

**TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DO MODELO DE HUYGENS:
RECONSTRUÇÕES DAS IDÉIAS ORIGINALMENTE PROPOSTAS NO
‘TRATADO DA LUZ’
(DIDACTIC TRANSPOSITION OF THE HUYGENS’ PRINCIPLE:
RECONSTRUCTIONS OF THE IDEAS ORIGINALLY PROPOSALS IN
‘TREATED TO THE LUZ’)**

**Ana Carolina Staub de Melo¹
Frederico Firmo de Souza Cruz²**

¹ UFSC/Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, anacarolina2512@yahoo.com.br

² UFSC/ Departamento de Física/ Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica,
fred@fsc.ufsc.br

Resumo

A fim de evidenciar uma possível intencionalidade didática nas reconstruções históricas do ‘Princípio de Huygens’, na física escolar, analisamos alguns livros didáticos do ensino superior. Exploramos a fragilidade da distorção histórica do modelo de Huygens para uma aprendizagem efetiva dos conceitos físicos presentes nos fenômenos ondulatórios. Em particular, porque essa abordagem é insuficiente para problematizar os equívocos dos estudantes quanto ao papel do meio na propagação das ondas mecânicas e suas idéias confusas de superposição de ondas. Expomos, então, os possíveis potenciais didáticos do modelo de ondas mecânicas originalmente proposto por Huygens para este fim.

Palavras-chave: Transposição didática; modelo de Huygens; intencionalidade didática.

Abstract

With the aim to evidence a possible didactic intent in the historical reconstructions of the Huygens’ Principle in the physics of the school, we analyze some university textbooks. We explore the fragility of the historical distortion of the model of Huygens for a learning accomplishes of the physical concepts presents in the waves phenomena. In particular, because this approach is insufficient to treat the conceptual mistakes from the students in understanding the role of the medium in mechanical wave propagation and their confused ideas in the case of wave superposition. We suggest some didactic contributions of the Huygens’ Principle to this purpose.

Keywords: Didactic transposition; model of Huygens; didactic intent.

A TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DO MODELO DE HUYGENS: RECONSTRUÇÕES E RESIGNIFICAÇÕES DAS IDÉIAS ORIGINALMENTE PROPOSTAS NO ‘TRATADO DA LUZ’

Os raros episódios históricos da ciência presentes nos textos didáticos (de distintos níveis de ensino) expõem uma dura realidade criticada de modo intenso pela literatura especializada (MELO; SOUZA CRUZ, 2008; SILVA, 2007; KRAPAS, 2007; PAGLIARINI, 2007). Traduzem, por assim dizer, a relativa ausência da contextualização histórica na física escolar ou, as graves ‘distorções’ quando, por vezes, se evidencia sua presença. As reconstruções históricas, pelo menos na forma como priorizada nos textos escolares e de divulgação científica, apresentando sucessivos erros, equívocos ou mesmo as extensas lacunas de natureza histórica,

são objeto de oposição no contexto de pesquisadores em educação científica (PEREIRA; AMADOR, 2007; MARTINS, 1998a; MARTINS, 1998b).

Contudo, os resultados dessas pesquisas, com pouca frequência, buscam a intencionalidade didática, explícita ou implícita, de origem histórica ou não, de tais abordagens, para então questioná-las. Em um sentido limite, parecem sugerir um ideal para a abordagem histórica da ciência no contexto escolar, ou seja, que é possível não resignificá-la quando sujeita ao movimento de transposição didática (CHEVALLARD, 2005). No entanto, caracteriza-se uma crença ingênua e passível de críticas imaginar que um episódio histórico pode ser contado na física escolar, adequado a um tempo didático, sem descontextualizar, dessincretizar e despersonalizá-lo, mesmo que parcialmente. O que, de fato, merece uma apreciação crítica detalhada, neste contexto, é a ausência de clareza ou, a insuficiência, da intencionalidade didática buscada pelos textos de ensino com a descaracterização histórica dos conteúdos escolares.

Na transposição didática tradicional (CHEVALLARD, 2005) a ênfase está no contexto de justificação. Prioriza-se a síntese científica final, suprimindo o processo de conceituação da ciência. Assim, as condições históricas de produção do modelo científico são silenciadas, ocultando seu contexto de criação e o longo movimento histórico de abstração até sua versão científica atual. Nesse sentido, os textos didáticos apresentam um curso progressivo e cumulativo do conhecimento e, como conseqüência, o erro passa a ilustrar uma falta grave na construção do conhecimento. Essa abordagem didática tem implicações inclusive na visão de educação na física escolar e sua possível intencionalidade didática, consciente ou não, está de acordo com o que CHEVALLARD (2005, p.72) exprime:

“[...] a produção do erro por parte do sujeito não é um ato positivo que remeta a esquemas ou representações devidamente construídos e, até, tenazes – e que as estratégias didáticas dos docentes deveriam procurar desestabilizar e destruir. O erro (...) aparece como uma simples falta, uma lacuna do conhecimento. Por isso, o sujeito é negado [...] Mediante esta dissociação se perpetua e se legitima retroativamente a negação do sujeito como produtor de sentido [...]” (CHEVALLARD, 2005, p. 72).

Defender a aquisição do conhecimento como um movimento linear, sem desvios, que nega as falhas e a natureza não neutra do sujeito (onde o estudante não significa e resignifica seus conceitos, mas os recebe prontos) é, no mínimo, problemático. A aprendizagem não se caracteriza como um processo regular, extremamente lógico e sem erros, mas como um contínuo movimento de conceitualização. Esse tipo de exposição dos conteúdos científicos representa um forte obstáculo à educação científica. E, como veremos no presente trabalho, é insuficiente para explorar, por exemplo, alguns fenômenos ondulatórios em termos didáticos. As dificuldades dos estudantes quanto ao papel do meio e da fonte na propagação de uma onda mecânica exemplificam a insuficiência da intencionalidade didática tradicional. A história do modelo científico de Huygens apresenta potenciais didáticos para explorar essas dificuldades.

Na física escolar, as contribuições científicas de Christiaan Huygens, no século XVII, evidenciam um exemplo expressivo de reconstrução didática dos fatos históricos. Esta abordagem, priorizada ao se explorar o ‘Princípio de Huygens’ na educação científica, reconstrói as idéias deste cientista em termos de uma interpretação ondulatória atual. Com relativa frequência, o ‘Princípio de Huygens’ agrega, neste contexto, a idéia de superposição de ondas em um modelo de ondas periódicas, por oposição à versão originalmente proposta por Huygens em seu ‘Tratado da Luz’ de 1690 (SILVA, 2007; KRAPAS, 2007). De fato, o real pensamento de Huygens expõe uma concepção essencialmente mecânica das ondas, caracterizada pela ausência de forças e superposição, mas fundamentada em uma sólida interpretação do mecanismo de propagação das ondas (HUYGENS, 1986).

Nestes termos, a característica crucial para delinear o real modelo proposto por Huygens refere-se à ausência da idéia de interferência de ondas. Conforme Huygens, é natural pensar que as ondas se cruzam sem confusão, sem destruir umas às outras. Supõe que uma partícula de matéria pode receber diversas ondas, sucessivas ou simultâneas, provenientes de diferentes direções e, inclusive sentidos contrários, sem que se aniquilem. Ele explica este fato recorrendo à analogia com choques mecânicos, hoje conhecida como ‘berço de Newton’. Do mesmo modo, quando Huygens analisa a origem das ondas e propõe que cada ponto luminoso gera ondas das quais esse ponto caracteriza-se como um centro de emissão, destaca que “[...] as percussões nos centros dessas ondas não possuem uma seqüência regular, também não se deve imaginar que as ondas sigam umas às outras por distâncias iguais”. Logo, torna-se pertinente observar que o modelo proposto por Huygens não pressupõe ondas periódicas, a imagem formada se assemelha a pulsos independentes (HUYGENS, 1986, p. 20-21).

Com essa discussão é possível evidenciar o insucesso presente em tentativas de traduzir a visão de Huygens em termos de um modelo ondulatório atual, como o modelo de superposição de Young, ou descrever “a propagação das interações mecânicas de Huygens com o formalismo de Maxwell”, do mesmo modo que, inversamente, “traduzir a idéia de onda eletromagnética nos termos do Princípio de Huygens [descrita no Tratado]” (SILVA, 2007, p.157).

A visão ondulatória associada a Huygens no ensino de física se assemelha, em larga medida, ao modelo de Fresnel, em virtude da ênfase dada aos elementos de periodicidade e por pressupor interferência das ondas, conforme o sentido proposto por Young (CREW, 1900). Em contrapartida, a perspectiva de Huygens, esboçada na Tratado, retrata ondas não periódicas e que não apresentam interferência construtiva ou destrutiva (HUYGENS, 1986).

No contexto das pesquisas em ensino de física, embora pesquisadores como SILVA (2007) e KRAPAS (2007) explorem detalhadamente o real modelo de Huygens delineado em seu ‘Tratado da Luz’ (1690)¹, não se debruçam mais intensamente sobre o confronto entre o ‘Princípio de Huygens’, originalmente proposto, e a interpretação que de fato os livros didáticos abordam. ARAÚJO (2008) é uma exceção, por apresentar um trabalho que caminha nessa direção, mas levando em conta os livros didáticos do ensino médio. Expõe uma comparação entre o modelo genuíno delineado por Huygens, no século XVII, em seu ‘Tratado da Luz’, e a versão atualmente priorizada por livros didáticos de Física no contexto do ensino médio. Como resultados da pesquisa afirma que “[...] as informações veiculadas nesses livros não são fiéis à proposta inicial do modelo, ora omitindo elementos, ora incorporando contribuições de outros autores, e conduzem a uma visão inadequada da evolução histórica dessa teoria.” Conclui afirmando que “[...] a contribuição de Huygens deve ser compreendida no contexto de sua época.” Esta pesquisa contribui para evidenciar as resignificações dos fatos históricos, no contexto do modelo de Huygens, nos textos didáticos de física. Contudo, não busca a essência dessa distorção histórica, ou seja, a presença ou não de uma intencionalidade didática que fundamente a reconstrução do modelo de Huygens.

Por outro lado, é fato conhecido que os textos destinados ao ensino médio são fruto de constantes simplificações dos compêndios universitários. **Então, com base nisso, resgatamos alguns livros-texto do ensino superior a fim de evidenciar a presença ou não de uma intencionalidade didática que justifique a resignificação do modelo de Huygens na física escolar.** Buscamos uma possível gênese dessas reconstruções didáticas que distorcem o significado físico do ‘Princípio de Huygens’ ao silenciar as origens e o contexto histórico do ‘Tratado da Luz’ escrito por este cientista. Em particular, por priorizar uma história anacrônica, ou seja, que reconstrói as idéias, as sínteses científicas, em termos do presente.

Recorrendo à afirmação de ARAÚJO (2008) “[...] a contribuição de Huygens deve ser compreendida no contexto de sua época.”, acima destacada, problematizamos essa frase,

¹ Priorizando como fonte histórica a versão do ‘Traité de la Lumière’ (1690) traduzido por Roberto de Andrade Martins, presente nos Cadernos de História e Filosofia da Ciência, uma publicação da UNICAMP (HUYGENS, 1986).

convertendo-a em uma interrogativa: **Porque a contribuição de Huygens deve ser compreendida no contexto de sua época na física escolar?** Antes de apresentar as razões ou, os possíveis potenciais, para a abordagem histórica do modelo de Huygens no contexto educativo, ponderamos questões essenciais da utilização didática da história da ciência. Será que é possível ser fiel e sempre preservar uma tradução literal da história da física quando nos deparamos com sua transposição didática? Esse ponto que queremos questionar.

As distorções históricas, muitas vezes, não são fruto de uma visão ingênua, mas cumprem uma função didática. E as pesquisas que sinalizam as distorções históricas, presentes nos textos escolares, no ensino médio e superior, esquecem esse viés, essa face inerente à transposição didática. Se não desconhecem, no mínimo ocultam, muitas vezes, essa dimensão inseparável, intransponível, da transposição didática, que independente da versão educacional adotada.

Mesmo nas mais completas abordagens históricas um viés sempre é priorizado. Por isso que alguns autores falam de histórias da ciência em vez de a história da ciência, justamente porque a história da ciência pode ser descrita a partir de distintas faces dependendo das intenções do autor ou mesmo do historiador (MELO, 2005, FLÔR, 2005; PESSOA JR, 1996; ZANETIC, 1989). É claro que no contexto educativo essas distorções históricas têm ganhado uma dimensão de banalização. As reconstruções didáticas simplificam as sínteses científicas e, em geral, reduzem o contexto histórico dos modelos científicos a episódios ‘caricatos’ e com sentido ‘crucial’ (MARTINS, 2006c; 2006d), muitas vezes se perdendo a própria essência ou intenção genuína da criação/reconstrução didática. A nossa análise se debruça sobre esse resgate.

Como já argüimos, não é nosso propósito justificar as resignificações (e distorções) que os livros didáticos apresentam, mas esclarecê-las para então apresentar a nossa idéia, ou seja, de que as supressões históricas ou recriações dos modelos científicos, como no caso do modelo de Huygens, são insuficientes para uma aprendizagem efetiva, significativa², dos conceitos físicos, por exemplo, os presentes nos fenômenos ondulatórios.

Então, a fim de evidenciar a presença ou não de uma intencionalidade didática das reconstruções históricas do ‘Princípio de Huygens’, na física escolar, analisamos os seguintes livros didáticos do ensino superior: “Optics” (HECH, 2002); “Curso de Física Básica” (NUSSENZVEIG, 1999); “Física IV: Óptica e Física Moderna” (YOUNG; FREEDMAN, 2003) e “Física para Cientistas e Engenheiros: Óptica e Física Moderna” (TIPLER, 1995), conforme expomos na seção seguinte.

DISTORÇÃO HISTÓRICA DO MODELO DE HUYGENS NA FÍSICA ESCOLAR: QUAL A POSSÍVEL INTENCIONALIDADE DIDÁTICA?

A distorção histórica do ‘Princípio de Huygens’, que o resignifica em termos da ondulatória atual, está presente em muitos livros textos e, de certa forma, é uma distorção, ela mesma, histórica. É que ela já havia sido apontada no prefácio do livro “The wave theory of light: Memoirs by Huygens, Young and Fresnel”, de Henry Crew, editado na coletânea de “Scientific Memoirs”, dirigida por J. S. Ames e publicado pela American Book Company em 1900. Neste prefácio, Henry Crew cita o trabalho do Professor Schuster - “Philosophical Magazine”, vol XXXi, p. 77 de 1891 - que enfatiza que atribuir a Huyghens a idéia de dividir a frente de onda numa série de Zonas (no sentido de franjas de difração) não é apenas injusto como também errôneo. Segundo Crew, este erro estava presente em praticamente todos os livros textos

² No presente artigo não buscamos explorar o tema ‘Aprendizagem Significativa’ conforme as pesquisas da Psicologia Cognitiva. Apresentamos idéias para pensar uma aprendizagem que considera as dificuldades dos estudantes no contexto de ondas mecânicas. A abordagem histórica de Huygens apresenta potenciais didáticos para explorar essas dificuldades e nesse sentido pode ser **significativa**. Em um trabalho futuro pretendemos discutir a possibilidade da história da ciência ser trabalhada como âncora aos conhecimentos prévios, ou subsunçores, dos estudantes, aí sim estreitar esse vínculo com os estudos da Psicologia Cognitiva.

da época e a primeira menção das Zonas de Huyghens como Zonas de Fresnel (que agrega a idéia de superposição de ondas proposta por Young) estaria na página 111 desse volume do “Scientific Memoirs”. É interessante observar que para se chegar a forma atual do Princípio, as perguntas e questionamentos na óptica de então eram relacionados com a existência dos raios, de franjas de difração, de polarização e de aberração. Idéias que simplesmente não apresentam contrapartida no “Tratado de Huyghens”. Nesse sentido, em busca de uma explicação matemática para os raios e a difração que Fresnel reinventa o princípio de Huyghens, dando-lhe um significado físico diferente ao incorporar a superposição que havia sido introduzida por Young.

Para além da distorção histórica, do ponto de vista da educação em ciências, é interessante analisar a intencionalidade didática dessa descaracterização. A releitura histórica, ou a criação de uma nova história, sempre presente nos processos de transposição didática, em geral cumprem uma determinada função que pode ser explicitada ou não. Tomemos por exemplo o livro “Optics” de E. Hecht (2002, p.97), na secção 4.4.2 intitulada “Princípio de Huyghens”. O autor faz uma exposição de poucas linhas sobre o trabalho de Huyghens. Apresenta a formulação original de Huyghens indicando rapidamente que a formulação era ainda ingênua e inicial e que, entre vários problemas, ela não incorporaria abertamente a superposição mas, em contrapartida, “[...] o princípio de Huyghens pode ser usado para se chegar a lei de Snell...”. Em um parágrafo posterior o autor fala que Fresnel, com sucesso introduziu a superposição na formulação de Huyghens. A seguir explicita a sua intenção didática: “É melhor não entrarmos nos detalhes físicos, tais como racionalizar a propagação no vácuo, e vamos apenas utilizar o princípio como uma ferramenta - uma ficção altamente útil que funciona”. Para além de uma crítica ao discurso histórico presente neste texto, chamamos a atenção para a frase que reduz o princípio de Huyghens-Fresnel a um mero utensílio formal para o tratamento de determinados fenômenos físicos.

Do mesmo modo que Hech (2002), podemos tomar como exemplo o livro de NUSSENZVEIG (1999), onde o princípio de Huygens é apresentado como princípio de Huygens-Fresnel. Embora o autor não mencione as diferenças entre as contribuições científicas desses cientistas, neste texto didático é, pelo menos, insinuada a resignificação promovida por Fresnel. No caso, o objetivo é de apresentá-lo como um método formal de tratar fenômenos como difração e interferência, assim como o tratamento ondulatório da reflexão e refração. Em outras palavras, este enfoque está mais próximo do programa de Fresnel do que de Huyghens.

YOUNG e FREEDMAN (2003) ao explorar ondas sugerem o ‘Princípio de Huygens’ como uma possível ferramenta, com muita frequência útil, para explicar fenômenos ondulatórios como a refração, reflexão e difração. Nesse sentido, fica clara a intencionalidade didática dos autores. Contudo, não há menção alguma à contribuição dada por Fresnel ao Princípio e, em uma breve exposição histórica, observa-se que embora os autores tenham feito uma escolha didática, realmente desconhecem o modelo genuíno de Huygens: “[...] a teoria de Maxwell apenas forneceu a base teórica para sustentar o princípio de Huygens”. A breve descrição histórica do texto insinua uma continuidade evidente entre o princípio de Huygens e as formulações de Maxwell. Contudo, há uma ruptura inegável entre as contribuições de Huygens e Maxwell e, além do mais, outros cientistas se interpõem neste percurso, resignificando o modelo de Huygens, como por exemplo Fresnel. A interpretação atual ao princípio de Huygens se deve a Fresnel que incorpora a idéia de interferência de ondas a esse modelo. Como sugerir uma descrição linear entre contribuições científicas que nascem em contextos históricos tão afastados no tempo e com bases teóricas tão distintas?

Huygens explica a luz como uma vibração mecânica que se transmite por forças de contato entre as partículas de éter. Nesse sentido, pode-se afirmar, com base em uma apreciação crítica do Tratado sobre a Luz (HUYGENS, 1986) que suas idéias apresentam uma sintonia maior com a mecânica do que com a óptica moderna ou o eletromagnetismo, evidenciando diferenças significativas com a interpretação atual de ondas. Neste contexto, não há referência

alguma a conceitos recentes como ação à distância, campo eletromagnético e outras interpretações contemporâneas que contribuem para delinear o modelo ondulatório da luz, como concebido hoje - que diverge fortemente da teoria idealizada por Huygens. Não há referência nem mesmo às características elementares das ondas, como amplitude de vibração, frequência, período ou comprimento de onda, afastando-o de uma possível articulação ao contexto científico da ondulatória moderna.

Segundo SILVA (2007, p.149), “[...] o modelo de Christian Huygens pode ser considerado uma reconstrução a posteriori (whiggismo), que impõe uma interpretação atual a conceitos enunciados no século XVII”. Quando se explora nos textos de ensino a natureza da luz, (no contexto da ondulatória) o modelo ondulatório de Huygens se reduz ao ‘Princípio de Huygens’, apresentado de modo estanque e aproblemático, em uma versão completamente distorcida historicamente.

TIPLER (1995 p.33) ao apresentar a propagação da luz assume claramente o princípio ou ‘construção’ de Huygens como um método geométrico imaginado por Huygens para descrever a propagação de qualquer onda através do espaço. Em termos históricos, não oculta a reconstrução do princípio de Huygens nos textos didáticos, contudo, considera natural diante da intencionalidade didática apresentá-lo apenas como um modelo (ou instrumento) geométrico para os fenômenos ondulatórios. Enfatiza a contribuição científica de Fresnel ao expressar o princípio de Huygens em termos da superposição de ondas (difração). “O princípio de Huygens foi mais tarde modificado por Fresnel, de modo que a nova frente de onda é calculada pela antiga frente de onda por superposição das pequenas ondas, considerando-se as amplitudes relativas e as fases”. Agrega a essa descrição a contribuição matemática de Kirchoff, “Kirchoff mostrou, bastante depois do seu enunciado original, que o princípio de Huygens-Fresnel era uma consequência da equação de onda, dando-lhe, portanto, firme fundamento matemático. Kirchoff mostrou que a intensidade das ondículas dependia do ângulo de avanço e era zero na direção para trás” (TIPLER, 1995, p.33).

A breve análise dos textos didáticos que apresentamos explicitam com clareza porque o ‘Princípio de Huygens’ é explorado em termos atuais no contexto didático. Ao modelo de Huygens se agrega as contribuições de Fresnel assumindo um papel estritamente instrumental-matemático. Com base nisso, uma ‘licença histórica’ não pode ser negada a este tipo de texto, que apresenta uma clara intenção didática? Parece em princípio que estamos inclinados a dar razão à intencionalidade didática dos textos analisados. Não! Esclarecemos apenas que, às vezes, as distorções históricas não tem gênese no senso comum, fruto do desconhecimento, mas expressam um posicionamento educacional.

Contudo, estamos em desacordo com esta intenção didática, pois os estudantes apresentam conhecimentos bastante equivocados sobre o tema ondas mecânicas, conforme exploramos na seção seguinte. E a dificuldade mais expressiva remete à idéia do meio. Os alunos apresentam confusões de distintas ordens quanto ao papel do meio na propagação das ondas. Neste sentido que o modelo genuíno de ondas mecânicas, delineado por Huygens, tem um papel didático pertinente. Como ele está fortemente vinculado à idéia do meio, que é o éter neste contexto histórico, apresentar a evolução conceitual das ondas mecânicas tendo como gênese modelos incipientes, como o de Huygens, em direção a modelos mais abstratos como os do presente, significa apresentar o processo de abstração de um conceito como o de ondas. Por contraste à intenção didática dos demais livros escolares, que simplesmente apresentam as sínteses científicas, ou seja, o modelo abstrato em sua forma final. Uma abordagem que apresenta graves problemas, pois os equívocos conceituais dos alunos insistem em se perpetuar mesmo em graus mais avançadas de ensino. Um exemplo são as concepções errôneas dos estudantes em termos dos fenômenos ondulatórios. Parece um contra-senso continuar defendendo esse tipo de ensino de física que não avança na aprendizagem dos estudantes.

OBSTÁCULOS PRESENTES NO ENSINO-APRENDIZAGEM DE ONDAS MECÂNICAS

O artigo “Making Sense of How Students Make Sense of Mechanical Waves” (WITTMANN et al, 1999) apresenta um estudo sobre a compreensão da física das ondas mecânicas entre estudantes de um curso de física da Universidade de Maryland. A pesquisa evidencia que os modelos mentais dos estudantes quanto à física das ondas e conceitos elementares de ondas apresentam equívocos e confusão quando confrontados em diferentes contextos de estudo. Os estudantes imaginam que a força exercida pela mão em uma corda, por exemplo, determina a velocidade de propagação da onda, expondo o seguinte raciocínio explicativo: quanto maior o impulso na corda, maior a sua velocidade de propagação. Os estudantes apresentam idéias confusas sobre o papel da fonte no contexto das ondas mecânicas. Julgam equivocadamente que a velocidade das ondas mecânicas é determinada pela fonte de emissão e não pelas propriedades elásticas do meio.

Embora a pesquisa não apresente uma apreciação dessa natureza é possível que além disso os alunos não percebam que a velocidade de propagação da onda é distinta da velocidade de vibração da partícula do meio deslocada de sua posição de equilíbrio pela perturbação. Essa idéia caracteriza-se bastante intuitiva e por isso deve ser explorada detalhadamente no ensino das ondas. A onda se desloca com uma velocidade ao longo da corda, enquanto o movimento da partícula é um MHS (Movimento Harmônico Simples), transversal à direção de propagação da onda, em torno da posição de equilíbrio (YOUNG; FREEDMANN, 2006, p. 237-239). A ausência de uma discussão detalhada desse tema pode mascarar a idéia de que o próprio meio não se desloca no espaço; as partículas individuais do meio oscilam em torno das respectivas posições de equilíbrio, e é a configuração global da onda que se propaga.

O artigo (WITTMANN et al, 1999) evidencia também que parte significativa dos alunos não esboçou uma idéia de superposição de ondas. Além disso, as concepções mais representativas desse grupo expressavam uma distorção no significado físico atribuído à amplitude da onda. Para os estudantes a amplitude descreve apenas o ponto de máximo deslocamento da onda, uma visão parcial à luz do sentido científico.

Modelos incorretos da superposição de ondas, decorrentes da extensão/analogia irrestrita com colisões mecânicas, também foram observados. Os alunos pesquisados imaginam a seguinte situação: Se quando dois carros de dimensões distintas, por exemplo, se movem em direção um ao outro com mesma velocidade, provocando uma colisão perfeitamente inelástica (onde os dois carros passam a se mover juntos na mesma direção do carro maior, porém com a velocidade do carro menor), o mesmo deve ocorrer com o caso das ondas. Quando duas ondas de amplitudes diferentes se cruzam a onda ‘menor’, menor amplitude, cancela a onda ‘maior’, maior amplitude, formando um pulso que se move no mesmo sentido da perturbação de maior amplitude.

No modelo mental dos alunos os pulsos de ondas são interpretados como partículas, objetos em colisão orientam o raciocínio espontâneo apresentado para explicar fenômenos ondulatórios. A propagação de uma onda é imaginada, por vezes, de modo muito semelhante ao lançamento de um objeto material. Quanto maior a energia cinética de um projétil, de massa constante, evidentemente maior sua velocidade. Do mesmo modo a propagação de um pulso é pensada: quanto maior a energia cinética da onda, permanecendo constante a amplitude, maior sua velocidade de propagação e não sua amplitude³.

O artigo “Elastic Waves: mental models and teaching/learning sequences” (TARANTINO, 2007) investiga a compreensão de estudantes do curso de Física da Universidade

³ Contudo, a energia de uma onda (ou com frequência a ‘taxa de transferência energia’ – potência média ou intensidade) é diretamente proporcional ao quadrado da amplitude e ao quadrado da frequência. A energia de uma onda mecânica determina a amplitude e a frequência da onda e não a velocidade de propagação do pulso que, ao contrário do que pensam os estudantes, é determinada pelas propriedades elásticas do meio, conforme discutido no texto anterior.

de Palermo, na Itália, quanto à natureza das ondas mecânicas. Expõe que a lacuna mais expressiva no tratamento desse tema se refere à interpretação dedicada ao papel do meio na propagação das ondas e a ausência da idéia de superposição de ondas. Reforça, portanto, o estudo detalhado anteriormente que também indica falhas desse gênero.

Neste estudo (TARANTINO, 2007), sugeriu-se aos estudantes três episódios didáticos relacionados à propagação de um pulsos/ondas em meios elásticos. A síntese das explicações que os alunos construíram exprimem suas idéias sobre o mecanismo de propagação das ondas. Os estudantes interpretam que quanto maior o impulso dado na corda, maior será a velocidade da onda. Concebem equivocadamente o papel do meio no mecanismo de propagação das ondas: imaginam que o meio oferece resistência à propagação das ondas do mesmo modo que no movimento de uma partícula. Logo, concluem que em meios mais densos as ondas mecânicas se propagam com velocidade menor. Por fim, os estudantes não apresentam nenhuma noção de como o meio se comporta ao ser perturbado, fica explícito a ausência da idéia do mecanismo de vibração do meio ao propagar o distúrbio, já que escrevem que as partículas do meio em alguns casos avançam timidamente, mas em outros se mantém estáticas.

A ruptura com a idéia de semelhança/extensão direta entre as representações de ondas e modelos mecânicos (objetos se movendo) deve ser um objetivo da física escolar. Para tanto, torna-se necessário que os alunos se desvinculem dessa imagem natural e, um possível caminho para tal propósito pode ser o estudo de caso histórico Huygens. Explorar qual o papel do meio no contexto de Huygens pode estimular a construção de um modelo de ondas mecânicas adequado. Por contraste à exposição estanque de tais temas de ensino. Acompanhar o mecanismo de modelização presente no curso histórico coloca o aluno diante da significação e resignificação das idéias e ilustra a dinâmica de abstração inerente a esse processo.

OS POTENCIAIS DIDÁTICOS DO MODELO DE HUYGENS

O PAPEL DO MEIO NA INTERPRETAÇÃO ONDULATÓRIA DE HUYGENS: MECANISMO DE RESTAURAÇÃO

No que se refere à forma de propagação, Huygens enfatiza que o som em função de sua natureza pode ser comprimido com facilidade e, à medida que reduz seu volume apresenta uma tendência a expandir-se. Logo, a causa da propagação das ondas do som compreende o esforço⁴ de expansão desses pequenos corpos que se entrecrocaram, quando estão mais próximos nos círculos das ondas (HUYGENS, 1986, p. 18). Huygens tinha clareza, com base nos conhecimentos que dispunha na época, que no caso do som tem-se um efeito combinado de sucessivas compressões e rarefações responsáveis por transferir energia entre as moléculas do ar, produzindo ondas longitudinais, nas quais as moléculas do ar se movimentam para frente e para trás recebendo energia das moléculas mais próximas da fonte e transmitindo-a para as moléculas mais afastadas dela.

É possível enfatizar que o significado físico de elasticidade atribuído ao éter⁵ no modelo de ondas mecânicas proposto por Huygens sugere semelhança com a interpretação de elasticidade do ar presente no contexto de propagação das ondas sonoras. O mecanismo de restauração de equilíbrio do ar não pressupõe a idéia de força restauradora. As moléculas de um gás estão separadas a ponto de comportarem-se de modo independente. Nesse sentido, um gás

⁴ O fato de um meio ser mais elástico, no sentido em que tem uma constante de elasticidade maior, implica que o meio reage a uma dada deformação. Em muitos casos, com propósitos didáticos essa reação à deformação ou perturbação é traduzida em termos de uma maior força restauradora. Inclusive a velocidade das ondas sonoras depende da elasticidade do meio em que se propagam.

⁵ A interpretação ondulatória de Huygens contesta o vazio absoluto e interpreta o espaço como preenchido por uma substância transparente muito mais sutil que o ar, o éter que, sem peso, não causa atrito aos corpos, indetectável por meios físicos e químicos permeia toda a matéria que existe (penetrabilidade notável). A natureza do éter apresenta singularidade por suas características elásticas ideais, imprescindíveis à conservação da velocidade da luz a grandes distâncias, exibindo, deste modo, um mecanismo eficiente de restauração de equilíbrio.

pode ser imaginado como um sistema de partículas livres caracterizado pela ausência de forças (em um gás ideal as forças são nulas)⁶. Para efeitos de análise, o ar pode ser considerado como um gás perfeito, ideal. Nestas condições, os choques entre as moléculas evidenciam-se praticamente elásticos, sem perdas apreciáveis na energia cinética. Em termos gerais, o sistema, definido pelo ar, em equilíbrio, reage diante de uma perturbação, ao ser comprimido e, opõe-se à variação de pressão (flutuação de densidade) retornando ao estado inicial, caracterizado pelo equilíbrio de pressão⁷. A elasticidade do ar caracteriza-se por esta ‘facilidade’ de movimentar-se, de ‘restituir o equilíbrio’, opondo-se à flutuação de densidade provocada pela perturbação. Esta síntese torna-se pertinente no contexto da pesquisa pois, no caso do éter, para explicar a propagação das ondas mecânicas de luz, a idéia de elasticidade, semelhante à conferida ao ar, parece estar presente na interpretação de Huygens:

“[...] a elasticidade consiste no movimento muito rápido de uma matéria sutil... Isto está de acordo com a razão que Descartes fornece para a elasticidade... há muitos corpos que possuem essa propriedade [o ar, por exemplo]; e, assim, nada há de estranho em supô-la também em pequenos corpos invisíveis como os do éter. 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... supondo a elasticidade na matéria etérea, suas partículas terão a propriedade de restituir-se igualmente depressa, seja quando forem empurradas fortemente ou fracamente. Assim o progresso da luz continuará sempre com uma velocidade igual (HUYGENS, 1986, p.19)”.

Huygens enfatiza que em virtude da extrema velocidade da luz e outras propriedades especiais que ela apresenta não é possível interpretar sua propagação de maneira similar à do som. Contudo, é possível evidenciar claramente a semelhança dos modelos mecânicos associados à propagação do som no ar⁸, conforme explicitado acima, e aquele articulado à propagação da luz por Huygens. Inclusive a recorrência a colisões mecânicas elásticas no modelo de Huygens remete a esse paralelo.

A possível extensão entre os dois modelos mecânicos apresenta um recurso didático pertinente para o ensino de física, particularmente porque além de propiciar um estudo da propagação de uma onda mecânica no ar, possibilita um contraponto com a propagação de uma onda em um sólido, por exemplo, onde os mecanismos de restauração apresentam-se em termos de forças, ao contrário de um gás, onde as forças são nulas e, nesse sentido, apresentam-se em termos de equilíbrio de pressão. Com fins didáticos essa distinção é fundamental para explorar a propagação de ondas sonoras no ar e em sólidos que, em geral, são abordados como análogos por ambos articularem a noção de forças restauradoras. No entanto, a questão da elasticidade (o mecanismo de restauração de equilíbrio) nos dois casos são distintos, no primeiro a elasticidade está associada a questão da equalização de pressão, e no segundo caso em termos de forças elásticas, explicitando a natureza distinta dos mecanismos de restauração. Por isso a natureza da elasticidade em sólidos e nos gases apresenta variação, embora esse contraste não seja abordado no contexto de ensino.

6 Um gás perfeito ou ideal é um modelo idealizado para o comportamento de um gás. Um gás perfeito obedece às seguintes leis: lei de Boyle-Mariotte, lei de Charles, lei de Gay-Lussac. Para fazer com que um gás real se comporte aproximadamente como ideal, reduz-se a pressão e eleva-se a temperatura, para que a distância entre as moléculas seja a maior possível. É importante lembrar que não existem gases perfeitos em condições normais. Para tornar um gás próximo de ser considerado perfeito, é preciso que ele esteja a **alta temperatura e baixa pressão**.

⁷ Essa característica de o ar escoar espontaneamente das pressões mais altas para mais baixas ilustra uma tendência ao equilíbrio de pressão concebida na Segunda Lei da Termodinâmica que explicita a idéia de que quando abandonamos um sistema ele tende espontaneamente ao equilíbrio com sua vizinhança.

⁸ Com frequência os textos didáticos abordam os modelos de ondas mecânicas em um gás, sólido e líquido associando-os em termos de forças restauradoras, contudo, o mecanismo de restauração de um gás deve ser analisado no sentido descrito, como resultado de equilíbrio de pressão, já que em um gás ideal, o ar no limite pode ser considerado desta forma, as forças entre as partículas são nulas.

É possível também emergir, no contexto do ‘Tratado de Huygens’, a discussão sobre a dependência da velocidade da onda em termos do meio. Quando Huygens discute a transparência dos corpos, no contexto da refração, admite que “as ondas de luz se propagam na matéria etérea que ocupa continuamente os interstícios ou poros dos corpos transparentes”. Para Huygens, um corpo mais denso significa uma densidade menor de éter (meio que propaga a onda) ocupando o espaço (interstícios ou poros) que se entremeia às partículas de matéria que o compõem. Neste caso, “[...] pode-se crer que o progresso das ondas deve ser um pouco mais lento dentro dos corpos, por causa dos pequenos desvios causados por essas mesmas partículas [as partículas de matéria que compõem o corpo]. Mostrarei que a causa da refração consiste nessa diferente velocidade da luz (HUYGENS, 1986, p. 31)”. Em Huygens já está presente a idéia de que o meio é que determina a velocidade de propagação da onda mecânica, o que torna possível explorar com os alunos o papel do meio em termos da velocidade de propagação de uma onda mecânica. As ondas mecânicas precisam de um meio para se propagar e o fazem através de pequenas oscilações das partículas que o constituem. Quanto mais denso o meio [que propaga a onda] maior será a velocidade de propagação da onda sonora. No caso de Huygens o meio é o éter. Então quanto maior a densidade de éter mais facilmente a onda mecânica se propagará. Quanto menor a densidade de éter, com mais dificuldade será a propagação da onda mecânica. Essa análise pode ser extrapolada para qualquer meio, seja o ar, um líquido ou um sólido. Embora as partículas do meio oscilem, transmitindo a vibração, elas não se deslocam acompanhando a propagação da onda.

Diante das dificuldades dos estudantes sobre o papel do meio na propagação de uma onda mecânica essa discussão apresenta expressivos potenciais didáticos para se abordar na física escolar.

AUSÊNCIA DA IDÉIA DE INTERFERÊNCIA NO MODELO ONDULATÓRIO DE HUYGENS

O problema que despertou interesse de Huygens no contexto da natureza da luz “Por que os raios de luz se cruzam sem, em nada atrapalhar uns aos outros?” pode se caracterizar como um problema de ensino que, se devidamente discutido possibilita um estudo detalhado do modelo de superposição de ondas. Com frequência, os livros didáticos abordam no contexto da óptica geométrica o fato de os raios de luz se cruzarem sem que um perturbe o outro como uma propriedade da luz e, por outro lado, quando abordam a óptica física, de forma quase mágica, a luz para a sofrer interferência, não há um diálogo entre estas duas dimensões da óptica, fato que pode se configurar fonte de confusão e equívocos entre os estudantes.

Na interpretação de Huygens, é natural pensar que as ondas se cruzam sem confusão, sem destruir umas às outras. Um exemplo simples, relativamente comum, que corrobora a idéia de Huygens, refere-se a dois feixes luminosos emitidos por duas lâmpadas, sobrepondo-se um ao outro em um anteparo. De fato, não é possível evidenciar regiões claras e escuras, fruto de superposição das ondas, não há interferência. Contudo, a história da natureza da luz, ilustra mais um exemplo símbolo das sutilezas presentes na natureza e ensina a desconfiar do real sensível, abstrair para mergulhar na essência da natureza da luz.

A ausência da visão de periodicidade das ondas configura-se um obstáculo para a idéia de interferência, imprescindível para uma compreensão da natureza da luz. No exemplo explorado a luz não sofre interferência pois as fontes não apresentam mesma fase ou uma diferença de fase constante, as ondas luminosas emitidas estão vibrando fora de fase (não apresentam uma frequência de vibração constante).

Huygens enfatiza a inexistência de interferência de ondas, de acordo com o sentido atual da superposição de ondas. Em seu modelo da natureza da luz, supõe que uma partícula de matéria pode receber diversas ondas, sucessivas ou simultâneas, provenientes de diferentes direções e inclusive sentidos contrários sem que se aniquilem, este fato é explicado recorrendo

novamente à analogia com choques mecânicos, analogia com o hoje conhecido ‘berço de Newton’. Este exemplo propicia um terreno fértil para discutir com os estudantes a superposição de ondas e a insuficiência de um modelo mecânico, com o de Huygens, para explorar o mecanismo de interferência das ondas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intencionalidade didática da distorção histórica presente no caso do ‘Princípio de Huygens’, nos textos escolares analisados, busca abordar mais rapidamente a síntese científica, ou seja, o modelo atual de ondas. Nestes termos, o modelo de Huygens converte-se em um mero instrumento-matemático para tratar os fenômenos ondulatórios. Contudo, a descaracterização histórica do ‘Princípio de Huygens’ suprime a discussão sobre o papel do meio na propagação de uma onda mecânica, tema presente com ênfase em seu ‘Tratado da Luz’ originalmente proposto e, central nas dificuldades dos estudantes em termos da ondulatória. Nesse sentido, a intenção didática priorizada pelos textos analisados apresenta-se insuficiente, em termos conceituais, tendo em vista uma abordagem didática significativa das ondas mecânicas.

Imaginar os fenômenos ondulatórios como colisões mecânicas, conforme Huygens delineia em seu ‘Tratado da Luz’ possibilita uma significativa interpretação do mecanismo de restauração de equilíbrio do meio. Pertinente para explorar ondas mecânicas em um sentido atual. Contudo, supor essa extensão de modo irrestrito pode, por exemplo, criar uma visão errônea do que ocorre quando duas ondas se cruzam. Como evidenciado nas pesquisas exploradas no presente artigo, com frequência, os estudantes priorizam um modelo mecânico de partículas equivocado para construir o raciocínio das ondas:

- um impulso maior (em uma corda) implica em uma velocidade maior da onda. Negam, neste sentido, que a velocidade das ondas mecânica depende somente das propriedades elásticas do meio;
- Objetos mais leves (menor massa) são lançados mais facilmente atingindo velocidades maiores. Pulsos ‘menores’ – menor amplitude, atingem velocidades de propagação maiores. Contudo, a forma do pulso e a maneira de criação da onda não afetam a velocidade da onda.
- O centro de massa de um objeto é considerado quando se descreve seu movimento (trajetória). Somente o pico da onda (ou o ponto de máximo deslocamento) é considerado quando se descreve a superposição. No entanto é necessário considerar a natureza (forma) das ondas para descrever suas propriedades no caso da superposição de ondas.
- Quando objetos colidem entre si seus movimentos mudam. Ondas que se cruzam, ‘colidem’ se cancelam. Em contraste à idéia científica de que ondas se cruzam sem efeitos permanentes em suas características.

Essas distorções presentes nos modelos mentais dos estudantes podem ser problematizadas didaticamente junto à contextualização histórica do modelo ondulatório proposto por Huygens, conforme explorado no presente artigo. Neste sentido que enfatizamos os potenciais educativos deste episódio histórico, por tornar possível a incursão de conceitos físicos pertinentes à uma interpretação moderna de ondas mecânicas. O estudo crítico do modelo ondulatório de Huygens (com forte viés mecânico) que, se assemelha à propagação das ondas sonoras, possibilita abordar didaticamente o papel da fonte e do meio na propagação das ondas mecânicas e o mecanismo de restauração de equilíbrio do meio. Por outro lado, a ausência de idéias como a superposição de ondas em Huygens pode expor ao aprendiz a insuficiência de traduzir um modelo de ondas em termos de modelos mecânicos unicamente, objetos em colisões não apresentam interferência como ondas.

A presença de idéias errôneas dos fenômenos ondulatórios entre estudantes de distintos níveis de ensino evidenciam a pertinência de explorar este tema com mais expressividade no

contexto educativo. Buscando, neste sentido, abordagens sensíveis às dificuldades dos estudantes e que superem a exposição estanque desses conceitos físicos, ausentes de sua dimensão fenomenológica.

O estudo de episódios históricos que exemplificam a modelização científica, no contexto educativo, pode contribuir para que os estudantes mergulhem nas perguntas científicas. Com base nisso, os desafios históricos, emergem como problemas de ensino, pertinentes para evidenciar, por exemplo, as primeiras sementes na interpretação de Huygens do modelo atual de ondas mecânicas. Os conceitos físicos atuais por sua vez não configuram a gênese da estratégia de ensino, eles surgem com a busca por respostas aos questionamentos presentes nos modelos históricos tratados. Logo, este episódio histórico não pode ser desconsiderado no ensino de física.

Defende-se que na contextualização histórica o estudante pode se deparar com as dificuldades dos cientistas, com conceitos incipientes, com idéias vagas que, mesmo equivocadas, revistas e/ou resignificadas, desempenharam papel fundamental na conceituação atual uma vez que incitam perguntas e desafios científicos evidenciando que os modelos na ciência não nascem prontos e acabados. Com base nisso, o estudante mergulha em contextos históricos que se caracterizam significativos por se distanciar dos conteúdos prontos, freqüentemente presentes no ensino de ciências. Situações didáticas que permitem ao estudante suscitar perguntas e evidenciar as condições epistemológicas de criação e desenvolvimento dos modelos da ciência.

REFERÊNCIA

ARAÚJO, Sidney, M. **A Teoria Ondulatória de Huygens em Livros Didáticos de Física para o Ensino Médio**. In: XI Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física, 2008, Curitiba, Paraná. Atas do XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 2008.

CHEVALLARD, Yves. **La Transposición didáctica**. Buenos Aires: Aique, 2005.

CREW, H. **The Wave Theory of Light. Memoirs by Huygens, Young and Fresnel**. American Book Company: Nova York, 1900.

HECH, E. **Optics**. Addison Wesley: Nova York, 2002.

HUYGENS, Christiaan. Tratado sobre a Luz. Tradução e notas de Roberto de Andrade Martins, **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Suplemento 4, p. 1-99, 1986.

KRAPAS, Sônia. ; QUEIROZ, Glória ; UZEDA, D. ; CORREIA, J. P. **O tratado da luz de Huygens: implicações didáticas**. In: VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2007, Florianópolis. Atas do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2007. v. 1. p. 1-12.

MARTINS, Roberto de A. Como Distorcer a Física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. 1 – Física Clássica. **Caderno Catarinense do Ensino de Física**, v.15, n.3, p. 243-264, 1998a.

MARTINS, Roberto de A. Como Distorcer a Física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. 2 Física Moderna. **Caderno Catarinense do Ensino de Física**, v.15, n.3, p. 265-300, 1998b.

MARTINS, Roberto de A. **A maçã de Newton: história, lendas e tolices**. In: SILVA, Cibelle C. (Org.) Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Livraria da Física, 2006c. p. 167-189.

MARTINS, Roberto de A. **Introdução: a história das ciências e seus usos na educação**. In: SILVA, Cibelle C. (Org.) Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Livraria da Física, 2006d.

MELO, Ana Carolina Staub de.; SOUZA CRUZ, Frederico F. de. **O Gênero Histórico Priorizado em Textos Didáticos de Ensino de Física: contribuições ou distorções para o estudo da natureza da luz**. In: XI Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física, 2008, Curitiba, Paraná. Atas do XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 2008.

MELO, Ana Carolina Staub de. **Contribuições da Epistemologia de Bachelard no Estudo da Evolução dos Conceitos da Óptica**. 2005. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Educação Científica e Tecnológica, Ufsc, Florianópolis, 2005.

NUSSENZVEIG, Moisés. **Curso de Física Básica 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

PAGLIARINI, Cassiano. R. **Uma análise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de física para o ensino médio**. 2007. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de São Paulo.

PEREIRA, Ana. I.; AMADOR, Filomena. A História da Ciência em manuais escolares de ciências da natureza. **Revista Eletrônica de Enseñanza de las Ciencias**, vol. 6, n. 1, 2007.

PESSOA JR. O. Quando a abordagem histórica deve ser usada no ensino de ciências? **Ciência & Ensino**, vol. 1, 1996.

SILVA, Fábio W. O. A Evolução da Teoria Ondulatória da Luz e os Livros Didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.29, n.1, p. 149-159, 2007.

TARANTINO, Giovanni. **Elastic Waves: Mental Models and Teaching/ Learning Sequences**. Frontiers of Fundamental Physics: Proceedings of the Sixth International Symposium "Frontiers of Fundamental and Computational Physics", Italy, September 26-29, 2004. Published by Springer, The Netherlands, 2006, p.381-384. Disponível em: www.springerlink.com/index/k1063u58m755k330.pdf. Acesso em: 26 de março de 2009.

TIPLER, Paul. **Física 4 para Engenheiros e Cientistas: Óptica e Física Moderna**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1991.

YOUNG, Hugh; FREEDMAN, Roger. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003. (Coleção Sears & Zemansky).

WITTMANN, Michael; STEINBERG, Richard N.; REDISH, Edward F. Making Sense of How Students Make Sense of Mechanical Waves. **The Physics Teacher**, janeiro, Vol. 37, n. 1, p. 3-58, 1999. Disponível em: arxiv.org/pdf/physics/0207092. Acesso em: 26 de março de 2009.

ZANETIC, J. **Física Também é Cultura**. São Paulo: USP, Pós Graduação em Educação. (Tese de Doutorado). 252 p., 1989.