

O TRATADO SOBRE A LUZ DE HUYGENS: COMENTÁRIOS⁺

Sonia Krapas

Programa de Pós-graduação em Educação – UFF
Niterói – RJ

Glória Regina Pessôa Campello Queiroz

Departamento de Física – UERJ
Rio de Janeiro – RJ

Diego Uzêda

Instituto de Ciências e Tecnologia Maria Thereza – FAMATH
Niterói – RJ

Resumo

Huygens é conhecido no ensino introdutório de Física por dar conta da refração segundo um modelo ondulatório. Livros didáticos lhe rendem homenagens atribuindo seu nome a um princípio, mas em sua obra máxima, Tratado sobre a luz, é possível se ver muito mais: sua inventividade na defesa de um modelo ondulatório para a luz como alternativo ao modelo corpuscular. Neste trabalho, tenta-se evidenciar o raciocínio de Huygens, mostrando que, apesar de ter sido publicada há mais de trezentos anos, a obra está escrita numa linguagem relativamente acessível.

Palavras-chave: Tratado sobre a luz. Huygens. Modelo ondulatório.

⁺ The Huygens' treatise on light: comments

^{*} *Recebido: junho de 2010.
Aceito: novembro de 2010.*

Abstract

Huygens is known among Physics introductory teaching for his study on refraction through a wave model. Didactic books honor him by giving his name to a principle. But in his masterpiece, Treatise on Light, it is possible to notice much more: his inventiveness in defending an alternative wave model of light in opposition to the corpuscular model. This work attempts to highlight Huygens' reasoning, showing that, despite having been published more than three hundred years ago, the work is written in a relatively accessible language.

Keywords: *Treatise on Light. Huygens. Wave Model.*

I. Introdução

Huygens (1629-1695) é conhecido por dar conta da refração segundo um modelo ondulatório. Os livros didáticos perpetuam a homenagem que um dia lhe foi feita, atribuindo seu nome a um princípio – Princípio de Huygens. Em sua obra máxima, *Tratado sobre a luz*¹, é possível ver sua inventividade na defesa de um modelo ondulatório para a luz em oposição ao alternativo modelo corpuscular². Colocando esse modelo em funcionamento, ele dá explicações para diversas propriedades da luz conhecidas em sua época.

Espalhadas de forma dispersa, as propriedades da luz que se encontram nos três primeiros capítulos³ da obra, uma a uma, são por nós apresentadas, sendo explicitados os diversos aspectos do modelo de Huygens e adicionados comentá-

¹ A primeira publicação do *Tratado* é de 1690. No seu prefácio, Huygens informa que o comunicou em 1678 na Academia Real das Ciências de Paris (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), chegou a Huygens cerca de um ano mais tarde.

² Isso não implica que o modelo corpuscular estava plenamente aceito na época.

³ 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.

rios sempre que se fizer necessário ao entendimento do texto. Respeitando a ordem de apresentação de suas ideias, tentamos evidenciar o raciocínio desenvolvido pelo autor, mostrando que, apesar de ter sido publicada há mais de trezentos anos, a obra está escrita numa linguagem relativamente acessível. Para isso, vamos lançar mão da tradução – e dos 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.

Sem a pretensão de se constituir num artigo sobre história da ciência – que implicaria diálogos mais estreitos com outras obras relevantes da época –, este trabalho, que por vezes toma um caráter mais descritivo (transcrição de muitos de seus trechos aparecem), apresenta-se como uma forma de organização da leitura do *Tratado*. Com isso, espera-se tornar mais acessível a obra de Huygens (a tradução de Martins não é facilmente acessada).

II. O tratado de Huygens

Huygens inicia seu *Tratado* afirmando que “as demonstrações relativas à Óptica são fundamentadas sobre verdades tiradas da experiência” (p. 10)⁴, 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. Sua intenção é “dar razões mais claras e verossímeis” (p. 10) para essas verdades. O empenho de Huygens se dá, então, no sentido de considerar as várias propriedades da luz, apontando as falhas do modelo corpuscular⁵ para explicar tais propriedades e evidenciando as potencialidades do modelo ondulatório, perspectiva anteriormente desenvolvida pelo “Sr. Hook” (1635-1703) e pelo “Pe. Pardies” (1636-1673) (p. 22).

⁴ Com o intuito de facilitar sua localização no *Tratado*, trechos são identificados com o número da página da qual foram retirados.

⁵ É possível que o modelo corpuscular ao qual ele se contraponha seja o de Descartes (1596-1650), dada a recorrente referência ao “Sr. Des Cartes”. A exploração desse modelo na refração encontra-se em nota de rodapé na tradução da Óptica (1996, p. 85-6) de Newton feita por André Koch Torres Assis.

II.1 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]⁶ se atravessam uns aos outros sem se atrapalharem” (p. 12) –, tratadas mais adiante, levam-no 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 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

⁶ 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.

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 periódicas⁷ :

Como as percussões no centro dessas ondas não possuem uma sequência 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).



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

Nessa figura, os círculos concêntricos não representam, tal como hoje poderiam ser entendidos, uma onda periódica com a distância entre eles denotando o comprimento de onda, mas indicam “o progresso de uma mesma onda em tempos iguais”.

⁷ Martins (HUYGENS, 1996, 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 Huygens nega explicitamente a periodicidade das ondas de luz por conta da analogia com o som (nem todo som é periódico), mas suspeita que ele “reconheceu que sua teoria se aplicava igualmente a pulsos e ondas periódicas”; e considera que “a admissão da periodicidade seria uma restrição não justificada a sua teoria” (SHAPIRO, 1973, p. 222).

O **meio de sustentação** da onda, no caso do som, é o ar; no caso da luz ele recorre à “matéria etérea” (p. 17), usando como argumento os resultados de experiências de Boyle (1627-1691) e de Torricelli (1605-1647) 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 o modelo de propagação do som no ar, 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 “do movimento” através de esferas rígidas no que hoje é conhecido como “berço de Newton”⁸, isto é, com a propagação de uma onda mecânica longitudinal num meio sólido.

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 dos corpos. Ao mesmo tempo, seu modelo para a luz vai sendo detalhado.

II.2 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 (1564-1642) em *Duas Novas Ciências* (GALILEU, 1985, p. 44), embora este 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 examina, 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

⁸ Presente em centros de ciência e muitas vezes usado como objeto de decoração, esse aparato experimental é composto por pêndulos suspensos idênticos e contíguos. Apesar da referência a Newton, trata-se de uma criação supostamente da segunda metade do século XX.

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) (1644-1710) – sobre a obtenção da velocidade da luz através de medidas de posição de um satélite de Júpiter⁹ –, que ele apresenta em detalhe¹⁰. 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, 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 re-

⁹ Para maiores esclarecimentos, ver Bodanis (2004).

¹⁰ Shapiro (1973, p. 218-9) discute a importância que Huygens atribui a Romer na construção do *Tratado*.

*dondas, maiores ou menores, conforme o golpe fosse forte ou fraco. Isso mostra que essas matérias cedem em seu encontro, e se restituem, sendo para isso necessário que elas gastem tempo*¹¹ (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.

II.3 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).

Na linguagem atual, há conservação da energia cinética, uma vez que o choque é perfeitamente elástico.

Shapiro (1973, p. 220) destaca que Huygens reconheceu corretamente que a velocidade de propagação de um pulso é função da elasticidade do meio e julga ainda mais importante 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).

¹¹ 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.

II.4 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). Por isso, ele arranja as bolas como na Fig. 2, sobre a qual 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).

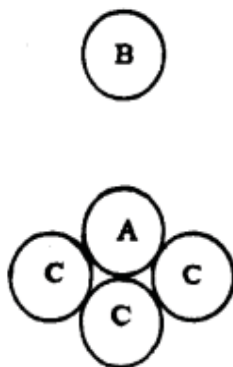


Fig. 2: Desenho retirado do Tratado: choque entre bolas que representam partículas do éter luminífero.

No choque de B contra A, apenas as bolas CCC se movimentam – para frente –, enquanto A e B se mantêm imóveis. Com isso, fica garantido que a luz não volta.

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.

II.5 Independência das ondas de luz¹²

A independência das ondas de luz é deveras importante para Huygens, sendo enfocada 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 atravessasse 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: ao se chocarem, os corpúsculos não manteriam sua trajetória. No caso do modelo ondulatório, o “berço de Newton” é acionado (Fig. 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)

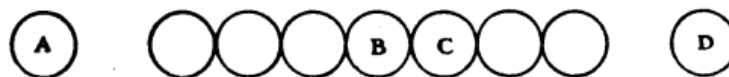


Fig. 3: Desenho retirado do *Tratado*: choque simultâneo de A e D contra sequência de bolas contíguas.

¹² Conhecido hoje como Princípio da Superposição.

Com engenhosidade, Huygens explora o “berço de Newton”: duas bolas largadas simultaneamente simulam dois raios de luz que se cruzam, sem interferirem um no outro. O “movimento” – energia, na linguagem atual – da bola D chega à bola A ao mesmo tempo em que o da bola A chega à bola D, ambos passando através de B e C.

II.6 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 (1571-1630) em 1609 – e que, nos dias atuais, poderia ser identificado 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. 22). Segundo, ele pondera 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 frequente 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 ponderação tendo em mente a situação representada na Fig. 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

bolas C próximas a ela. Huygens não o fez, mas, poderíamos imaginar mais duas bolas C 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 geométrica¹³ (Fig. 4). 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 particular¹⁴ 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 se 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).

¹³ Ao longo do texto, usaremos o termo *construção geométrica* para aquilo que veio a ser didatizado como Princípio de Huygens. Com pequenas variações, esse 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).

¹⁴ 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; WOLF, 1890; KLEIN, 1970) é usado o termo *wavelet*; em traduções do inglês para o português, pode-se encontrar *ondícula* (HEWEET, 2002) e *ôndulas* (HECHT, 1998).

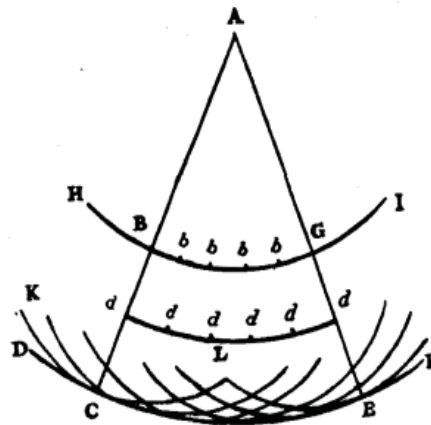


Fig. 4: Desenho retirado do Tratado: ondas – principal e particulares – emanadas do ponto luminoso A que se encontra no interior do corpo opaco BAG com abertura BG.

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* ou *frente de 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, tocar-se-ão, 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 ao se referir a uma chegada “no mesmo momento”, e sim que eram equivalentes as duas formas de interpretar a chegada de uma onda.

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 semicircunferência. Aliás, é para isso que Fresnel (1788-1827) atenta, mais de um século depois, quando introduz 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 (NUSSENS-VEIG, 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”. Assim, o construto teórico que é a envoltória pode resultar em alguns mal entendidos. Ele pode ser usado para representar um pulso de onda, mas isso não significa que a energia do pulso se encontra apenas aí localizada. Quando se leva em conta 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-Fresnel¹⁵ – é possível ver que a energia se distribui em torno da envoltória.

Dito de outra maneira, Shapiro afirma que:

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 reivindicava, 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 Fig. 4, ele evidencia que, no mesmo instante em que a luz que sai de *A* forma a frente de onda

¹⁵ 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).

DCF, um número infinito de ondas secundárias também concorrem em qualquer outro ponto (SHAPIRO, 1973, p. 225-6).

Fica, então, a pergunta – respondida a seguir: Por que Huygens não teria chegado a desenvolver tal demonstração ou, no mínimo, não raciocinou de forma intuitiva?

II.7 Propagação retilínea

Para explicar a propagação retilínea, Huygens apela para a geometrização referida à Fig. 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, propagar-se-á 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 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 Fig. 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, provavelmente, na tentativa de Huygens de explicar a propagação retilínea da luz. Este era, talvez, o seu maior desafio. Afinal, sendo onda, a luz deveria “virar a esquina”, tal como o faz o som¹⁶. 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 conhecida¹⁷. Respondida está a pergunta deixada em aberto na seção anterior: vi-

¹⁶ 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.

¹⁷ Martins (HUYGENS, 1986, nota 14, p. 24) e Shapiro (1973) informam que Grimaldi (1618-1663) fez experiências sobre esse fenômeno em 1665. Ainda segundo Shapiro, em

sando à explicação da propagação retilínea da luz, Huygens não poderia pensar intuitivamente, muito menos desenvolver a demonstração apresentada por Shapiro.

Consideração contraintuitiva da mesma natureza também pode ter levado 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.

II.8 Reflexão

O capítulo sobre reflexão inicia com a descrição da Fig. 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:

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

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).

igual a CB , produzindo sua onda esférica particular, segundo o que foi dito acima {sobre a Fig. 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).

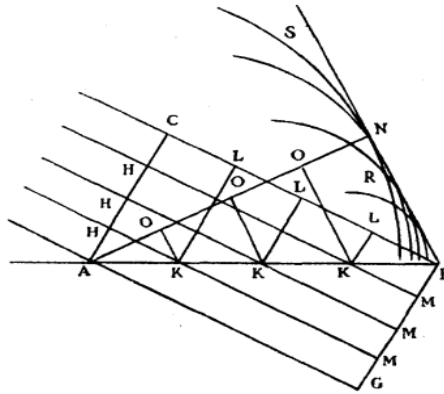


Fig. 5: Desenho retirado do Tratado referente à reflexão.

Tal como no caso da vela, a Fig. 5 mostra a evolução de um pulso, representado por sua frente AC , em quatro instantes diferentes, separados por intervalos de tempo iguais¹⁸. 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 três, dois e um intervalos de tempo antes, terão evoluído em esferas de raio menor, de forma que todas as esfe-

¹⁸ 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, a distância entre duas frentes de onda representa o comprimento de onda de uma onda periódica.

ras 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 . Vê-se, aqui, a importância da construção geométrica da Fig. 4 na demonstração de Huygens para a reflexão.

Através de manipulações geométricas, Huygens obtém a igualdade entre os ângulos de incidência e de reflexão.

II.9 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 deve ser composta pelas partículas da matéria do corpo refletor colocadas próximas umas das outras” (p. 28). O mesmo não ocorre com a explicação corpusculista. Sendo as “partículas da matéria do corpo refletor maiores do que as da matéria etérea”¹⁹ (p. 28), condição necessária para explicar a penetração da luz nos corpos transparentes, “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 especular²⁰. Na perspectiva ondulatória ele não vê essa dificuldade:

¹⁹ 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.

²⁰ É interessante ver como Newton (1643-1727) estava sintonizado com essa problemática. Na Proposição 8 do Livro III, Parte 3 da Óptica, cujo enunciado é “A causa da reflexão não é o choque da luz com as partes sólidas ou impenetráveis dos corpos, como geralmente se acredita” (NEWTON, 1996, p. 199), ele afirma:

“... 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, poteia ou tripole, 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, como 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 os desgastes da superfície se

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”²¹. 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 Newton²², que, tentando fugir de críticas, tais como a apontada por Huygens, imagina 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

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” (NEWTON, 1996, p. 201).

²¹ Não se pode deixar de notar aqui um anúncio da teoria da dispersão. Elaborada por Rayleigh (1842-1919) em 1871, essa teoria trata a dispersão da luz solar em termos de osciladores moleculares muito antes do advento da Mecânica Quântica. Segundo Hecht, os processos de reflexão e refração “são manifestações macroscópicas dos processos de dispersão que ocorrem a nível submicroscópico” (HECHT, 2002, p. 115).

²² Embora não restem dúvidas de que Huygens era partidário da teoria ondulatória, vale notar que há controvérsia acerca da posição de Newton em relação ao modelo corpuscular. Na apresentação da tradução da Óptica (NEWTON, 1996, p. 24-26), Assis afirma que “apesar de Newton aceitar a existência de um éter e de suas vibrações, e da conexão éter-luz-matéria, a luz seria distinta dessas vibrações do éter” e chega a apontar três fontes principais da crença de Newton no modelo corpuscular: o atomismo existente na época, a propagação retilínea da luz e a invariância das propriedades da luz. Para Silva (2009), os autores que defendem que não é possível afirmar que Newton tenha tomado partido por uma dessas teorias geralmente se remetem a Young. Os textos desse autor, no entanto, podem ser vistos como uma reconstrução tendenciosa da Óptica de Newton com vistas a obter apoio à sua própria teoria.

sobre o raio sem contato imediato”, isto é, “as partes do corpo agem sobre a luz a distância” (NEWTON, 1996, p. 201).

Falta à geometrização de Huygens a compreensão daquilo que apenas mais tarde viria: a interação luz-matéria, do ponto de vista quantitativo, isto é, as imperfeições da superfície não serão “vistas” pela luz quando o tamanho delas for muito menor do que o comprimento de onda da luz incidente.

Da mesma forma, a solução de Newton também se torna eficaz quando é tratada quantitativamente: se a distância entre as partículas de luz e a superfície refletora for muito maior do que o tamanho das imperfeições dessa superfície, estas não serão “notadas” pela luz.

II.10 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 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 julga que é 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, obriga-o a concebê-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 leve em conta a “facilidade com a qual passam por eles {os sólidos} a matéria dos turbilhões do ímã e a que causa a gravidade” (p. 29)²³. Huygens, no entanto, vê problemas em aceitar que o éter não penetre nos corpos transparentes. A já citada experiência de Torricelli o 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.

²³ Muito provavelmente ele está se referindo aos turbilhões de Descartes.

Isso o faz pensar a segunda maneira de explicar a transparência como mais plausível, o que o leva 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 daqueles 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 asserção de que a luz é uma onda eletromagnética, o que torna invisível sua origem histórica.

II.11 Refração

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 (Fig. 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 Fig. 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).

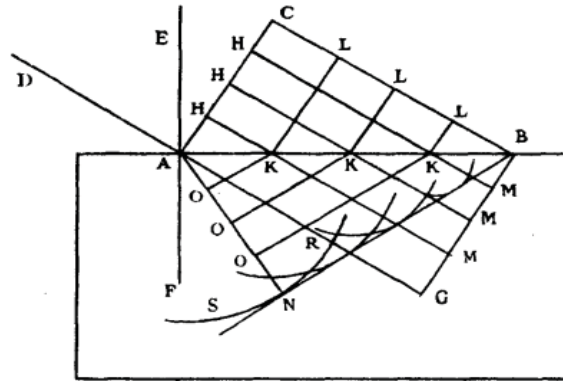


Fig. 6: Desenho retirado do Tratado referente à refração da luz.

Cabe aqui a mesma observação feita no caso da reflexão. Tal como no caso da vela, a Fig. 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 K 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 Fig. 4 também na demonstração de Huygens para a refração.

Através de considerações geométricas, 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 manipulações geométricas (Fig. 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).

E, então, pergunta-se: “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 $\frac{2}{3}$ 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 $\frac{2}{3}$ dos LB que lhes correspondem. Pois todos esses círculos estarão encerrados uns dentro dos outros e passarão todos além do ponto B (p. 36).

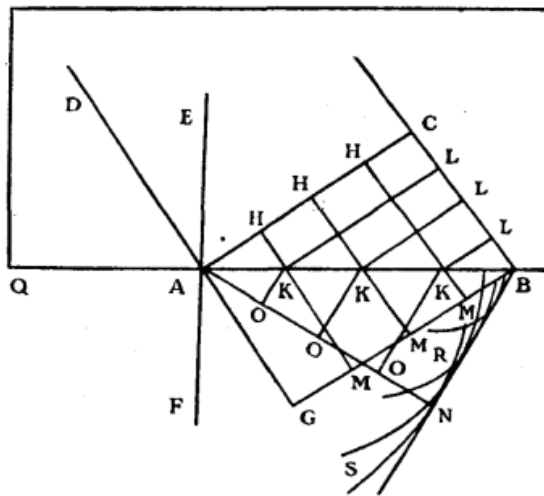


Fig. 7: Desenho retirado do Tratado referente à refração da luz com caminho inverso.

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

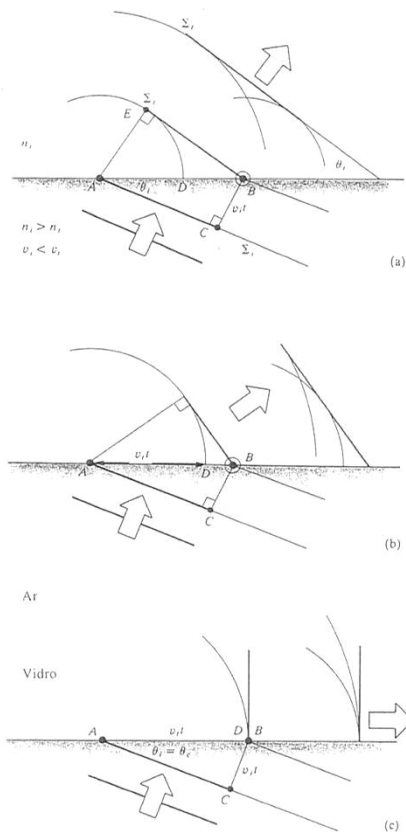


Fig. 8: Desenho retirado de Hecht.

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 Fig. 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 conhecido como onda evanescente (FOWLES, 1975).

Como forma de persuasão, Huygens termina o capítulo dedicado à refração apresentando uma demonstração disponível desde 1661, a demonstração do

mínimo tempo de Fermat (1601-1665), cujo resultado concorda com o seu e se opõe à “opinião do Sr. Des Cartes, que a luz passa mais lentamente através do vidro e da água do que através do ar” (p. 37).

III. Conclusão

Em linhas gerais, a parte do *Tratado* à qual nos dedicamos trata de mostrar as falhas do modelo corpuscular e as potencialidades do modelo ondulatório para explicar diversas propriedades da luz conhecidas na época. Nossos comentários ressaltam como essas falhas e potencialidades são exploradas por Huygens e apontam como e onde o modelo ondulatório mereceu ajustes posteriormente.

Em defesa do modelo ondulatório, Huygens lança mão da analogia entre o som e a luz. Convencido de que, com essa analogia, não conseguirá explicar certas propriedades da luz, ele recorre ao modelo das esferas rígidas, hoje conhecido como *berço de Newton*. Passa, então, a explicar uma série de propriedades da luz (velocidade extrema da luz, 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 dos corpos), ao mesmo tempo em que aperfeiçoa seu modelo, identificando propriedades para o éter: dureza, elasticidade. Mas é no explorar exaustivo do modelo de onda mecânica para a luz que Huygens se torna dele independente, associando-o à construção geométrica explicitada na Fig. 4, mais tarde didatizada como Princípio de Huygens.

Essa construção geométrica apresenta um problema – resolvido posteriormente por Fresnel ao introduzir o fator de inclinação nas equações para a descrição mecânica das oscilações transversais do éter —: considerar que a soma das ondas secundárias fora da tangente comum deva ser infinitesimal se comparada àquela da frente da onda solução. Essa consideração, ainda que contraintuitiva, provavelmente teve sua origem no esforço de Huygens para explicar a propagação retilínea da luz, “verdade tirada da experiência” compartilhada com os corpuscularistas. Felizmente, como comenta Shapiro, Huygens usará a construção geométrica apenas para determinar as frentes de onda. São elas que lhe permitirão explicar, tal como se faz até os dias atuais, a reflexão e a refração (Fig. 5 e 6). No caso das reflexões difusa e regular, Huygens aponta de forma impecável as falhas na explicação corpuscularista. Sua explicação, no entanto, também não é satisfatória. Falta à geometrização de Huygens a compreensão daquilo que apenas mais tarde viria: a interação luz-matéria do ponto de vista quantitativo. Da mesma forma, a explica-

ção sobre a transparência dos corpos e o entendimento da reflexão interna total como caso limite da refração também vieram mais tarde.

IV. Considerações finais

A história da Óptica tem sido objeto de estudos sob as mais diversas perspectivas, ainda que, pode-se afirmar, de alguma forma estejam relacionados à controvérsia sobre a natureza da luz. Os trabalhos de Bassalo (1986, 1987 e 1989) se caracterizam pela crônica, desde a antiguidade até o início do século XX. Melo e Peduzzi (2007) exploram o diálogo entre a história e a filosofia da ciência, analisando o confronto entre o modelo ondulatório e o corpuscular, sob o ponto de vista da epistemologia de Bachelard.

Mais especificamente relacionados ao trabalho de Huygens, dedicam-se Silva (2007), Araújo e Silva (2009) e Krapas (2008). Para analisar o *Tratado*, no presente trabalho, compartilhamos com esses artigos a referência – nem sempre explícita – aos conhecimentos da atualidade sedimentados nos manuais didáticos. Assim, comparações são feitas: na Fig. 1 a distância entre círculos concêntricos consecutivos não representam o comprimento de onda; a propriedade *independência das ondas de luz* é relacionada ao Princípio da Superposição; o decaimento da intensidade da luz com o inverso do quadrado da distância é entendido como conservação de energia; ondas particulares são agora denominadas secundárias; na Fig. 4 se identificam envoltórias ou frente de ondas; as Fig. 5 e 6 não devem ser confundidas com as que aparecem em livros didáticos.

Claro está que o inverso também é feito, isto é, analisar os manuais à luz do *Tratado*. Silva (2007) alerta para o fato de que “nos manuais didáticos, sugere-se que os experimentos realizados nos últimos dois séculos não fizeram mais do que contrapor os cenários apresentados por Newton e Huygens há cerca de trezentos anos”. Analisando conhecidos livros didáticos universitários para a física básica, Araújo e Silva (2009) destacam, tal como também se pôde ver no presente trabalho, que muito da compreensão atual sobre a teoria ondulatória da luz não se encontra no *Tratado*: amplitude, frequência, período e comprimento de onda são grandezas definidas posteriormente.

Krapas (2008) também se deteve na análise de livros didáticos, ainda que com objetivos diferentes: desejava-se saber se neles havia despersonalização e descontextualização, isto é, em que medida o saber que a transposição didática por eles produzida encontrava-se, tal como prevê a teoria, *necessariamente* “exilado de

suas origens e separado de sua produção histórica na esfera do saber sábio” (CHEVALLARD, 1998).

O presente estudo, ao expor a dimensão explicativa do modelo ondulatório frente ao modelo corpuscular através da utilização de fontes primárias, pode ser uma importante contribuição para a formação inicial e continuada de professores de física, assim, também pode ensinar a produção de trabalhos tais como os acima referidos.

Referências

ARAÚJO, S. M.; SILVA, F. W. O. A teoria ondulatória de Huygens em livros didáticos para cursos superiores. **Ciência e Educação**, v. 15, n. 2, p. 323-41, 2009.

BASSALO, J. M. F. A crônica da Óptica Clássica (parte III: 1801-1905). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 6, n. 1, p. 37-58, 1989.

BASSALO, J. M. F. A crônica da Óptica Clássica (parte II: 1665-1801). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 3, n. 3, p. 37-58, 1987.

BASSALO, J. M. F. A crônica da Óptica Clássica (parte I: 800 a.C.-1665). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 4, n. 3, p. 37-58, 1986.

BODANIS, D. **$E=mc^2$ - Uma biografia da equação que mudou o mundo e o que ela significa**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004.

BORN, M.; WOLF, E. **Principles of Optics**. Oxford: Pergamon Press, 1890.

CHEVALLARD, Y. **La transposición didáctica**. Buenos Aires: Aique, 1998.

GALILEI, G. **Dois Novas Ciências**. Rio de Janeiro: Instituto Italiano di Cultura, Nova Stella e Museu de Astronomia e Ciências Afins, 1985.

EINSTEIN, A.; INFELD **A evolução da Física**. Rio de Janeiro: Zahar, 1976.

FOWLES, G. R. **Introduction to Modern Optics**. New York: Dover, 1975.

HALLIDAY, D.; RESNIK, R.; KRANE, K. S. **Física 4**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

HECHT, E.; ZAJA, A. **Óptica**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2002.

HUYGENS, C. Tratado sobre a luz. **Caderno de História e Filosofia da Ciência**, suplemento 4, p. 3-99, 1986.

KLEIN, M. **Optics**. New York: John Wiley & Sons, 1970.

KRAPAS, S. El tratado sobre la luz de Huygens y su transposición didáctica en la enseñanza introductoria de óptica. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 21, p. 49-60, 2008.

MELO, A. C. S.; PEDUZZI, L. O. Q. Contribuições da epistemologia Bachelardiana no estudo da história da óptica. **Ciência e Educação**, v. 13, n. 1, p. 99-126, 2007.

NEWTON, I. **Óptica**. São Paulo: Edusp, 1996.

NUSSENSVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. Ótica, Relatividade, Física Quântica. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2002.

SHAPIRO, A. E. Kinematic Optics: a study of the wave theory of light in the seventeenth century. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 11, p. 2-3, 1973.

SILVA, F. W. O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 151-61, 2007.

SILVA, F. W. O. A teoria da luz de Newton nos textos de Young. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, p. 1601-1608, 2009.