, Huygens deixa explícito: sigo “regras da percussão que publiquei alguns anos atrás” (p. 20). Shapiro (1973, p. 219) confirma que, à época do *Tratado*, ele já havia estabelecido leis do impacto. Permanece a dúvida sobre qual trabalho teria sido este, uma vez que a publicação do *De motu corporum ex percussione* é póstuma.

Huygens deixa claro que não vê necessidade de imaginar as partículas etéreas nem esféricas nem iguais. Sobre essa igualdade ele se manifesta mais claramente adiante.

### Independência das ondas de luz<sup>12</sup>

A independência das ondas de luz é deveras importante para Huygens, sendo focado em quatro passagens distintas, sendo que a primeira, localizada logo no segundo parágrafo do *Tratado*, é muito enfática:

Não se encontra pessoa nenhuma que tenha explicado de forma provável esses fenômenos primeiros e mais notáveis da luz, a saber: {...} *os raios visuais, provindos de uma infinidade de lugares, cruzam-se sem em nada atrapalharem-se uns aos outros.* (p. 11)

Outra passagem:

Não deve parecer inconcebível {...} que *essa prodigiosa quantidade de ondas se atravesse sem confusão e sem se apagarem umas às outras.* É certo que uma mesma partícula de matéria pode servir a diversas ondas, provenientes de diferentes lados, ou mesmo de lados contrários {...} (p. 21)

Pode-se entender a importância que Huygens dá a esse aspecto da luz pela dificuldade do modelo corpuscular em explicá-lo. No caso do modelo ondulatório, o berço de Newton é acionado (figura 3):

Se lançarmos contra ela {fila de bolas iguais}, ao mesmo tempo, dos dois lados opostos, bolas semelhantes *A* e *D*, ver-se-á que cada uma retorna com a mesma velocidade que tinha inicialmente, e toda a fila permanece em seu lugar, *embora o movimento tenha passado por todo seu comprimento, de forma dupla.* Se esses movimentos contrários se encontrarem na bola *B* do meio, ou em alguma outra *C*, ela deve se contrair e se recuperar dos dois lados e assim servir ao mesmo tempo para transmitir esses dois movimentos. (p. 21)

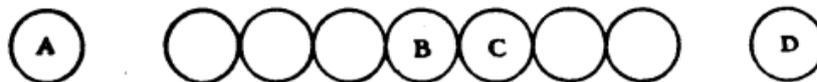


Figura 3: Desenho retirado do *Tratado*: choque simultâneo de A e D contra seqüência de bolas contíguas

### Propagação a longa distância

Huygens admite que o que “pode parecer muito estranho e até inacreditável é que ondulações produzidas por movimentos de corpúsculos tão pequenos {que compõem o éter} possam se propagar, por exemplo, desde o Sol ou desde as estrelas até nós” (p. 21), uma vez que a “força dessas ondas (de luz) deve enfraquecer à medida que se afastam de sua origem” (p. 22). De fato, a “ação de cada uma {das ondas} em particular se tornará sem dúvida incapaz de se fazer sentir por nossa visão” (p. 22). Huygens parece, pois, mostrar seu conhecimento acerca do decaimento da intensidade da luz com o inverso do quadrado da distância – segundo Martins (Huygens, nota 12, p. 22) já proposto por Kepler em 1609 – e que poderíamos, nos dias atuais, identificar com o princípio da conservação da energia.

Suas tentativas no sentido de minimizar esse enfraquecimento são de três tipos distintos. Primeiro, ele considera que o corpo luminoso é extenso. Dessa forma, “uma infinidade de ondas, embora provenientes de diferentes pontos desse corpo, unificam-se de modo que sensivelmente compõem uma só onda, que conseqüentemente deve ter força suficiente para se fazer sentir” (p.

<sup>12</sup> Conhecido hoje como princípio da superposição.

22). Segundo, ele considera que não se trata apenas de um pulso: num intervalo de tempo tão pequeno quanto se queira, “de cada ponto luminoso podem provir milhares de ondas {...} pela freqüente percussão dos corpúsculos {do corpo}” (p. 22). E, por último, ele afirma que:

{...} cada partícula de matéria atingida por uma onda não deve comunicar seu movimento apenas à partícula próxima que está na linha reta traçada do ponto luminoso; mas que ela também comunica necessariamente a todas as outras que a tocam, e que se opõem a seu movimento. De modo que deve ocorrer que em torno de cada partícula se produza uma onda da qual essa partícula seja o centro. (p. 22)

Certamente Huygens fez essa consideração tendo em mente a situação representada na figura 2: a partícula A comunica seu movimento não só à partícula C que se encontra na linha reta definida pelas bolas B, A e C, mas também às outras Cs próximas a ela. Huygens não o fez, mas, poderíamos imaginar mais duas bolas Cs lateralmente contíguas à bola A. No choque de B com A, as duas bolas adicionais, não se moveriam, pois não se opõem a seu movimento.

Tratando até aqui a luz através de um modelo de onda mecânica que se propaga num meio elástico, Huygens começa a se tornar independente desse modelo ao lhe associar uma construção geométrica (figura 4) – que veio a se transformar no que hoje é geralmente didatizado como Princípio de Huygens<sup>13</sup>. Nessa construção, um pulso emana de um único ponto do corpo luminoso:

Se DCF é uma onda emanada do ponto luminoso A, que é o seu centro, a partícula B, uma das que estão compreendidas na esfera DCF, produzirá sua onda particular<sup>14</sup> KCL, que tocará a onda DCF em C, no mesmo momento em que a onda principal, emanada do ponto A, tenha chegado a DCF. É claro que a onda KCL tocará a onda DCF apenas no lugar C, que está na reta traçada por A e B. Da mesma forma as outras partículas compreendidas na esfera DCF, como bb, dd, etc, terão cada uma produzido sua onda. Mas cada uma dessas ondas não pode ser senão infinitamente fraca comparada à onda DCF, para cuja composição todas as outras contribuem pelas partes de suas superfícies que estão mais afastadas do centro A {isto é, pelos pontos tangentes a DCF}. (p. 22)

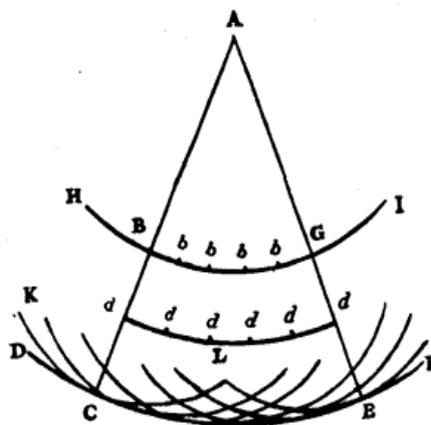


Figura 4: Desenho retirado do *Tratado: ondas – principal e particulares – emanadas do ponto luminoso A*

<sup>13</sup>Com pequenas variações, o princípio é expresso na forma do seguinte enunciado: “Cada ponto de uma frente de onda primária constitui uma fonte para ondas esféricas secundárias, e a posição da frente de onda primária num instante posterior é determinada pela envolvente de todas estas ondas secundárias” (Hecht, 2002, p. 136).

<sup>14</sup>No francês do texto original a palavra *particulair* – adjetivo relativo à partícula – é usada para qualificar a onda produzida por uma partícula do éter. Uma tradução mais adequada para o português seria *corpúscular*, uma vez que o termo particular tem outros significados (como *particulier* em francês). Nos livros didáticos atuais a onda é geralmente qualificada de secundária; no idioma inglês algumas vezes (Born e Wolf 1890 e Klein, 1970) é usado o termo *wavelet*; em traduções do inglês para o português, pode-se encontrar *ondícula* (Heweet, 2002) e *ôndulas* (Hecht, 1998). A mudança de nome se deve, seguramente, ao esforço de não deixar nesses livros qualquer vestígio de uma entidade – o éter – que tão bem caracterizou um paradigma ultrapassado (Kuhn, 1982).

Segundo Shapiro (1973, p. 224) a introdução do “‘princípio de Huygens’ não é clara, uma vez que “as ondas secundárias ou ‘particulares’ complicam mais que simplificam a discussão das ondas esféricas”.

Assim, algumas observações são necessárias: a primeira delas diz respeito à composição da onda DCF, que atualmente é conhecida como envoltória da onda. As palavras de Huygens fazem crer que “no mesmo momento”, a onda DCF, emanada de A, e a onda particular KCL, emanada de B, se tocarão, o que pode levar o leitor a pensar que há composição da onda principal com a secundária. Certamente não foi isso que Huygens tinha em mente.

Outra observação se refere à representação da “onda particular”. Embora Huygens não tenha dito, a onda KCL (representada apenas por um arco de circunferência) não se propaga em todas as direções, uma vez que, tal como já foi visto, a luz se propaga para frente. Para ser mais preciso, o arco deveria, então, ser representado por uma semi-circunferência. Aliás, é isso que Fresnel (1788-1827) considera, mais de um século depois, ao introduzir nas suas equações para descrição mecânica das oscilações transversais do éter um fator, o *fator de inclinação*, na amplitude das ondas esféricas secundárias, que é máximo na direção normal à frente de onda e zero quando o ângulo for de  $\pi/2$  com essa direção (Nussensveig, 2002, p. 85).

Na construção geométrica de Huygens, Martins vê ainda um problema de conservação de energia ou, dito na maneira como aparece no seu comentário (Huygens, nota 12, p. 22), a teoria de Huygens teria dificuldade para explicar, quantitativamente, a queda da intensidade luminosa com o quadrado da distância, justamente o que parece estar na base de suas explicações – anteriormente apontada – para a propagação da luz a longa distância. De fato, se das ondas secundárias apenas o ponto que toca a envoltória contribui para a formação desta, pode-se entender o que Martins afirma: “a maior parte das ondas emitidas por cada ponto é ‘perdida’, não contribuindo para a formação da onda principal, que não transporta, portanto, todo movimento primariamente existente na onda”. De fato, a envoltória, construção que se mantém nos manuais didáticos, pode resultar em alguns mal entendidos. Ela pode ser usada para representar um pulso de onda, mas isso não significa que a energia do pulso encontra-se apenas aí localizada. Quando se considera a composição construtiva de pulsos de ondas em fase, isto é, a interferência das ondas secundárias, – correção feita por Fresnel hoje conhecida como princípio de Huygens-Fresnel<sup>15</sup> – é possível ver que a energia se distribui em torno da envoltória.

Dito de outra maneira, Shapiro afirma:

Huygens não apresenta prova de que ondas secundárias concorrem num mesmo instante *somente* em sua tangente comum e, portanto, são perceptíveis somente ali. {...} Fresnel mostrou que as ondas secundárias são imperceptíveis fora das frentes de onda, não porque são muito fracas ali, mas porque elas ali interferem destrutivamente. (Shapiro, 1973, p. 225)

E prossegue:

Contudo, isso pode ser *demonstrado* sem deixar o domínio da física do século dezessete. *Intuitivamente*, não parece, tal como Huygens reivindica, que a soma das ondas secundárias fora da sua tangente comum deva ser infinitesimal se comparada àquela da frente de onda. (Shapiro, 1973, p. 225)

E apresenta a referida demonstração: com base na geometria da figura 4, ele evidencia que no mesmo instante em que a luz que sai de A forma a frente de onda DCF, um número infinito de ondas secundárias também concorrem em qualquer outro ponto (Shapiro, 1973, p. 225-6).

---

<sup>15</sup> Seu enunciado: “Cada ponto de uma frente de uma onda não obstruída constitui, em qualquer instante, uma fonte de ondas esféricas secundárias ou ôndulas (com a mesma frequência da onda primária); a amplitude do campo óptico em qualquer ponto do espaço é dada pela sobreposição de todas essas ôndulas (tendo em conta as suas amplitudes e fases relativas).” (Hecht, 2002, p. 496).

Fica, então, a pergunta – respondida adiante –: por que Huygens não chegou a desenvolver tal demonstração ou, no mínimo, não raciocinou de forma intuitiva?

### Propagação retilínea

Para explicar a propagação retilínea, Huygens apela para a geometrização referida à figura 4:

{...} cada parte da onda deve se propagar de modo que as extremidades estejam sempre compreendidas entre as mesmas retas traçadas do ponto luminoso. Assim, a parte da onda BG, que tem o ponto luminoso A por centro, se propagará no arco CE, terminado pelas retas ABC, AGE. *Embora as ondas particulares produzidas pelas partículas compreendidas pelo espaço CAE se espalhem também fora desse espaço, elas só concorrem no mesmo instante para compor juntas uma onda que limite o movimento na circunferência CE, que é sua tangente comum.* (p. 23)

Ao imaginar na figura 4 uma abertura BG de um corpo opaco BAG, ele afirma que “as partes das ondas particulares que se propagam fora do espaço ACE são fracas demais para produzir luz” (p. 24). De fato, esse raciocínio decorre da consideração feita por ocasião da construção geométrica da figura 4: *a soma das ondas secundárias fora da sua tangente comum deve ser infinitesimal se comparada àquela da frente de onda.*

A origem de tal consideração localiza-se, então, na tentativa de Huygens de explicar a propagação retilínea da luz. Este era, talvez, o seu maior desafio. Afinal, como uma onda, a luz deveria “virar a esquina”, tal como o faz o som<sup>16</sup>. A introdução dessa consideração contra-intuitiva foi o preço que Huygens pagou por compartilhar com os corpuscularistas a “verdade tirada da experiência” de que a luz se propaga em linha reta, mesmo em tempos em que a difração da luz já era conhecida<sup>17</sup>. Respondida está a pergunta deixada em aberto: visando à explicação da propagação retilínea da luz, Huygens não poderia pensar intuitivamente nem desenvolver a demonstração apresentada por Shapiro.

Consideração contra-intuitiva da mesma natureza também levou Huygens a não se importar com o tamanho das partículas etéreas. Quando tratou da propagação para frente, Huygens não viu a necessidade de imaginar bolas de tamanhos iguais, mesmo reconhecendo que parte do movimento se daria em sentido contrário ao da propagação, caso uma bola de tamanho menor se chocasse com uma de tamanho maior. Essa igualdade é necessária apenas para tornar a propagação para frente “mais fácil e mais forte” (p. 20). Sua justificativa também reside em desprezar efeitos produzidos por ondas particulares:

Parece ainda, pelo que foi notado em relação à fraqueza das ondas particulares, que não é necessário que todas as partículas do éter sejam iguais entre si, embora a igualdade seja mais própria à propagação do movimento. É verdade que a desigualdade fará com que uma partícula, empurrando uma outra maior, se esforce para recuar com uma parte do seu movimento, mas daí apenas *serão geradas algumas ondas particulares para trás, para o ponto luminoso, incapazes de produzir luz* – e não uma onda composta de muitas, como era CE. (p. 24)

Segundo Shapiro (1973, p. 226), “Felizmente, Huygens usa daqui a diante {no que se segue no *Tratado*} o ‘princípio de Huygens’ apenas como uma construção para determinar as frentes de onda”. É o que ele faz no caso da reflexão e da refração, propriedades às quais dedica dois capítulos.

<sup>16</sup> A correção de Fresnel propicia o entendimento do processo de difração, ficando, dessa forma, resolvida essa dificuldade. Em Einstein e Infeld (1976, p. 93) isso é tratado de forma muito interessante.

<sup>17</sup> Martins (Huygens, nota 14, p. 24) e Shapiro informam que Grimaldi fez experiências sobre esse fenômeno em 1665. Ainda segundo Shapiro, em 1679 Mariotte e Lahire replicaram o experimento de Grimaldi com a presença de Huygens, que “aparentemente não se convenceu de que se tratava de um novo fenômeno óptico” Shapiro (1973, p. 224).

## Reflexão

O capítulo sobre reflexão inicia com a descrição da figura 5 na qual  $AB$  é uma “superfície plana e polida” e  $AC$  representa “uma parte de uma onda de luz” cujo centro se encontra no infinito. E prossegue:

O ponto  $C$  da onda  $AC$ , em um certo espaço de tempo, terá avançado até o plano  $AB$  no ponto  $B$ , seguindo a reta  $CB$  {...}. Ora, nesse mesmo espaço de tempo, o ponto  $A$  da mesma onda, que foi impedido de comunicar seu movimento para além do plano  $AB$ , pelo menos em parte, deve ter continuado seu movimento na matéria que estava acima desse plano, e isso em um alcance igual a  $CB$ , produzindo sua onda esférica particular, segundo o que foi dito acima {sobre a figura 4}. Essa onda é representada aqui pela circunferência  $SNR$  {...}.

Considerando-se em seguida os outros pontos  $H$  da onda  $AC$ , nota-se que eles não apenas terão chegado à superfície  $AB$  por retas  $HK$  paralelas a  $CB$ , mas além disso terão gerado ondas esféricas particulares do centro  $K$ , no diáfano, representadas aqui pelas circunferências cujos semidiâmetros são iguais a  $KM$  {...}.

Porém, todas essas circunferências possuem por tangente comum a linha reta  $BN$  {...}.

{...} É por isso {...} que  $BN$  é a propagação da onda  $AC$  no momento em que o ponto  $C$  tiver chegado a  $B$ . (p. 25-26)

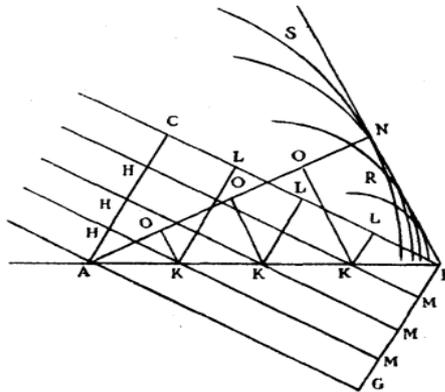


Figura 5: Desenho retirado do *Tratado* referente à reflexão

Tal como no caso da vela, a figura 5 mostra a evolução de um pulso, representado por sua frente  $AC$ , em quatro instantes diferentes, separados por intervalos de tempo iguais<sup>18</sup>. Assim, quando a frente de onda tocar a superfície em  $B$ , a onda particular formada em  $A$  quatro intervalos de tempo antes terá evoluído numa esfera de raio  $AN$  e as ondas particulares formadas nos  $K$ s três, dois e um intervalos de tempo antes, terão evoluído em esferas de raio menor, de forma que todas as esferas terão uma tangente comum  $BN$ , que representa a frente de onda refletida. Em três, dois e um intervalos de tempos anteriores a tangente comum está representada na figura pelos segmentos de reta  $OK$ 's. Vê-se aqui a importância da construção geométrica da figura 4 na demonstração de Huygens para a reflexão.

A igualdade entre os ângulos de incidência e de reflexão é obtida por considerações geométricas.

### Reflexão regular versus difusa

No início da demonstração acima, Huygens supõe uma superfície “perfeitamente unida”, isto é, uma superfície ideal sem reentrâncias. Porém, ao final, ele afirma que sua demonstração não exige que a superfície seja assim constituída, “mas apenas de uma continuidade como a que

<sup>18</sup> Não confundir com desenhos – resultados de transposições didáticas do *Tratado* – que geralmente aparecem em livros didáticos tais como Halliday, Resnik e Krane (2004, p. 67): neles, o desenho é como a fotografia instantânea a qual já nos referimos.

deve ser composta pelas partículas da matéria do corpo refletor colocadas próximas umas das outras” (p. 28). Com vistas a explicar mais adiante a penetração da luz nos corpos transparentes, ele faz a suposição de que as “partículas da matéria do corpo refletor” são “maiores do que as da matéria etérea”<sup>19</sup> (p. 28). Daí, ele conclui a falibilidade da explicação corpusculista para a reflexão da luz:

{...} é evidente que não se poderia demonstrar a igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão pela analogia {...} com o que ocorre a uma bola atirada contra um muro. (p. 28)

É impecável o argumento de Huygens: com partículas de luz menores que as da superfície não poderia haver, segundo a perspectiva corpusculista, reflexão regular ou especular<sup>20</sup>. Na perspectiva ondulatória não há essa dificuldade:

O pequeno tamanho das partículas do mercúrio, por exemplo, é tal que se deve conceber milhões na menor superfície visível que se queira, arrumadas como um conjunto de grãos de areia que se tivesse tornado tão plano quanto fosse possível; sob esse ponto de vista, essa superfície se torna então igual a um vidro polido, e embora ela permaneça sempre irregular com relação às partículas do éter, é evidente que os centros de todas as esferas particulares de reflexão {...}, estão aproximadamente como *um mesmo plano contínuo*, e assim a tangente comum pode lhes convir de modo suficientemente perfeito para que se dê a produção da luz. (p. 28)

Sua solução foi imaginar que, apesar das imperfeições das superfícies polidas, há aproximadamente um “plano contínuo” que é formado pelos “centros de todas as esferas particulares de reflexão”. Um problema que Huygens não enfrentou foi o da definição do que seja uma superfície polida.

Sua solução é, pois, tão precária quanto a de Newton (1643-1727), que tenta fugir dos como a apontada por Huygens imaginando que “a reflexão de um raio é efetuada, não por um ponto único do corpo refletor, mas por algum poder do corpo que está espalhado uniformemente por toda sua superfície e pela qual ele age sobre o raio sem contato imediato”, isto é, “as partes do corpo agem sobre a luz a distância” (Newton, 1996, p. 201).

Apesar de considerar a luz como uma onda (dizendo explicitamente que pensava da mesma forma que o “Sr. Hook” e o “Pe. Pardies”), falta à geometrização de Huygens – como já se apontou – a noção de comprimento de onda: as imperfeições da superfície não serão “vistas” pela luz quando delas for muito menor que o comprimento de onda da luz incidente.

## Transparência dos corpos

No capítulo III Huygens se dedica à refração, mas antes ele se vê obrigado a dar conta da transparência dos corpos uma vez que “pode parecer estranho supor” a passagem das ondas no interior desses corpos. Pondo para funcionar seu modelo de onda mecânica através do éter, ele

---

<sup>19</sup> Huygens parece confundir a suposição relativa às explicações corpusculista e ondulatória para a transparência dos corpos: no caso do modelo corpuscular, são as partículas de luz, e não as partículas do éter, que devem ser menores que as da superfície do corpo.

<sup>20</sup> É interessante ver como Newton estava sintonizado com essa problemática (Newton, 1996, p. 201):

“... se os raios de luz refletidos se chocassem com as partes sólidas dos corpos, suas reflexões nos corpos polidos não poderiam ser tão regulares como são. Pois polindo-se vidro com areia, potéia ou trípole, não é imaginável que essas substâncias possam, ao raspar e friccionar o vidro, efetuar em todas as suas partículas menores um polimento acurado, de modo que todas as suas superfícies sejam verdadeiramente planas ou verdadeiramente esféricas e pareçam todas da mesma forma, de maneira a comporem, juntas, uma superfície uniforme. Quanto menores forem as partículas dessas substâncias, menores serão as ranhuras pelas quais elas desgastam e riscam o vidro continuamente até ele ficar polido; porém, com elas nunca são tão pequenas, não podem polir de outra forma senão trazendo sua aspereza a um grau muito pequeno, de forma que as ranhuras e desgastes da superfície se tornem muito pequenos para serem visíveis. Assim, se a luz fosse refletida ao chocar-se com as partes sólidas do vidro, ela seria tão espalhada pelo vidro mais polido quanto pelo mais áspero. Resta pois o problema de saber como o vidro polido por substâncias abrasivas pode refletir a luz ao regularmente quanto o faz.”

propõe três maneiras de conceber essa passagem: o éter não penetra nos corpos transparentes e as próprias partículas do corpo “poderiam comunicar sucessivamente o movimento das ondas” (p. 29); a matéria etérea, responsável pelo movimento da onda, “ocupa continuamente os interstícios ou poros dos corpos transparentes” (p. 30); “o movimento das ondas se transmite indiferentemente pelas partículas da matéria etérea, que ocupam os interstícios dos corpos, e pelas partículas que o compõem” (p. 31). Ele considera fácil conceber que partículas do corpo transparente comuniquem o movimento das ondas, uma vez que, tal como o éter, essas partículas têm natureza elástica. Admitir tal elasticidade, no caso de um sólido, o obriga a considerá-los “rarefeitos” (p. 29), isto é, constituído de partículas que “estão apenas colocadas próximas umas das outras” (p. 29), suposição não desprovida de sentido uma vez que se considere a “facilidade com a qual passam por eles {os sólidos} a matéria dos turbilhões do imã e a que causa a gravidade” (p. 29)<sup>21</sup>. Huygens, no entanto, vê problemas em aceitar que o éter não penetre nos corpos transparentes. A já citada experiência de Torricelli lhe ajuda na argumentação: “quando o mercúrio e a água abandonam a parte alta do tubo de vidro, parece que ela é imediatamente preenchida pela matéria etérea, pois a luz passa lá” (p. 29), donde se conclui que o éter atravessou o vidro diretamente ou, passando pelo mercúrio, foi ocupar a parte superior do tubo.

Isso o faz considerar a segunda maneira de explicar a transparência como mais plausível do que a primeira, levando-o a advogar mais uma vez em favor da rarefação: “esses interstícios {dos corpos transparentes} ocupam muito mais espaço do que as partículas coerentes que constituem o corpo” (p. 30). Essas suposições sobre a estrutura da matéria sustentam outras sobre a variação da velocidade da luz: “pode-se crer que o progresso dessas ondas deve ser um pouco mais lento dentro dos corpos, por causa dos pequenos desvios causados por essas mesmas partículas” (p. 31).

A terceira possibilidade lhe parece a mais frutífera, uma vez que “serve para explicar a dupla refração” (p. 31), fenômeno que ele tratará no capítulo V, intitulado *Sobre a estranha refração do cristal da Islândia*, e que não abordamos neste trabalho.

Huygens se vê, com todas essas hipóteses, frente a outro problema: “em que esses corpos {transparentes} diferem daquelas que são opacos – mais ainda, porque pode parecer que não haveria corpo que não fosse transparente, por causa da fácil penetração dos corpos pela matéria etérea” (p. 31). Faz, então, novas suposições sobre a constituição dos corpos opacos:

Será porque as partículas que os compõem são moles, ou seja, porque essas partículas, sendo compostas por outras menores, são capazes de mudar de forma recebendo a colisão das partículas etéreas, amortecendo o seu movimento e impedindo assim a continuação das ondas de luz? Tal não pode ser. Pois se as partículas dos metais são moles, como é que a prata polida e o mercúrio refletem tão fortemente a luz? O que encontro de mais verossímil sobre isso é dizer que os corpos dos metais, que são quase os únicos verdadeiramente opacos, possuem partículas moles entremeadas com as duras, de modo que umas servem para causar a reflexão, e as outras para impedir a transparência. (p. 32)

Shapiro (1973, p. 221) classifica essa explicação de “vaga e inadequada”. Isso porque o modelo de Huygens para um fluido era cru e, diferentemente do que fez Newton no *Principia*, não admitiu qualquer variação nem da densidade nem da elasticidade do éter.

Na verdade, essa propriedade da luz só vai ser modelada de maneira mais satisfatória a partir de Fresnel que, ao desenvolver uma descrição mecânica para as oscilações transversais do éter, chega às fórmulas – hoje famosas – da amplitude da luz refletida e transmitida em função da amplitude da luz incidente. Vale notar que nos livros didáticos atuais (Hecht, 2002) tais fórmulas – que adotam o nome de Fresnel – surgem da consideração de que a luz é uma onda eletromagnética, o que torna invisível sua origem histórica.

## Refração

---

<sup>21</sup> Muito provavelmente ele está se referindo aos turbilhões de Descartes.

Para dar conta da refração, Huygens se vale da suposição – feita anteriormente – de que a luz, vinda do ar, diminui sua velocidade ao atravessar um corpo transparente. Como se verá mais adiante, essa é uma exigência que permite a adequação de sua construção geométrica ao fato de que a luz refratada se aproxima da normal. Huygens supõe uma superfície plana  $AB$  (figura 6) que limita os corpos transparentes. Faz a ressalva de que com o qualificativo “plana” ele está entendendo o mesmo que foi dito para a reflexão. Como na reflexão,  $AC$  representa uma parte da onda de luz cujo centro se encontra no infinito. E prossegue:

O ponto  $C$  da onda  $AC$ , em um certo espaço de tempo, terá avançado até o plano  $AB$  no ponto  $B$ , seguindo a reta  $CB$  {...}. Ora, ao mesmo tempo, o ponto  $A$  teria chegado a  $G$  pela reta  $AG$ , igual e paralela a  $CB$ , e toda a parte da onda  $AC$  estaria em  $GB$ , se a matéria do corpo transparente transmitisse o movimento da onda tão depressa quanto o éter. Mas suponhamos que ele transmite esse movimento menos velozmente, por exemplo, de um terço. O movimento terá portanto se espalhado desde o ponto  $A$ , na matéria do corpo transparente, por uma distância igual a dois terços de  $CB$ , fazendo sua onda esférica particular, segundo o que foi dito antes {sobre a figura 4}. Essa onda é portanto representada pela circunferência  $SNR$  {...}. Se considerarmos depois os outros pontos  $H$  da onda  $AC$  aparecerá que ao mesmo tempo em que o ponto  $C$  chegou a  $B$ , eles não somente terão chegado à superfície  $AB$ , por retas  $HK$  paralelas a  $CB$ , mas além disso terão gerado, dos centros  $K$ , ondas particulares no [corpo] diáfano, representadas aqui por circunferências {...}.

Ora, todas essas circunferências possuem por tangente comum a linha reta  $BN$ , que é a mesma que do ponto  $B$  tangencia a circunferência  $SNR$  {...}.

E por isso essa linha {...} é a produção da onda  $AC$  no momento em que seu lugar  $C$  chegou a  $B$ . (p. 33-34)

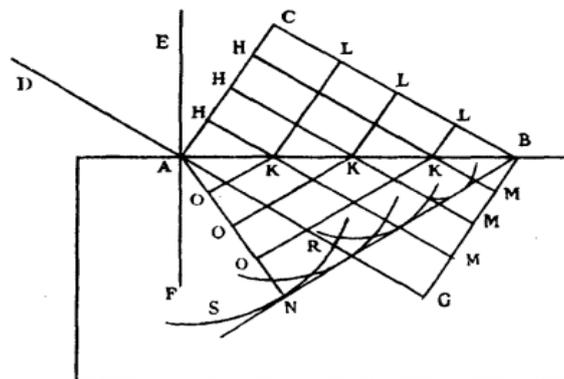


Figura 6: Desenho retirado do *Tratado* referente à refração da luz

Cabe aqui a mesma observação feita no caso da reflexão. Tal como no caso da vela, a figura 6 mostra a evolução de um pulso, representado por sua frente  $AC$ , em quatro instantes diferentes, separados por intervalos de tempo iguais. Assim, quando a frente de onda tocar a superfície em  $B$ , a onda particular formada em  $A$  quatro intervalos de tempo antes terá evoluído numa esfera de raio  $AN$  (agora dentro do material transparente) e as ondas particulares formadas nos  $Ks$  três, dois e um intervalos de tempo antes, terão evoluído em esferas de raio menor, de forma que todas as esferas terão uma tangente comum  $BN$ , que representa a frente de onda refratada. Vê-se aqui a importância da construção geométrica da figura 4 na demonstração de Huygens para a refração.

Da geometria, Huygens demonstra que há uma razão constante entre o seno do ângulo de incidência e o de refração e que “essa razão é a mesma que a velocidade das ondas no [corpo] diáfano que está para  $AE$ , para a sua velocidade no diáfano que está para  $AF$ ” (p. 34).

A seguir, ele repete a mesma demonstração para o caso da inversão do caminho da luz, o que ele denomina “reciprocidade das refrações” e chega ao caso limite da reflexão total por considerações geométricas (figura 7):

Vê-se também a razão de um notável acidente que ocorre nessa refração: após uma certa obliquidade do raio incidente  $DA$ , ele passa a não poder penetrar no outro diáfano. Se o ângulo  $DAQ$  ou  $CBA$  for tal que no triângulo  $ACB$ ,  $CB$  sendo igual a  $2/3$  de  $AB$ , ou maior, então  $NA$  não pode ser um lado do triângulo  $ABN$ , pois seria igual ou maior do que  $AB$ . Assim, a parte da onda  $BN$  não se encontra em parte nenhuma, nem conseqüentemente  $NA$ , que lhe deveria ser perpendicular. (p. 36)

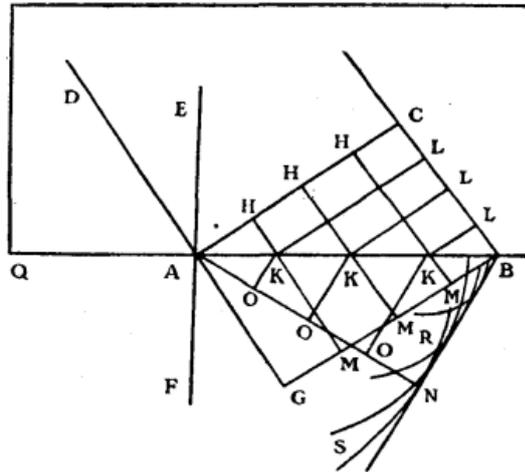
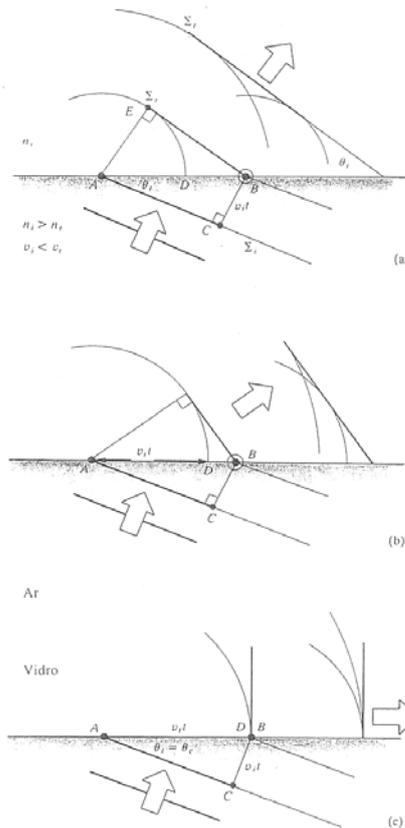


Figura 7: Desenho retirado do *Tratado* referente à refração da luz

E, então, se pergunta: “já que o encontro da onda  $AC$  contra a superfície  $AB$  deve produzir movimento na matéria que está do outro lado, por que não passa luz alguma?” (p. 36). A resposta apela mais uma vez para sua construção geométrica:

Embora seja gerada uma infinidade de ondas particulares na matéria que está do outro lado de  $AB$ , essas ondas não possuem uma linha tangente comum (seja reta ou curva) em um mesmo instante, e assim não há uma linha que limite a propagação da onda  $AC$  além do plano  $AB$ , nem onde o momento se concentre uma quantidade suficientemente grande para produzir luz. Ver-se-á facilmente a verdade disso – ou seja, que se  $CB$  for maior do que os  $2/3$  de  $AB$ , as ondas excitadas além do plano  $AB$  não terão tangente comum se dos centros  $K$  se traçarem círculos cujos raios sejam iguais aos  $2/3$  dos  $LB$  que lhes correspondem. Pois todos esses círculos estarão encerrados uns dentro dos outros e passarão todos além do ponto  $B$ . (p. 36)

Comparemos tais explicações – que se referem a uma figura hipotética – com as que se depreende de figura 8, presente em Hecht (2002, p. 158), que mostra a situação de reflexão interna total como caso limite de duas situações anteriores.



**Figura 8: Desenho retirado de Hecht**

Diferentemente do que Huygens afirma, pode-se ver em (c) que há uma linha tangente comum, não estando os círculos “encerrados uns dentro dos outros”, círculos que passarão todos pelo ponto  $B$  da figura 7. Talvez essa falha geométrica de Huygens tenha a ver com resultados experimentais que mostram baixa de intensidade luminosa no caso limite da refração. Hoje em dia esse enfraquecimento da luz é conhecida como onda evanescente (Fowles, 1975).

Como forma de persuasão, Huygens termina o capítulo dedicado à refração apresentando uma demonstração disponível desde 1661, cujo resultado concorda com o seu, a demonstração do mínimo tempo de Fermat.

## HUYGENS E O ENSINO

No que se refere ao ensino, pode-se dizer que muitas vezes as propriedades da luz tratadas por Huygens aparecem sem que se mencione um modelo para ela. Outras vezes não é dada ênfase ao modelo adotado explicitamente. Ao serem abordadas apenas geometricamente, na ausência de seu caráter físico, as propriedades relativas à propagação da luz passam a ser tomadas simplesmente como Princípios (da propagação retilínea, da reversibilidade e da independência dos raios de luz, como em Gaspar, 2001), o que afasta qualquer problematização que poderia propiciar a modelagem da luz. A visão, quando é tratada, não chega a ser considerada do ponto de vista da interação entre luz e matéria (apenas se diz que os cones são sensíveis à detecção de uma faixa de frequência do espectro visível). A diferença entre corpos transparentes e opacos não é sequer mencionada. A reflexão é tomada como um resultado empírico, sendo a sua forma regular, tanto como a difusa, representada por desenho geométrico. O caso da refração é uma exceção: além da empiria, se impõe, por conta da associação do índice de refração com a velocidade de propagação da luz, a adoção do modelo ondulatório para a luz. Mas a referência a esse modelo é em geral fugaz, se comparada com a quantidade de desenhos

que geometrizam a luz. Acresce-se a isso o fato de que a simplificação geométrica que adota raios para representar a luz pode levar o leitor a imaginá-la segundo o modelo de partícula, mesmo quando se tenha adotado explicitamente o modelo ondulatório. Nosso intuito é, a partir da leitura de Huygens, colocar um pouco mais de física nos cursos introdutórios de Óptica. Com vistas a abordagens didáticas inovadoras com recurso à dicotomia luz-onda e luz-partícula, localizada no reduto de uma controvérsia histórica, estamos propondo que o ensino enfoque propriedades da luz retiradas do *Tratado*.

Se tivermos em mente tais abordagens didáticas, é interessante explorar, conferindo potencialidades e apontando limitações, o som e o berço de Newton como analogias para tratar inicialmente a luz – uma onda eletromagnética transversal – como uma onda mecânica longitudinal, e assim considerar os aspectos apontados por Huygens: produção, meio e forma de propagação. Pode-se, a partir daí, explorar os modelos ondulatório e corpuscular para explicar outras propriedades da luz. A **constância da velocidade** e a **propagação para frente** são facilmente explicadas pelo modelo corpuscular. A **velocidade extrema** da luz, que poderia causar certo desconforto na perspectiva do modelo corpuscular, já que não há partícula que atinja tal velocidade, não é problema na perspectiva ondulatória: “não se trata do transporte de um corpo com tal velocidade, mas de um movimento sucessivo que passa de uns (corpos) aos outros” (p. 14). A velocidade é extrema **mas não infinita**, uma vez que o “progresso do movimento [através das bolas no berço de Newton] não é instantâneo, mas sucessivo, e que assim ele necessita tempo” (p. 18). É fácil ver que a **independência das ondas de luz** não poderia ser explicada pelo modelo corpusculista, enquanto que a experiência proposta por Huygens com as bolas do berço é muito convincente.

No ensino, a **propagação a grandes distâncias** nem sequer é comentada e a **propagação retilínea** às vezes é tida como um Princípio de propagação da luz. Advogamos em defesa da inclusão de tais propriedades no rol das que devem ser enfrentadas pelo modelo ondulatório da luz. Como já amplamente discutido, enquanto as explicações do modelo corpuscular são nada problemáticas, não se pode dizer o mesmo das explicações do modelo ondulatório via geometrização de Huygens. Evitando a explicação contra-intuitiva dele e apelando para a já citada demonstração de Shapiro é possível se questionar o que é tido – ainda atualmente por muitos – como “verdade da experiência”: a propagação retilínea da luz.

As propriedades até aqui citadas têm a ver com a propagação da luz e, portanto, segundo Huygens, com a caracterização de um modelo para a interação entre as partículas que compõem o éter. Diferentemente, a reflexão e a refração dizem respeito a um modelo para a interação da luz com a matéria (a visão, embora tratada de forma superficial, também se inclui aí). No entanto, essa interação é deixada de lado – tal como nas duas últimas propriedades – no caso das leis de reflexão e de refração, uma vez que elas são tratadas via geometrização. Mas volta à baila no caso da distinção entre a reflexão regular e a difusa, quando são apresentadas considerações microscópicas acerca do polimento da superfície dos corpos, e, no caso da explicação da transparência e opacidade dos corpos, quando aparecem considerações sobre a possibilidade de penetração das partículas do éter na matéria e sobre a própria constituição da matéria. O que se pode perguntar é em que medida vale a pena a didatização desses modelos.

No caso da **reflexão regular e difusa**, mostramos que elas só podem ser plenamente diferenciadas se for considerado um modelo ondulatório para a luz ao qual se associe o conceito de comprimento de onda, coisa que Huygens não fez. Note-se, no entanto, que na explicação via comprimento de onda se pôde dispensar qualquer hipótese sobre a constituição do meio de sustentação das ondas, por isso o éter ficou de fora. Isso se deve ao fato de que essa explicação transcende ao modelo ondulatório adotado: a luz pode ser tomada como uma onda mecânica longitudinal como fez Huygens ou como uma onda eletromagnética transversal como pensada a partir de Maxwell. Entendemos, pois, que a reflexão se presta, tão bem quanto a refração, à exploração didática da dicotomia luz onda/ luz partícula em cursos introdutórios de Óptica.

Coisa diferente ocorre com a **transparência e opacidade**. Para entender essa propriedade, Huygens lança mão de um modelo de interação da luz com a matéria que, como se viu, comporta três possibilidades, mas seu modelo não sobrevive. Com já apontado, essa propriedade da luz só vai ser modelada de maneira mais satisfatória a partir de Fresnel. O adiamento de sua explicação para níveis mais avançados do estudo da física, no entanto, não significa que se devam retirar referências à questão da transparência e opacidade dos corpos do reduto de cursos introdutórios de Óptica. Defendemos que perguntas sejam feitas ainda que respostas não estejam disponíveis.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Se no seu nascedouro a Óptica encontrava-se totalmente impregnada de modelos físicos, nos currículos atuais prevalece a denominada Óptica Geométrica, por conta da sobrevivência da construção geométrica, em oposição à Óptica Física. A proposta que aqui defendemos é colocar física na Óptica Geométrica. Trata-se, portanto, de abordar os fenômenos da Óptica Geométrica na perspectiva dos dois modelos mecânicos concorrentes na história da ciência: modelo corpuscular e modelo ondulatório. O modelo de Huygens é construído com base no éter luminífero. Para dar conta das várias propriedades da luz, se faz necessário explicitar as interações entre as partículas que compõem o éter e entre estas e a matéria. Mas Huygens vai além. A partir desse modelo que comporta o éter, ele inventa uma geometrização – que inclui frentes de onda, além de raios de luz próprios ao modelo corpuscular – que transcende esse modelo. E é justamente esse aspecto da obra de Huygens que já se encontra didatizada: o tratamento ondulatório/ geométrico da reflexão e da refração da luz, que inclui o que hoje é conhecido como Princípio de Huygens. Queremos mais. Queremos resgatar as explicações de Huygens que recorram ao éter. Defendemos a inclusão didática do éter, eliminado paulatinamente a partir de Einstein por sucessivas transposições didáticas pelas quais passou a Óptica. Entendemos que, dessa forma, é possível compreender/vivenciar a profunda mudança proposta por Einstein: emancipar o conceito de campo da necessidade de um substrato material, isto é, o campo eletromagnético não pode mais ser considerado como um estado desse substrato material, da mesma forma que uma onda mecânica é considerada um estado da matéria; “campo passou a ser um *elemento irreduzível da descrição física*, irreduzível no mesmo sentido que o conceito de matéria em Newton” (Einstein, 1999, p. 123), campo torna-se uma “entidade a par com a matéria” (Nersessian, 1984).

## REFERÊNCIAS

- Bodanis, D. *E=mc<sup>2</sup> - Uma biografia da equação que mudou o mundo e o que ela significa*. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004.
- Born, M. e Wolf, E. *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press, 1890.
- Da Silva, Marcos Correa e Krapas, Sonia. Controvérsia ação à distância/ ação mediada: abordagens didáticas para o ensino das interações físicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física* (no prelo).
- Einstein, Albert. *A teoria da relatividade especial e geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.
- Fowles, G. R. *Introduction to Modern Optics*. New York: Dover, 1975.
- Galilei, Galileu. *Duas Novas Ciências*. Rio de Janeiro: Instituto Italiano di Cultura, Nova Stella e Museu de Astronomia e Ciências Afins, 1985.

- Gaspar, A. *Onda, Óptica, Termodinâmica*. São Paulo: Editora Ática, 2000.
- Guimarães, Luiz Alberto e Fonte Boa, Marcelo. *Mecânica*. Niterói: Futura, 2001.
- Halliday, D., Resnik, R. e Krane, K. S. *Física 4*. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- Hecht, Eugene e Zaja, Alfred. *Óptica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2002.
- Huygens, Christian. Tratado sobre a luz. *Caderno de História e Filosofia da Ciência*, suplemento 4, 3-99, 1986.
- Klein, M. *Optics*. New York: John Wiley & Sons, 1970.
- Kuhn, T. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Ed. Perspectiva, 1982.
- Nersessian, N. J. *Faraday to Einstein: constructing meaning in scientific theories*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1984.
- Newton, Isac. *Óptica*. São Paulo: Edusp, 1996.
- Nussensveig, H. M. *Curso de Física Básica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2002.
- Queiroz, Glória e Krapas, Sonia. As Revoluções que não convencem: um desafio para o ensino. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, n. 8, p. 31-46, 1992.
- Shapiro, A. E. (1973) Kinematic Optics: a study of the wave theory of light in the seventeenth century. *Archive for History of Exact Sciences*, vol 11, 2/3, 1973.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Paulo Acioly Marques dos Santos pelas valiosas conversas e precisas referências bibliográficas e aos alunos da disciplina Evolução dos Conceitos da Física do Curso de Física da UFF pela paciência de discutir o trabalho ainda na sua fase de execução.