

DISTORÇÕES CONCEITUAIS DOS ATRIBUTOS DO SOM PRESENTES NAS SÍNTESES DOS TEXTOS DIDÁTICOS: ASPECTOS FÍSICOS E FISIOLÓGICOS

*Francisco Nairon Monteiro Júnior**

*Alexandre Medeiros***

Resumo: As pesquisas em ensino têm mostrado que os livros didáticos exibem uma tendência reducionista e, ao mesmo tempo, distorcida na apresentação dos diversos conteúdos da física clássica. Com base na busca de distorções desta natureza, centramos nossa investigação na catalogação e análise das apresentações das qualidades fisiológicas do som por textos didáticos do ensino fundamental e médio. Em tal pesquisa constatamos, no processo de transposição didática, distorções conceituais sob vários aspectos, existindo ainda uma forte negligência no tratamento dos aspectos fisiológicos presentes na apresentação dos conceitos de altura, intensidade e timbre.

Unitermos: Análise de livro didático, som, altura, intensidade, timbre, distorções conceituais.

Abstract: *Educational research has demonstrated that textbooks usually exhibit a certain reductionist and distorted standpoint in the presentation of some contents in physics. In searching such distortions, the present research tries to proceed a categorisation and an analysis of the physiological qualities attributed by primary and secondary school textbooks to the phenomenon of sound. In such a research we have found several conceptual distortions in the process of didactical transposition, as well as the neglect of the complexity involved in the ideas of pitch, loudness and timbre.*

Keywords: *Textbook analysis, sound, pitch, loudness, timbre, conceptual distortions.*

Introdução

Muitas pesquisas têm centrado atenção na catalogação e análise de concepções alternativas em diversos conteúdos da física (Driver, 1994; Redish, 1994; Wittmann, 1996). Os conceitos analisados neste artigo estão ligados ao estudo da mecânica ondulatória. Algumas pesquisas mostram que é grande a dificuldade que os estudantes sentem em tentar explicar situações cuja proximidade com os problemas tratados em sala de aula é pequena (Wittmann, 1996; Linder, 1993; Steinberg, 1996). Outras pesquisas indicam que experimentos manipulativos, ou demonstrativos, parecem possuir um papel importante no ensino dos conceitos ligados ao estudo do som (Barman, 1996; Butts, 1994). No que diz respeito às pesquisas em concepções alternativas de estudantes com respeito aos conceitos ligados ao estudo do timbre e da teoria musical, os resultados de pesquisa são bastante raros. Tais investigações resumem-se a alguns temas básicos como diferenciação entre intensidade e altura (Driver, 1994), bem como natureza e propagação do som (Linder & Gaalen, 1989; Linder, 1993).

Muito embora sejam raras as pesquisas no tema que estamos tratando no presente artigo, as pesquisas em outros conteúdos da física parecem mostrar que as dificuldades que os estudantes sentem em aprender os diversos conteúdos da física, bem como aplicá-los

* *Professor Auxiliar, Departamento de Física e Matemática, Universidade Federal Rural de Pernambuco. (e-mail: naironjr@uol.com.br)*

** *Professor Adjunto, Programa de Pós-Graduação em Educação nas Ciências, da Universidade Federal Rural de Pernambuco. (e-mail: med@hotmail.com.br)*

em situações cotidianas, passam, entre outros, por três fatores. O primeiro diz respeito à postura repressiva adotada pelo professor em sala de aula, respaldada pelo modelo de ensino tradicional que está presente na maior parte das nossas escolas. O segundo diz respeito à negligência dos professores quanto à existência de uma multiplicidade de interpretações, por parte dos estudantes, para o objeto de estudo da ciência. Por fim, a quase ausência de um material didático que seja consonante com a natureza problemática da construção dos conceitos no processo de ensino e aprendizagem.

Dentro desta última característica, analisamos neste artigo as falhas presentes nos textos didáticos de 8ª série do ensino fundamental e 2º ano do ensino médio, na apresentação dos atributos psicofísicos do som, a saber, os conceitos de altura, intensidade fisiológica e timbre. Desta forma, evidenciamos as falhas mais fortemente presentes nestes textos quanto à conceituação das qualidades do som, bem como o nível com o qual os textos abordam este tema numa perspectiva interdisciplinar, relevando não só os aspectos físicos, mas também os aspectos fisiológicos ligados à percepção dos estímulos de frequência e intensidade física, bem como os conceitos ligados à teoria musical na contextualização de tais conceitos.

Por outro lado, poderíamos ainda considerar a importância da história do desenvolvimento da teoria do som e da acústica experimental. Em tal perspectiva, poderíamos resgatar um estreito laço entre a física e a acústica musical, ciências que tiveram seus desenvolvimentos interligados e cujos resgates poderiam constituir-se numa importante ferramenta didática. A acústica experimental teve grande impulso com pesquisas ligadas à geração e propagação do som, bem como com as tentativas de registro das vibrações sonoras. Na Antigüidade, os fenômenos sonoros estavam vinculados ao estudo qualitativo das cordas, a relação entre as frequências dos sons produzidos (altura relativa), evidenciando um interesse nas nuances ligadas à música. Através das contribuições da escola pitagórica e, posteriormente, dos trabalhos de Galileu, Hooke e Mersenne, entre outros, a análise dos fenômenos sonoros aproximou os problemas da física e da música. Questões como o isocronismo das fontes vibrantes, comprimentos consonantes, as tentativas de registro das vibrações sonoras e os mecanismos de análise do som, impulsionaram o desenvolvimento de um grande número de artefatos experimentais que culminaram com o aparecimento do moderno osciloscópio, cujo resgate como ferramenta didática pode constituir-se num recurso importante em sala de aula. Por outro lado, o desenvolvimento da teoria das perturbações e da mecânica dos meios contínuos, que veio a desenvolver-se a partir de meados do século XVIII, resultou no estabelecimento de uma completa teoria física da análise dos sons que culminou com as séries de Fourier. Tais considerações, contudo, na análise dos textos didáticos, fogem ao escopo deste artigo.

A Seleção dos Textos Didáticos

Nosso intuito, com esta pesquisa, foi o de levantar um quadro amplo das sínteses apresentadas por livros didáticos sobre os atributos psicofísicos do som que pudesse então ser encarado como algo útil para os professores que trabalham com o tema em questão. Para isso, o primeiro passo foi o de escolher, entre uma quantidade bastante significativa de textos disponíveis, aqueles mais adotados nas escolas. Daí, passamos a fazer um levantamento entre os professores de ciências (8º ano do ensino fundamental) e física (2º ano do ensino médio) dos títulos mais utilizados nas escolas do Recife. Dentre os textos escolhidos do segundo ano do

ensino médio, incluímos alguns textos que atualmente não são utilizados freqüentemente, mas que exerceram grande influência em outras épocas, com o objetivo de fazermos uma comparação entre tais textos e os adotados atualmente nas escolas. Dizer, a priori, que a tendência dos livros didáticos de física, ao longo dos anos, tem sido reducionista e simplificadora dos conteúdos é algo que exige um estudo mais aprofundado e que foge do escopo deste artigo.

No quadro abaixo, temos um resumo dos textos escolhidos, separados por níveis de ensino. As referências bibliográficas destes livros constam na bibliografia deste artigo, separadas por níveis de ensino.

TABELA 1 - TEXTOS ANALISADOS	
Textos do Ensino Fundamental	09
Textos do Ensino Médio	10
TOTAL DE TEXTOS ANALISADOS	19

As Distorções Conceituais Presentes nos Textos Didáticos

Os dezenove textos selecionados foram analisados separadamente. Em cada um deles, a análise foi feita com respeito a cada uma das qualidades do som, a saber, altura, intensidade e timbre. Para tanto, baseamo-nos num influente conjunto de textos de acústica, cujas referências bibliográficas estão no final deste artigo. Em tais textos, as abordagens dos conceitos em questão incluem a teoria física das cordas vibrantes, a análise e síntese de Fourier, bem como os aspectos psicofísicos presentes na relação entre o estímulo físico e a resposta fisiológica para as curvas de resposta do ouvido. Assim, utilizamos alguns dos muitos textos de acústica como referencial teórico na análise do conteúdo veiculado pelos textos didáticos analisados. Com base neste referencial, cada um dos textos didáticos selecionados foi analisado, separadamente, com o objetivo de identificar as distorções conceituais presentes sob vários aspectos, dentre os quais, na precisão da definição dos conceitos, bem como na delimitação dos conceitos físicos, fisiológicos e da teoria musical. Em seguida, fizemos o cruzamento dos dados obtidos para enfatizar aquilo que existia de comum nos textos analisados, ou seja, buscando aquilo que se mantinha invariante nas mensagens.

Na apresentação da análise dos textos didáticos, evitamos o uso de citações de tais textos, uma vez que tal estratégia acarretaria num aumento considerável do volume de informações adicionais no texto principal. Portanto, optamos por incluir as páginas destes textos nas referências bibliográficas. Contudo, algumas citações mais importantes foram incorporadas para exemplificar os invariantes fortemente presentes.

A tabela abaixo mostra os resultados da análise das distorções conceituais na apresentação das qualidades fisiológicas do som nos nove livros de 8º ano do ensino fundamental e nos dez livros de 2º ano do ensino médio. Observe-se que as frações indicadas na tabela do tipo x/y significam que dos 'y' livros analisados, 'x' deles possuem erros conceituais relacionados ao tópico.

Iniciando a interpretação destes dados, observamos, nas linhas 1 e 2 da tabela 2, que dos nove livros de 8ª série analisados, apenas dois preocuparam-se em justificar que altura,

TABELA 2 POSICIONAMENTOS CONCEITUAIS		8º ano Ensino Fundamental	2º ano Ensino Médio
1	Os conceitos de altura, intensidade e timbre são apresentados, apropriadamente, como sendo “Qualidades Fisiológicas do Som”. Tais textos, contudo, induzem o leitor a possíveis distorções conceituais ao não aprofundarem as distinções sutis entre os estímulos físicos e a percepção humana.	7/9	7/10
2	Os conceitos de altura, intensidade e timbre são apresentados como sendo “Qualidades Fisiológicas do Som”, havendo ainda o cuidado com um aprofundamento em termos de estímulo físico x percepção humana.	2/9	3/10
3	É apresentada a existência de uma relação entre frequência e altura, sendo explicada apenas em seus aspectos físicos, veiculando, assim, uma conceituação distorcida do fenômeno.	9/9	6/10
4	É apresentada a existência de uma relação entre frequência e altura, sendo explicada em seus aspectos físicos e fisiológicos. Neste caso, é também introduzida apropriadamente uma análise da relação frequência (estímulo) x altura (resposta).	—	—
5	É apresentada a existência de uma relação entre intensidade física e intensidade fisiológica, sendo explicada, entretanto, apenas em seus aspectos físicos. Deste modo, abre-se a possibilidade de distorções conceituais relativas à compreensão dos aspectos fisiológicos do fenômeno, negligenciados na explicação. Como alternativa insuficiente, é introduzida apenas uma escala em Decibel.	9/9	6/10
6	É apresentada a existência de uma relação entre intensidade física e intensidade fisiológica, sendo explicada em seus aspectos físicos e fisiológicos. Deste modo, a conceituação é explicada apropriadamente em termos de uma análise da percepção intensidade física x intensidade fisiológica.	—	4/10
7	É clara a relação entre altura de uma nota musical e frequência do 1º harmônico ou fundamental, constituinte do som analisado. Neste caso, o timbre é explicado precisamente em termos da diferença entre os harmônicos superiores superpostos ao som fundamental.	—	6/10
8	O timbre é anunciado como uma “qualidade que nos faz distinguir as fontes”. Contudo, tal distinção não é pormenorizada em termos da diferença entre as séries harmônicas.	7/9	—
9	O timbre é apresentado como algo holístico, em que os diversos harmônicos presentes são substituídos, distorcidamente, por um som único. Assim, a distinção entre as fontes é explicada em termos da distinção entre as formas de onda.	2/9	4/10
10	O timbre é apresentado distorcidamente como resultado da ‘união’ entre o som produzido pela fonte (corda do instrumento, por exemplo) e os harmônicos produzidos pelas outras partes do instrumento (colunas de ar, corpo, etc.).	—	2/10

intensidade e timbre são qualidades fisiológicas do som, e não apenas físicas, enquanto sete deles negligenciaram tal justificativa. No caso dos livros de ensino médio, este número sobe para três, o que ainda reflete uma negligência quanto à necessidade de apresentar tal conteúdo como tendo explicações físicas e fisiológicas intimamente interligadas, e cuja abordagem desvinculada (apenas física ou apenas fisiológica) poderia resultar num entendimento parcial da complexidade dos citados conceitos. É importante salientar que os livros que introduziram este questionamento fizeram-no de uma forma pouco plausível, não discutindo detalhes da forma como a audição responde aos estímulos físicos de frequência e intensidade física. Por exemplo, tomemos o texto “Ciências 8 - O Ecossistema” (Lopes, 1995, p. 135). A apresentação de tal texto resume-se a afirmar que as qualidades do som são fisiológicas apenas pelo fato de “*que dependem da nossa audição e também do som, principalmente de sua frequência, amplitude e comprimento de onda*”, não importando discutir a natureza desta dependência. Já o texto “Princípios da Física 2” (Oliveira, 1993, p. 376), afirma que “*pode-se distinguir no som certas características denominadas qualidades, que estão relacionadas com as sensações produzidas em nosso ouvido, por isso denominadas fisiológicas, que são: **altura, intensidade e timbre***”. Observemos que novamente as relações entre estímulo físico e resposta fisiológica para variações de frequência e intensidade física não são explicitadas. Assim, tanto no caso da maioria dos livros do ensino fundamental como dos livros de ensino médio, na seção introdutória, cujo título é geralmente chamado de “qualidades fisiológicas do som”, não há a preocupação de discutir porque são características fisiológicas e não físicas. De uma forma mais geral, não há preocupação entre os textos analisados em discutir que determinados objetos de estudo da física são também objetos de estudo de outras ciências. Aí estão, por exemplo, a acústica e a ótica.

Na seqüência, preocupamo-nos em procurar relações especificamente entre os conceitos de frequência e altura nas abordagens dos textos analisados, uma vez que tais relações não foram delineadas nos parágrafos introdutórios de tais textos, discutidos no parágrafo acima. Como podemos ver nas linhas 3 e 4 da tabela acima, todos os livros analisados limitaram-se a afirmar que a altura de um som está ligada à frequência da onda, sendo os sons mais agudos, os de maior frequência e os mais graves, os de menor frequência. Contudo, o entendimento da relação entre o estímulo físico (frequência) e a resposta fisiológica (altura de um som), passa necessariamente pela discussão da natureza não linear da percepção de um som cuja frequência varia (Backus, 1977, 126-132; Berg, 1995, pp. 147-150; Johnston, 1989, pp.243-250; Rigden, 1985, pp. 48-50; Rossing, 1989, pp. 109-112). Tal interpretação é de fundamental importância no entendimento da lógica na construção das escalas musicais ocidentais (Backus, 1977, 134-158; Benade, 1990, 288-303; Berg, 1995, pp. 250-256; Rigden, 1985, pp. 240-252; Rossing, 1989, pp. 171-183). Uma vez que o ouvido não responde linearmente às variações de frequência, a diferença de frequência entre uma nota musical e sua oitava em diferentes regiões do espectro sonoro é também diferente. Por exemplo, a diferença de frequência entre o Lá-1 do teclado do piano (Lá-1=220 Hz) e sua oitava (Lá0 = 440 Hz), ou seja o Lá central, é de 220 Hz. Contudo, se tomarmos o Lá da primeira oitava superior (Lá1 = 880 Hz) e sua oitava (Lá2 = 1760 Hz), a diferença entre as frequências será de 880 Hz. Muito embora a variação de frequência nos dois exemplos acima seja diferente, a variação de altura, que por sua vez é a resposta fisiológica, permanece a mesma. De outra forma, quando variamos em uma oitava a nota Lá na primeira oitava considerada acima (de Lá-1 para Lá0), é necessária uma extensão quatro vezes maior em frequência na segunda oitava (de Lá0 para Lá1) para que a variação de altura seja a mesma para a audição humana, uma vez que

$$\frac{1760\text{Hz} - 880\text{Hz}}{440\text{Hz} - 220\text{Hz}} = 4$$

Muito embora todas estas reflexões pudessem ser consideradas numa abordagem da relação frequência x altura, nenhum dos textos analisados evidenciou a existência de tais relações. Ao invés disto, limitaram-se a uma abordagem simplificada e, de certa forma, estéril numa visão interdisciplinar da acústica. Por exemplo, o texto “Ciências e Educação Ambiental” (Cruz, 1997, p. 203), afirma que “a altura de um som depende da frequência, isto é, do número de vibrações por segundo. Quanto maior a frequência, mais agudo é o som e vice-versa”. Já o texto “Física - V. 2” (Bonjorno, 1985, p. 250), afirma que a “Altura é a qualidade que permite classificar os sons em graves (baixos) e agudos (altos)”. Como vemos, ambos os exemplos acima citados reiteram o caráter simplificado adotado na apresentação, pelos livros analisados, da relação entre altura e frequência.

Quanto à relação entre intensidade física e intensidade fisiológica, encontramos algumas diferenças entre as apresentações dos textos de 8ª série e os do ensino médio, conforme mostram as linhas 5 e 6 da tabela 2. Enquanto todos os livros do ensino fundamental limitaram-se a falar da existência de uma relação entre intensidade física e intensidade fisiológica, baseada na utilização de uma escala logarítmica (escala decibelimétrica), quatro dos dez textos de 2º ano do ensino médio foram além disto, apresentando e discutindo a escala dos fons. Assim, vemos que a grande maioria dos textos analisados não aprofundou a discussão das relações existentes entre o estímulo físico (intensidade física) e sua resposta fisiológica. Tomemos, por exemplo, o texto “Ciências e Educação Ambiental” (Cruz, 1997, p. 203). Neste texto, a intensidade é tratada como “a qualidade que permite distinguir um som forte de um som fraco. Ela depende da amplitude de vibração: quanto maior a amplitude, mais forte é o som e vice-versa”. Na seqüência, este texto introduz a escala decibelimétrica, exemplificando, em seguida, com níveis de intensidade cujas sensações são dolorosas ou prejudiciais à audição. Contudo, não há uma preocupação em discutir a forma como o ouvido responde às mudanças de pressão ou intensidade física. Por outro lado, podemos notar no trecho transcrito acima que o citado texto associa a intensidade à amplitude de vibração, não evidenciando do que se trata. Evita falar que se trata da amplitude de vibração das partes do meio no qual a onda se propaga-se.

Um outro exemplo marcante da definição de intensidade sonora numa abordagem desvinculada dos seus aspectos fisiológicos pode ser encontrada no livro “Imagens da Física” (Amaldi, 1995, p. 220), no qual a intensidade é apresentada através da análise de gráficos pressão x tempo, conforme mostra a figura abaixo. Afirma que a intensidade “é a característica que distingue os sons fortes dos sons fracos. Observa-se que a intensidade de um som depende da amplitude das vibrações que as partículas de ar realizam sobre suas posições de equilíbrio enquanto um som se propaga”.

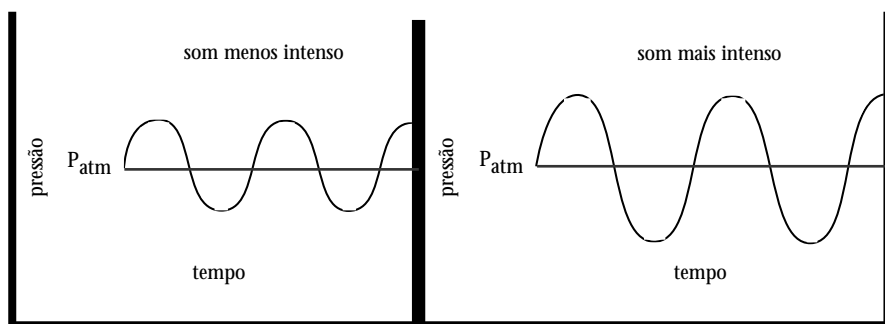


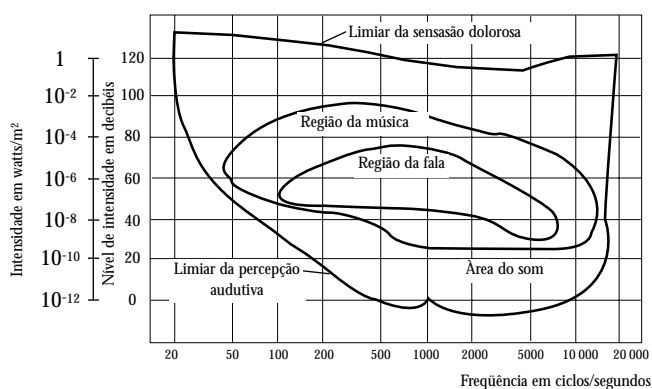
Figura 1
Um som intenso tem uma amplitude maior do que um som fraco. Isso pode ser observado nestes dois diagramas pressão-tempo.

DISTORÇÕES CONCEITUAIS DOS ATRIBUTOS DO SOM

Muito embora defina os aspectos físicos envolvidos com certa precisão, este último livro não introduz um estudo da forma como o ouvido humano responde à estas variações de amplitude, limitando-se a afirmar que “*A sensação provocada por esse fluxo de energia varia de uma pessoa para outra, e depende também das características do som. A sensação sonora cresce muito lentamente com o aumento da intensidade do som*”. Assim, muito embora fale da existência de uma tal dependência entre estímulo físico e resposta fisiológica, não a explica, nem tampouco discute a curva dos fons (escala dos sores) (Backus, 1977, 92-100; Berg, 1995, pp. 150-156; Johnston, 1989, pp.250-252; Pierce, 1983, pp. 115-125; Rigden, 1985, pp. 50-54; Rossing, 1989, pp. 85-95).

Como exemplo de um livro cuja abordagem considerou aspectos fisiológicos no estudo da intensidade sonora, podemos citar o texto “Física” (Bonjorno, 1985, pp. 250 e 251), o qual, após discutir a escala decibelimétrica, apresenta a curva da intensidade audível para o espectro de frequência do som. Muito embora tal curva seja importante nesta abordagem, o texto negligencia sua interpretação, tratando-a como aparentemente óbvia. Mostramos a seguir a figura apresentada pelo citado texto.

O gráfico abaixo indica a faixa de audibilidade do ouvido humano:



Na seqüência, objetivamos delinear como os textos analisados apresentam especificamente o conceito de timbre, encontrando fortes diferenças entre as abordagens feitas pelos livros de ensino fundamental e os de ensino médio. Partimos da definição de que a diferença de timbre entre duas fontes sonoras dá-se na diferença entre os harmônicos superiores que estão superpostos ao som fundamental, diferença esta caracterizada em termos das diferenças de altura e intensidade destes harmônicos. Por outro lado, quando falamos de altura de uma nota, idéia fundamental na apresentação do conceito em questão, estamos nos referindo à frequência do som fundamental (modo fundamental ou primeiro harmônico) (Backus, 1977, 107-118; Berg, 1995, pp. 157-160; Johnston, 1989, pp.97-113; Pierce, 1983, pp. 89-101; Rigden, 1985, pp. 66-88; Rossing, 1989, pp. 125-137). Muito embora esta diferenciação seja decisiva na apresentação do conceito de timbre, a maior parte dos textos analisados negligenciou a importância de tal diferenciação.

Quando dizemos que dois sons de mesma altura e mesma intensidade podem soar diferentemente, estamos nos referindo ao fato de que o primeiro harmônico destes dois sons tem a mesma altura (mesma frequência) e mesma intensidade. Neste caso, a intensidade física e a intensidade fisiológica do primeiro harmônico são iguais para os dois sons, uma vez que ambos possuem a mesma frequência. Contudo, a forma de onda evidenciada, por exemplo,

num osciloscópio, mostra que a resultante da superposição destes fundamentais com seus harmônicos superiores é diferente para cada fonte sonora, residindo aí a explicação para os diferentes timbres. Assim, deve-se deixar claro que dois sons de mesma altura e intensidade, concordam no primeiro harmônico, podendo, porém, vários termos de suas séries harmônicas serem diferentes em número, intensidade e/ou frequência. Todavia, dos nove livros de 8ª série analisados, nenhum evidenciou tal diferenciação, como podemos ver na linha 7 da tabela acima. Como exemplo de tal negligência, podemos citar o texto “Física e Química” (Blinder, 1992, p. 85), o qual afirma que “*Quando um conjunto de instrumentos realiza uma música, vários instrumentos fazem soar a mesma nota (ou seja, sons de mesma frequência) simultaneamente*”. No caso, o texto deveria deixar claro que se tratam de sons de mesma frequência do modo fundamental. Um outro exemplo pode ser encontrado no texto “Ciências e Educação Ambiental” (Cruz, 1997, p. 203), o qual afirma que “*Se uma pessoa tocar a nota dó no piano e ao mesmo tempo outra pessoa tocar a nota dó no violino, ambas com a mesma força, os dois sons terão a mesma altura (frequência) e a mesma intensidade. Mesmo sem ver os instrumentos, o ouvinte da outra sala saberá distinguir facilmente um som do outro, porque cada instrumento tem seu som característico, ou seja, seu timbre*”.

A nossa análise parece evidenciar que a maior parte destes textos limitou-se a afirmar que o timbre é a qualidade que torna possível distinguir fontes sonoras, sem, no entanto, aprofundar-se no estudo das bases físicas e fisiológicas que tornam plausível a explicação de tal distinção. Como podemos ver na linha 8 da tabela 1, dos nove textos de 8ª série analisados, sete resumem sua apresentação à forma como exemplificamos acima, ou seja, dizem que o timbre de uma fonte sonora torna possível a diferenciação entre fontes diferentes, mas não explicam como isto é possível. Os dois textos que foram além disto, esboçando uma explicação, cometeram distorções conceituais. Em vez de apresentarem a existência de diferentes harmônicos superpostos ao tom fundamental, atribuíram esta diferenciação à diferença entre as formas de onda dos sons estudados. Em vez de tratarem estes sons como sendo compostos de várias frequências, passaram a idéia de que se tratava de um som único, em que um atributo de natureza talvez mágica, tornara suas formas de onda diferentes. Como exemplo de tal explicação distorcida do conceito de timbre, podemos citar o texto “Química e Física” (Macedo, 1992, p. 128), o qual afirma que “*Quando tocamos a mesma nota, dó, por exemplo, em dois instrumentos diferentes, como o violão e a flauta, estamos produzindo sons com a mesma altura. A intensidade também pode ser a mesma. Mesmo assim, sabemos distinguir o som dos dois instrumentos, porque o timbre de cada um é diferente. O timbre é determinado pela forma de onda emitida*”. A figura abaixo mostra o exemplo ilustrativo utilizado pelo texto para evidenciar erroneamente a diferença entre as formas de onda. Observe que o autor atribui ao violão uma forma de onda senoidal, a qual é, na verdade, o registro gráfico para um tom puro, ou seja, de frequência única. Tal curva de registro não poderia resultar do som produzido por uma corda de violão. No caso da flauta, o autor atribui um registro gráfico que não representa graficamente o som produzido por nenhum instrumento musical.

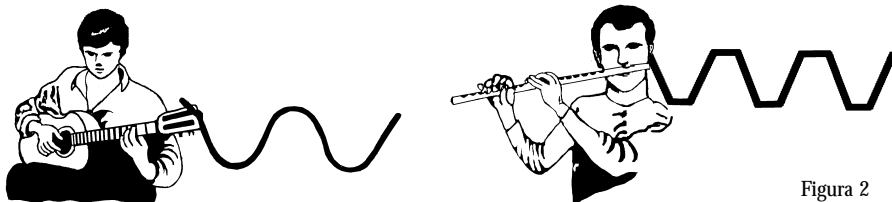


Figura 2

Notemos na transcrição acima que o texto deixa transparecer que os sons analisados possuem apenas uma frequência, passando uma idéia implícita de que é algo holístico, sendo os sons do violão e da flauta estritamente iguais nos seus atributos físicos, como é evidenciado ainda nas figuras apresentadas no texto. Assim sendo, deveria haver alguma qualidade mágica que tornaria possível a diferenciação em nível de audição.

Um outro exemplo de uma tal visão holística do timbre pode ser encontrado no texto “Física e Química” (Blinder, 1992, pp. 85 e 86), o qual afirma que “*Quando um conjunto de instrumentos realiza uma música, vários instrumentos fazem soar a mesma nota (ou seja, sons de mesma frequência) simultaneamente. Podemos, entretanto, distinguir facilmente um piano de um violino. O fato de podermos diferenciar as mesmas notas quando emitidas por instrumentos diferentes deve-se ao fato de que, embora a frequência seja a mesma, o formato da onda é diferente*”. Igualmente ao texto anterior, a transcrição acima deixa transparecer que os sons emitidos pelo piano e o violino são iguais, porém a forma de onda emitida é diferente. No decorrer da seção, o texto também utiliza figuras em que aparecem curvas com formas de onda diferentes, evidenciando tratar-se de uma figura holística e não um registro gráfico da composição dos modos de vibração das fontes sonoras consideradas.

No tocante aos livros de 2º ano do ensino médio analisados, apenas seis dos dez livros analisados iniciam a explicação do conceito de timbre partindo da premissa de que a altura e a frequência consideradas na comparação de notas iguais tocadas em instrumentos diferentes, são as do primeiro harmônico ou modo fundamental. Porém, na seqüência da abordagem, apenas cinco livros delineiam uma explicação consonante com a decomposição de Fourier, enquanto que um texto comete distorções conceituais ao admitir que, embora a diferença entre timbres de fontes sonoras distintas se dê na diferença entre suas séries harmônicas, estes harmônicos superiores não são produzidos pela fontes e sim, pelas outras partes do instrumento. É o caso do texto “Física 3” (Pauli, 1980, pp. 147 e 148), o qual afirma que “*Em geral, os sons emitidos são complexos, resultando da superposição do som fundamental com sons secundários emitidos pelo instrumento. Considere, por exemplo, um violão. O executante, ao dedilhar uma corda, produz uma vibração nesta corda; mas ela está presa ao corpo do instrumento, que se põe a vibrar juntamente com a corda. O som que nós ouvimos é a superposição do som fundamental com os vários sons secundários emitidos pelo instrumento. Quando as frequências dos sons secundários são múltiplos da frequência do som fundamental, os sons secundários são chamados harmônicos do som fundamental*”. Vemos nesta transcrição que é atribuída ao instrumento a produção dos harmônicos superiores, sendo este instrumento posto a vibrar a partir da vibração da corda. Os quatro textos restantes cometem distorções que vão além da distorção cometida pelo texto acima citado. Todos eles apresentam o conceito de timbre partindo da comparação das formas de onda emitidas por fontes sonoras diferentes, evidenciando uma leitura holística na compreensão dos registros gráficos, sendo que um destes quatro livros atribuiu esta ‘forma de onda’ como sendo resultado da vibração do instrumento como um todo. É o caso do texto “Curso de Física” (Luz & Alvarenga, 1993, pp. 857 e 858), o qual afirma que “*Se tocarmos uma certa nota de um piano e se esta mesma nota (mesma frequência) for emitida, com a mesma intensidade, por um violino, seremos capazes de distinguir uma da outra, isto é, sabemos dizer claramente qual a nota que foi emitida pelo piano e qual foi emitida pelo violino. Dizemos, então, que estas notas têm timbres diferentes. Isto acontece porque a nota emitida pelo piano é o resultado da vibração não só da corda acionada, mas também de várias outras partes do piano (madeira, colunas de ar, outras cordas, etc.) que vibram juntamente com ela. Assim, a onda sonora emitida terá uma forma própria, característica do piano. De modo semelhante, a onda emitida pelo violino é o resultado de vibrações características deste instrumento e, por isto, apresenta uma forma diferente da onda emitida pelo piano. Na fig. 17-39 mostramos, em (a), a forma resul-*

tante de uma onda sonora, cuja frequência é 440 Hertz, emitida por um violino e, em (b), a mesma nota (440 Hertz) emitida pelo piano. Então, sons de mesma frequência, mas de timbres diferentes, correspondem a ondas sonoras cujas formas são diferentes. Portanto, podemos dizer que nosso ouvido é capaz de distinguir dois sons, de mesma frequência e mesma intensidade, desde que as formas das ondas sonoras correspondentes a estes sons sejam diferentes. Dizemos que os dois sons têm timbres diferentes". Esta transcrição deixa transparecer, muito embora não esteja explícito, que parece tratar-se de uma composição de um tom produzido pela fonte (corda do instrumento, por exemplo) e de outros tons produzidos pelas outras partes do instrumento, resultando numa forma de onda diferente para cada fonte sonora. Como sabemos, isto está em desacordo com a explicação paradigmática da análise física da corda vibrante, na qual tanto o modo fundamental como a série harmônica que o acompanha são produzidos na fonte sonora (Hsu, 1962; Symon, 1996). Neste caso, as outras partes do instrumento servem como ressonadores para os tons produzidos pela fonte vibrante, variando, assim, suas intensidades. Um outro exemplo desta visão distorcida na explicação das diferenças de timbre de fontes sonoras pode ser encontrada no texto "Imagens da Física" (Amaldi, 1995, pp. 220 e 221), o qual afirma que "*Dois sons que têm a mesma intensidade e a mesma altura podem diferir bastante entre si. De fato, são muito diferentes as impressões resultantes de sons de igual altura e intensidade, mas emitidos por um piano, por uma flauta e pela voz humana. O timbre é a característica que permite distinguir sons idênticos em altura e intensidade, mas provenientes de fontes distintas. Sons de timbre diferente se diferenciam pela forma de onda*". Observemos que em tal transcrição não há menção alguma da existência de uma série harmônica, nem tampouco de que existe um primeiro harmônico que determina a altura e a intensidade do som emitido por fontes diferentes.

Enfim, dos cinco textos que abordaram o conceito de timbre numa estratégia consonante com o modelo científico, o texto "Física na Escola Secundária" (Blackwood, 1958, pp.365-369) foi o que abordou o citado conceito de uma forma mais aprofundada e mais rica em situações experimentais. Tal texto divide a apresentação do conceito de timbre em seções onde trata do estudo dos harmônicos (série harmônica), batimento, interferência, superposição, discute os modos normais de vibração das cordas sonoras através do sonômetro e finalmente, interpreta as curvas de timbre em termos da análise e síntese de Fourier, exemplificando com leituras dos registros gráficos do osciloscópio para instrumentos musicais diferentes. Afirma que "O timbre de um som depende das frequências e das intensidades relativas dos harmônicos que o compõem", e mais adiante completa esta definição afirmando que "*O timbre nos habilita a distinguir dois sons de mesma intensidade auditiva e frequência fundamental*". Em tal citação, podemos observar o cuidado do texto na apresentação dos conceitos de intensidade relativa (ao modo fundamental), intensidade auditiva (intensidade fisiológica) e frequência fundamental (altura da nota musical). Muito embora tal abordagem sirva de exemplo pela sua profundidade na discussão dos conceitos ligados ao timbre, não é necessário que uma abordagem seja aprofundada para que seja precisa. Em outras palavras, uma síntese não tem que necessariamente resultar numa distorção.

Conclusões

Da análise geral das características presentes nos livros didáticos analisados, com respeito às qualidades psicofísicas do som, podemos tirar algumas conclusões, que podem servir de referencial no desenvolvimento de livros didáticos mais críticos e abertos à investigação de quem os utilizarem. Com respeito à forma como os conteúdos analisados são apresentados

pelos livros didáticos, nossa análise evidenciou uma forte ênfase no aspecto abstrato, não havendo uma preocupação em contextualizar tais conteúdos com situações próximas da vivência dos estudantes. Passaria por aí a necessidade de entrar-se no enorme universo das experiências musicais, que todos possuem, em maior ou menor quantidade. Associado a isto, tais conteúdos são apresentados de uma forma superficial e fundamentalmente física, não relevando a importância da percepção humana na construção da ciência da acústica. A beleza e a riqueza presentes no estudo da psicoacústica promovem uma rara oportunidade de discussão da natureza subjetiva na construção das teorias científicas. Todo o arcabouço histórico do caminho conjuntamente trilhado pela física e pela música, que poderia servir de base na construção de uma abordagem mais interdisciplinar, é substituído por uma abordagem árida, caracterizada por uma negligência quanto à precisão dos conceitos e por uma seqüência, quase que cegamente repetida por todos os textos, espelhando uma lógica aparentemente óbvia, que seria no mínimo, levada ao descrédito se tal conhecimento histórico fosse então evidenciado.

Com respeito aos recursos ilustrativos utilizados pelos textos, nossa análise evidenciou uma forte tendência ao uso excessivo de ilustrações, sendo algo menor nos livros do ensino médio. Ao invés de servirem, no entanto, como auxiliares na elucidação dos textos escritos, servem apenas como um recurso dispensável, cujo objetivo maior é tornar o texto mais atraente e colorido. Tais ilustrações muitas vezes aparecem fora do contexto do texto escrito e, algumas vezes, passando mensagens distorcidas do ponto de vista da teoria. Tratar-se-ia então de frisar a importância da utilização dos registros gráficos, interpretados à luz dos fenômenos físicos representados. Tal interpretação passaria necessariamente pela análise do significado dos gráficos utilizados pelos textos didáticos para representar intensidade sonora, curvas de timbre, etc.

A problemática acima levantada reflete duas idéias que estão implícitas no título deste artigo. Em primeiro lugar, quanto à natureza negligente com a qual os livros reapropriam os conteúdos para a realidade de ensino e aprendizagem, ou seja, quando falamos da "*síntese*" no processo de transposição didática (Astolfi & Develay, 1990), estamos nos referindo ao fato delineado na nossa análise de haver distorções neste processo. Segundo Cox (1996), "*há obviamente dificuldades em planejar um livro texto conveniente para crianças numa larga faixa de habilidades. Como os conceitos são colocados em contexto, as palavras usadas e as idéias desenvolvidas, precisam levar em conta a idade, a habilidade e a compreensão de cada criança, mas nunca deveriam confundir a precisão científica*". Em outras palavras, uma "*síntese*" não tem necessariamente que resultar numa "*distorção*". Por outro lado, quando consideramos a importância de uma postura realista crítica na construção do conhecimento científico, estamos interessados na relação realidade observável x teoria x experimento na construção do conhecimento em sala de aula. Tal característica metafórica das teorias científicas lembra-nos uma atividade prática que podemos desenvolver quando estamos discutindo a análise de Fourier. Trata-se de tentar reproduzir a série harmônica de um instrumento musical num sintetizador. Se colocamos algo em torno de cinco componentes, a curva de timbre resultante já será bastante próxima da curva de timbre real do instrumento musical. Poderá ainda, quando tocada no sintetizador, confundir alguns ouvidos pouco treinados. Se formos superpondo mais e mais harmônicos, conseguiremos inclusive confundir muitos maestros. Contudo, por mais harmônicos que possam ser superpostos ao tom fundamental, jamais conseguiremos reproduzir o som real do instrumento musical. Isto se dá porque a teoria na qual estão baseados nossos cálculos é uma aproximação, com pressupostos bem definidos que a tornam aceitável. Porém, jamais podemos vê-la como algo fiel ao objeto de estudo. Jamais será o retrato fiel da realidade estudada e, assim, a "*síntese*" terá sempre algo de "*distorção*".

Referências Bibliográficas:

Livros Didáticos Analisados (Ensino Fundamental)

- BARROS, C. *Física e química: 8ª série*. São Paulo : Ática, 1994. p.80-81.
- BLINDER, D.A. et al. *Física e química: 8ª série*. São Paulo : Atual, 1992. p.85-86.
- CRUZ, D. *Ciências e educação ambiental*. São Paulo : Ática, 1997. p.203-204.
- LEMBO, A. et al. *Ciências: química e física*. São Paulo : Moderna, 1992. p.170-171.
- LOPES, P.C. *Ciências 8: o ecossistema*. São Paulo : Saraiva, 1995. p.135-136.
- MACEDO, M.U., GALHARDO FILHO, E. *Ciências: química e física*. São Paulo : IBEP, 1992. p.127-128.
- PORTO, D.P., MARQUES, L. *Ciências: química e física*. São Paulo : Scipione, 1994. p.111.
- SOARES, J.L. *Química e física: 1º Grau*. São Paulo : Moderna, 1990. p.136-137.
- STERN, I. *SOS Ciências: 8ª série*. Curitiba : Arco Íris, 1993. p.129.

Livros Didáticos Analisados (Ensino Médio)

- AMALDI, U. *Imagens da física*. São Paulo : Scipione, 1995. p.219-221.
- BLACKWOOD, O.H., HERRON, W.B., KELLY, W.C. *Física na escola secundária*. Rio de Janeiro : Fundo de Cultura, 1968. p.365-369.
- BONJORNO, J.R., BONJORNO, R.F.S.A., BONJORNO, V. *Física*. São Paulo : FTD, 1985. v.2, p.250-251.
- CALÇADA, C.S., SAMPAIO, J.L. *Física clássica*. São Paulo : Atual, 1985. v.5, p.438-440.
- LUZ, A.M.R., ALVARENGA, B. *Curso de física*. São Paulo : Harbra, 1993. v.2, p.856-858.
- OLIVEIRA, P.C. *Princípios da física 2*. Belo Horizonte : Lê, 1993. p. 376-377.
- PARANÁ, D.N. *Física*. 4ª ed. São Paulo : Ática, 1995. v.2, p.338-341.
- PAULI, R.U., MAUAD, F.C., HEILMANN, H.P. *Física 3*. São Paulo : Pedagógica e Universitária, 1980. p.147-148.
- RAMALHO Jr., F., SANTOS, J.I.C., FERRARO, N.G. et al. *Os fundamentos da física*. São Paulo : Moderna, 1979. v.2, p.427-429.
- SANTOS, J.I.C. *Conceitos de física*. São Paulo : Ática, 1988. v.2, p.134-135.

Referencial Teórico

- ASTOLFI, J.P., DEVELAY, M. *A didática das ciências*. Papirus : São Paulo, 1990.
- BACKUS, J. *The acoustical foundations of music*. New York : W.W. Norton, 1977.
- BARMAN, C.R., BARMAN, N.S., MILLER, J.A. Two Teaching Methods and Students Understanding of Sound. *School Science and Mathematics*, v.96, n.2, 1996.
- BENADE, A. *Fundamentals of musical acoustics*. New York : Dover, 1990.
- BUTTS, D.P., HOFMAN, H.M., ANDERSON, M. Is direct experience enough? : a study of young children's views of sound. *Journal of Elementary Science Education*, v.6, n.1, 1994.
- BERG, R.E., STORK, D.G. The physics of sound. New Jersey : Prentice-Hall, 1995.
- COX, R.A. Is it naive to expect school science books to be accurate? *School Science Review*, v.78, n.282, 1996.
- DRIVER, R. *The pupil as scientist?* England : Open University, 1986.
- DRIVER, R., SQUIRES, A., RUSHWORTH & WOOD-ROBINSON, V. *Making sense of secondary science*. London : Routledge, 1994.
- HSU, H.P. *Análise de Fourier*. Rio de Janeiro : LTC, 1972.
- JOHNSTON, I. *Measured tones*. Philadelphia : Institute of Physics, 1989.
- LINDER, C.J., GAALLEN, L.E. A study of tertiary physics students conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, v.11, 1989.
- LINDER, C.J. University physics students conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*, v.15, n.6, p.655-662, 1993.
- PIERCE, J.R. *The science of musical sound*. New York : W. H. Freeman, 1983.
- REDISH, E.F. The implications of cognitive studies for teaching physics. *The American Journal of Physics*, v.62, n.6, p.796-803, 1994.
- RIGDEN, J.S. *Physics and the sound of music*. New York : John Wiley & Sons, 1985.
- ROSSING, T.D. *The science of sound*. Addison-Wesley, 1989.
- STEINBERG, R.N., SAUL, J.M., WITTMANN, M.C., REDISH, E.F. Students difficulties understanding the told of mathematics in introductory physics. *Bulletin of the American Physical Society*, v.41, n.2, p.869, 1996.
- SYMON, K.R. *Mecânica*. Rio de Janeiro : Campus, , 1996.
- WITTMANN, M.C. Student difficulties in understanding mechanical waves : an overview of research results. Available from *Word Wide Web*: <URL: <http://www-physics.umd.edu/rgroups/ripe/mcw/waveresearch.htm>> [30/01/97].

