

Produtos e Materiais Didáticos

Simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos para o ensino da física

(A simulator of mechanical wave propagation in a solid for the teaching of physics)

Sérgio Luiz Piubelli¹, Hudson Azevedo Errobidart¹, Shirley Takeco Gobara¹
e Nádia Cristina Guimarães Errobidart²

¹Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil

²Departamento de Educação, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil

Recebido em 18/12/2008; Revisado em 8/6/2009; Aceito em 1/7/2009; Publicado em 26/3/2010

O artigo apresenta a descrição de um aparato experimental construído, com materiais de baixo custo, para simular e evidenciar a influência das características inerciais e elásticas do meio na velocidade de propagação de uma onda mecânica longitudinal. O dispositivo foi construído com o objetivo de minimizar as dificuldades relacionadas ao processo de ensino e aprendizagem de conceitos da física, em especial do conteúdo de ondas. Trata-se de um experimento demonstrativo que pode ser feito em sala de aula ou em laboratórios didáticos.

Palavras-chave: onda mecânica, velocidade de propagação da onda, características inerciais, características elásticas, experimento demonstrativo.

The article describes a low-cost experimental apparatus built to simulate and highlight the influence of inertia and elastic properties of matter on the speed of propagation of a mechanical wave. The aim for building this device was to minimize the difficulties associated with the teaching and learning process of physical concepts, particularly in the context of waves. It is about a demonstrative experiment that can be done in classrooms or in a teaching lab.

Keywords: mechanical wave, wave propagation velocity, inertial and elastic properties of matter, demonstrative experiment.

1. Introdução

Evidenciamos, numa pesquisa bibliográfica realizada anteriormente e sistematizada na forma de artigo [1], que são raras as proposições de utilização de experimentos principalmente para o estudo de ondas sonoras, sejam elas de caráter demonstrativo, investigativo ou de verificação. Motivados pelos resultados obtidos nessa investigação e pelo interesse que esse assunto pode despertar nos estudantes, nos propomos a investigar e desenvolver experimentos demonstrativos para estudar ondas mecânicas.

Provavelmente muitos alunos já observaram ou ouviram falar de fenômenos relacionados com ondas mecânicas como, por exemplo, a propagação de ondas marítimas, um terremoto, etc. Há também evidências curiosas sobre o comportamento de certos insetos como o escorpião, que localizam suas presas por meio de perturbações mecânicas transversais e longitudinais detectadas por sensores localizados em suas patas [2]. Apesar de dispormos de inúmeros exemplos para contextu-

alizarmos o ensino de ondas, é notável para professores da área que lecionam esse conteúdo a dificuldade que os alunos encontram para relacionar tais fenômenos com os conceitos de ondas mecânicas trabalhados em sala de aula.

Outro aspecto importante, mas também de difícil compreensão, está relacionado com a dependência da propagação de uma onda sonora com as características do meio. Essa dificuldade levou-nos a iniciar por um estudo sobre a propagação de ondas mecânicas em meios sólidos, que culminou na construção de um simulador de ondas. Este aparato poderá ser utilizado principalmente para demonstrar alguns conceitos físicos relacionados com a propagação de ondas longitudinais. Serve também para mostrar fenomenologicamente a dependência da velocidade de propagação com as propriedades inerciais e elásticas de um meio sólido. Acreditamos que as demonstrações, que podem ser realizadas com o dispositivo que desenvolvemos, facilitarão a aprendizagem e a compreensão das propriedades das ondas mecânicas e da dependência da velocidade de

¹E-mail: herobidart13@yahoo.com.br.

propagação destas com o meio.

2. Embasamento teórico

Conceitos como a propagação de ondas na superfície da água e a transmissão de um pulso em uma corda esticada podem ser facilmente identificados por um professor durante uma aula, visto a familiaridade dos alunos com esses exemplos. Isso também é explorado na maioria dos livros didáticos sugeridos pelo PNLD/2006² para o ensino médio. Neles evidenciamos o emprego de cordas e da superfície da água para exemplificar a propagação de pulsos unidimensionais e bidimensionais respectivamente. Máximo e Alvarenga [3], por exemplo, afirmam que se “uma pessoa, ao segurar uma corda, deslocasse sua mão continuamente para cima e para baixo da posição inicial” produziria “uma série de pulsos, voltados alternadamente para cima e para baixo, propagando-se ao longo da corda” e que isso “constitui uma onda”. Gaspar [4] ao abordar a propagação de uma onda faz uso de ilustrações que exemplificam as deformações na superfície da água provocadas por um barco em movimento e a propagação de um pulso em uma corda. Apesar desta familiaridade com fenômenos ondulatórios, verificou-se, numa investigação que buscou identificar o conceito de ondas na visão de alunos do ensino médio [5], que muitos deles encontram dificuldades em elaborar uma resposta para questões como, por exemplo: *O que é uma onda?*

Orientando-nos nas definições apresentadas por Halliday, Resnick e Walker [2] e Nussenzweig [6] consideraremos uma onda como um sinal transmitido, entre dois pontos, com uma dada velocidade, transportando energia e momento sem que haja movimento direto de matéria. Essa velocidade é denominada por Kittel [7] como sendo a “velocidade de grupo”, ou de “um pacote de onda” e representa a “transmissão da energia no meio” onde ocorre a propagação. Na interpretação de Halliday e cols. [2] ela é

[...] a velocidade com que sinais ou informações podem ser transmitidos pelo pulso. Se não existe dispersão, a velocidade é a mesma que a velocidade normal das ondas senoidais e se existir dispersão, a velocidade de grupo e as velocidades das ondas senoidais diferem e o sinal pode ser perdido.

Quando esse sinal necessita de um meio material para se propagar, como, por exemplo, a água, o ar ou um sólido qualquer, tem-se uma onda mecânica. Por outro lado, se não existe a necessidade deste meio para a propagação do sinal, como, por exemplo, no caso da luz, ela é chamada de onda eletromagnética.

Considerando que o foco da investigação por nós empreendida está relacionado ao estudo de ondas, em particular para ondas sonoras, apresentaremos apenas um embasamento teórico direcionado às ondas mecânicas.

São exemplos de ondas mecânicas, as sonoras, as ondas sísmicas ou ondas se propagando em uma corda. Em todos esses casos o transporte da perturbação no meio acontece sem haver arrastamento do meio junto com a perturbação. Outra característica principal é que a dinâmica dessas propagações é governada pelas leis de Newton.

Quando ondas mecânicas se propagam as partículas do meio são perturbadas, mas não se movem juntamente com as ondas. “Todas essas ondas correspondem a determinados tipos de movimento de átomos ou moléculas do meio através do qual a onda propaga-se, mas, em média, os átomos permanecem em suas posições de equilíbrio” [8].

Quando um meio material é perturbado e a direção do movimento provocado nas partículas desse meio for igual à direção de propagação da perturbação, esta onda é classificada, quanto a sua direção de propagação, como longitudinal, como é o caso de uma onda de compressão ao longo de uma mola ou das ondas sonoras. E quando a direção do movimento das partículas do meio for perpendicular à direção de propagação da perturbação, diz-se que a onda é transversal, como é o caso de um pulso se propagando ao longo de uma corda esticada.

Halliday e cols. [2] afirmam que uma onda pode apresentar diferentes formas, mas consideram que o entendimento de ondas que apresentam forma senoidal é fundamental para compreensão de ondas de qualquer outra forma. Partindo desta consideração definem a velocidade escalar (v) de propagação de uma onda em função do *comprimento de onda*³ (λ) e da *frequência*⁴ (f) pela equação $v = \lambda f$ que “nos diz que a onda se desloca de um comprimento de onda num período de oscilação”.

Ainda segundo esses autores,

[...] uma onda se propaga através de um meio como água, aço ou uma corda esticada, ela coloca as partículas desse meio em oscilação, a medida que passa. Para isso acontecer, o meio deve possuir inércia (para que a energia cinética possa ser armazenada) e elasticidade (para que a energia potencial possa ser armazenada). Essas duas propriedades determinam o quão rapidamente a onda pode se propagar no meio. Raciocinando inversamente, deve ser possível calcular a velocidade escalar da onda, através do meio em termos dessas propriedades [2].

²Plano Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio de 2006 que continua válido para 2008. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/port366-pn1em.pdf>. Portaria n. 366, de 31 de janeiro de 2006.

³A distância ao longo do eixo x após a qual a forma da onda começa a se repetir.

⁴Número de oscilações por unidade de tempo, realizadas por um dado ponto, à medida que a onda passa por ele.

Quando a velocidade de propagação de uma onda em um determinado meio é independente da sua frequência, esse meio material é considerado não dispersivo. Nesse caso todos os pulsos se deslocam com a mesma velocidade (de fase e de grupo); caso contrário, em que a velocidade depende da frequência, o meio é classificado como dispersivo. Neste caso cada onda se deslocaria com uma velocidade diferente [2].

Ainda de acordo com Halliday e cols. [2], o meio e as componentes de onda são ditos não-dispersivos

[...] se todas as componentes de Fourier da onda se propagam através do meio na mesma velocidade, então sua soma sempre fornecerá um pulso com o mesmo formato. [...] o que significa que o pulso mantém seu formato enquanto se movimenta [2].

Os meios serão dispersivos se

[...] a velocidade de uma onda senoidal num meio depender de sua frequência (ou de forma equivalente, de seu comprimento de onda), as componentes de onda que possuem frequências diferentes se movem com velocidades diferentes e sua soma não é mais um pulso de formato constante. Ao invés disso, o pulso se espalha (fica mais longo). [...] o que significa que o pulso altera seu formato enquanto se move [2].

Ao desenvolver a teoria sobre ondas sonoras, demonstra-se para meios não dispersivos que a velocidade v de propagação do pulso é dada pela Eq. [9]

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (1)$$

onde B é o módulo de Young,⁵ grandeza que está associada à elasticidade do meio e ρ é a densidade do meio – grandeza que está associada às características inerciais deste meio.

Essa dependência da velocidade da onda com o meio pode ser evidenciada pelos valores do módulo de elasticidade volumar - B e a densidade do meio - ρ , apresentados na Tabela 1.

3. Descrição do aparato simulador

Nosso objetivo foi construir um aparato com materiais de baixo custo que possa ser utilizado para simular um meio de propagação de uma onda e evidenciar a influência das características inerciais e elásticas deste na velocidade de propagação de uma onda mecânica longitudinal. Na construção foram utilizados os seguintes materiais:

- Garrafas Pet de 500 mL;
- Chumbadas⁶ de pesca, esféricas e de massas diferentes;
- Parafusos;
- Dois suportes de metal com base (100 cm);
- Fios de nylon ou linha de pesca;
- Haste de madeira (50 cm);
- Suportes de madeira (10 x 4 x 2 cm);
- Seringas (5 mL).

O aparato construído foi denominado de *simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos*. Possui 90 cm de comprimento, 50 cm de largura e 60 cm de altura. Sua montagem pode ser visualizada na Fig. 1.

Com a intenção de simular as características elásticas do meio onde ocorre a propagação da onda utilizamos aros plásticos, obtidos por meio de cortes transversais de garrafas Pet de larguras (tamanho) diferentes. As características inerciais do meio foram simuladas com a utilização de chumbadas esféricas de diferentes massas. Esses detalhes podem ser visualizados, com mais nitidez, nas Figs. 2 e 3.

Tabela 1 - Algumas propriedades elásticas de materiais (adaptada da Ref. [2, p. 13].

Material	Densidade ρ (kg/m ³)	Módulo de Young E (10 ⁹ N/m ²)	Velocidade de propagação no meio (m/s)
Aço	7860	200	5044
Alumínio	2710	70	5082
Vidro	2190	65	5448
Concreto	2310	30	31622
Madeira	525	13	4976
Osso	1900	9	2176
Poliestireno	1050	3	1690

⁵Definição de modulo de Young no Anexo 1 [9].

⁶Apesar das chumbadas serem constituídas de um produto tóxico, salientamos que as mesmas não oferecem riscos, pois o chumbo libera toxinas se fundido.

O simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos é constituído por três fileiras composta de aros e chumbadas esféricas, cuidadosamente acopladas. As fileiras 1 e 2 possuem o mesmo tipo de aro ($a_1 = a_2$), ou seja, as mesmas características elásticas, mas chumbadas esféricas de massas diferentes ($m_1 > m_2$). A fileira 3, montada em paralelo às duas anteriores, possui aro (a_3) com largura diferente dos aros das fileiras 1 e 2 ($a_1 = a_2 < a_3$) e as chumbadas esféricas com massas iguais às utilizadas na fileira 2 ($m_2 = m_3$).

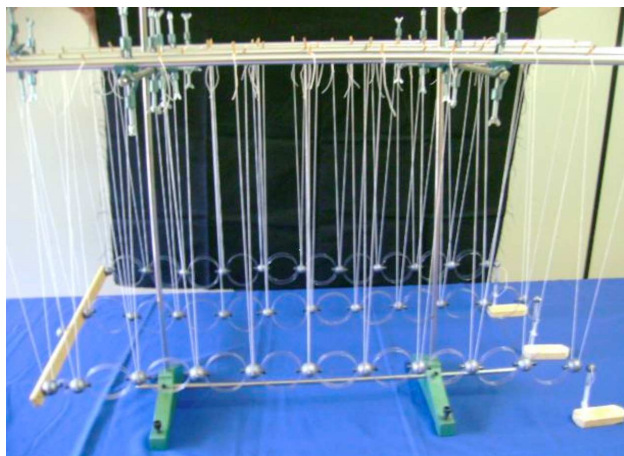


Figura 1 - Simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos.

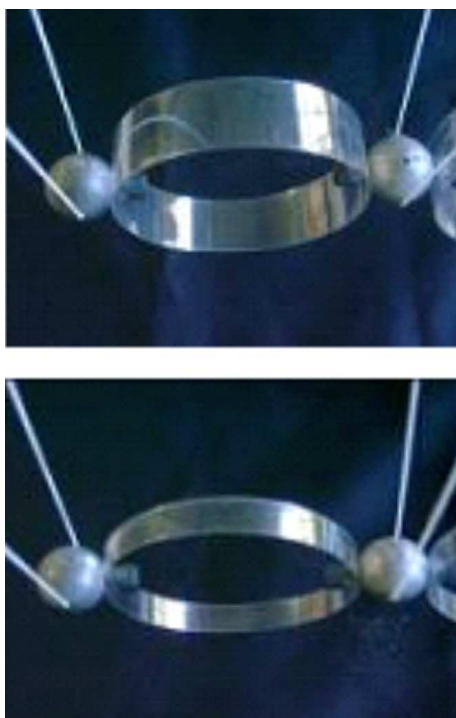


Figura 2 - Aros diferentes representando as propriedades elásticas do meio.



Figura 3 - Chumbadas diferentes representando as propriedades inerciais do meio.

As chumbadas foram fixadas por parafusos diametralmente opostas nos aros, constituindo uma seqüência de aros e chumbadas idênticas devidamente acopladas. Cada chumbada é suspensa por um fio de nylon, preso em canaletas, simulando uma seqüência de pêndulos.

Para que uma perturbação fosse produzida simultaneamente foi parafusada uma haste de madeira em das extremidades das três fileiras. Tomou-se o cuidado em manter o alinhamento das chumbadas esféricas para que a haste tivesse direção perpendicular às direções das fileiras.

4. Proposta para utilização do simulador

Apresentamos a seguir uma proposta de utilização do simulador, como atividade experimental demonstrativa, para evidenciar que a velocidade de propagação de ondas longitudinais depende das características inerciais e elásticas do meio.

Produz-se uma perturbação simultânea em uma das extremidades das fileiras que possuem características inerciais e elásticas diferentes, e observa-se a rapidez que as regiões de compressões se propagam em cada fileira.

Para produzir esta perturbação simultânea, utiliza-se um pêndulo que é deslocado de sua posição de equilíbrio, e ao soltá-lo colide com o centro de percussão da haste de madeira fixada transversalmente nas extremidades das fileiras, como pode ser observado na Fig. 4.

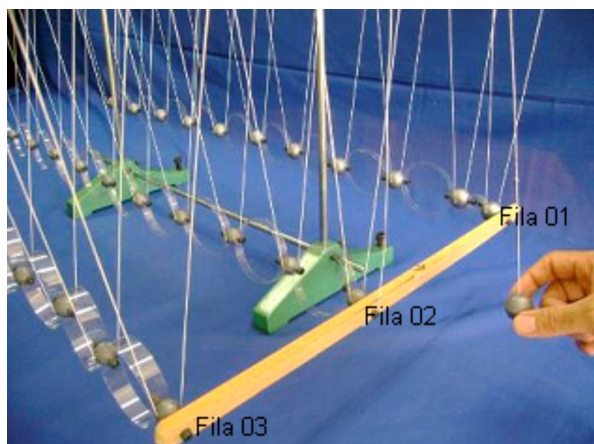


Figura 4 - Produção simultânea de uma perturbação.

Na Fig. 5, pode-se evidenciar que na extremidade contrária das fileiras, colocamos uma chumbada esférica em equilíbrio, quase instável, sobre um pino, construído com uma seringa e fixado em um suporte de madeira. Produzindo-se uma pequena perturbação, as chumbadas, que estavam sobre os pinos, eram derribadas e o som emitido, devido ao impacto de cada uma com a mesa, indicava a diferença na velocidade de propagação da região de compressão.



Figura 5 - Chumbadas esféricas colocadas sobre os pinos, construídos com seringas.

Tabela 2 - Comparação entre as grandezas elasticidade, inércia e velocidade.

Comparações	Elasticidade (β)	Inércia (ρ)	Velocidade (V)
Fileiras 1 e 2 ($a_1 = a_2, m_1 > m_2$)	$\beta_1 = \beta_2$	$\rho_1 > \rho_2$	$V_1 < V_2$
Fileiras 2 e 3 ($a_2 < a_3, m_2 = m_3$)	$\beta_2 < \beta_3$	$\rho_2 = \rho_3$	$V_2 < V_3$

5. Considerações finais

O simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos é um aparato experimental, construído com materiais de baixo custo, para ser empregado em atividades experimentais demonstrativas a serem desenvolvidas em sala de aula ou num laboratório. Pode ser utilizado para demonstrar alguns dos conceitos

O esquema, apresentado na Fig. 6, mostra as diferenças entre as velocidades de propagação das regiões de compressão produzidas pela perturbação nas três fileiras. Essas diferenças são resultantes das diferentes características inerciais e elásticas das fileiras. As diferenças observadas na rapidez de propagação das regiões de compressão em cada fileira confirmam a dependência da velocidade de propagação da onda com as características elásticas e inerciais diferentes do meio.

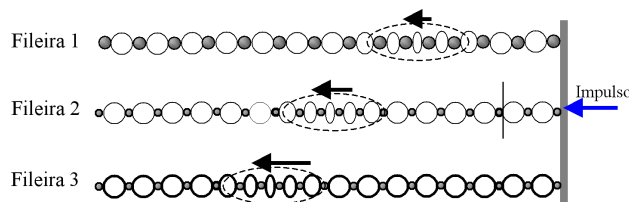


Figura 6 - Esquema representando as diferenças na velocidade de propagação.

As fileiras 1 e 2, que possuem os mesmos tipos de anéis, mas chumbadas diferentes, simulam meios com características elásticas iguais, mas com características inerciais diferentes. A região de compressão visualizada na fileira 1, propaga com menor velocidade que na fileira 2, pois esta última possui característica inercial menos expressiva (chumbada de menor massa).

As fileiras 2 e 3, que apresentam chumbadas esféricas de massas iguais, mas aros de larguras diferentes, simulam meios com características inerciais iguais mas com características elásticas diferentes. A região de compressão visualizada na fileira 3 se propaga com maior velocidade que a da fileira 2, pois possui características elásticas mais expressivas. Assim, podemos observar que os resultados do experimento, mostram-se coerentes com a previsão estabelecida pela Eq. (1), apresentada anteriormente.

Na Tabela 2 sintetizamos os resultados das diferentes velocidades de propagação da região de compressão em função das diferentes características inerciais (ρ) e elásticas (β) do meio.

físicos relacionados com a propagação de ondas longitudinais além de auxiliar na compreensão fenomenológica da dependência entre a velocidade de propagação e as propriedades inerciais e elásticas de um meio sólido.

As propostas de atividades experimentais de demonstração, utilizando o simulador de propagação de ondas mecânicas em meios sólidos, podem estimular a

participação e o envolvimento dos alunos e contribuir para ensino e aprendizagem de ondas.

No simulador, alunos podem observar fenomenologicamente os efeitos do meio sobre a propagação do pulso e podem tirar suas conclusões sobre a dependência da velocidade de propagação com as propriedades do meio.

Anexo 1 Dedução do módulo de Young [9]

A Fig. 7 mostra a propagação de um pulso com velocidade v , da esquerda para a direita em um meio fluido ao longo do tubo.

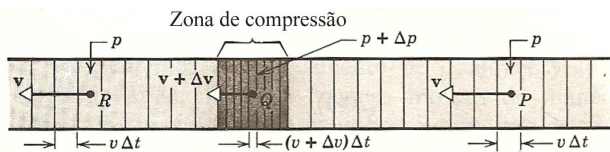


Figura 7 - Representação da propagação de um elemento de fluido para a zona de compressão ao longo de um tubo (Ref. [9, p. 141]).

Admitindo que este pulso tenha fronteiras, anterior e posterior, bem definidas e que em seu interior a massa específica ρ_o do fluido e a pressão p , sejam uniformes. Considera-se conveniente a escolha de um referencial no qual o pulso permaneça estacionário e o fluido se mova com velocidade da direita para a esquerda através dele.

Seja um elemento de fluido situado entre as linhas verticais em P na figura, deslocando-se para frente com uma velocidade até atingir a zona de compressão. Enquanto penetra nesta zona, ele encontra uma diferença de pressão entre as suas faces anteriores e posteriores. O elemento é comprimido e desacelerado, movendo com uma velocidade menor no interior da zona, sendo uma quantidade negativa. O elemento acaba de emergir da face esquerda da zona de compressão, expandindo-se para o seu volume original e a diferença de pressão Δp acelera-o até que ele adquira a velocidade original. A figura mostra o elemento no ponto R , após passar pela zona de compressão e ao mover-se novamente com velocidade v , como ocorria em P [9].

Fazendo a aplicação das Leis de Newton ao elemento do fluido, no momento em que está penetrando na zona de compressão, temos

$$F = (p + \Delta p)A - pA. \quad (2)$$

Sendo A a área da seção reta do tubo. Fazendo uso da segunda lei de Newton ($\mathbf{F} = m \mathbf{a}$), teremos

$$\Delta p A = (\rho_o v)A \times \Delta t \left(-\frac{\Delta v}{\Delta t} \right). \quad (3)$$

Essa equação pode ser escrita como

$$\rho_o v^2 = -\frac{\Delta p}{\Delta v/v}. \quad (4)$$

Como o fluido que ocupa volume $A v \Delta t$ em P é comprimido de $A(\Delta v)\Delta t = \Delta V$ ao penetrar na zona de compressão, teremos, portanto

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{A \Delta v \Delta t}{A v \Delta t} = \frac{-\Delta v}{v}, \quad (5)$$

e obtemos

$$\rho_o v^2 = \frac{-\Delta p / \Delta V}{V}. \quad (6)$$

A razão entre a variação da pressão em um corpo, Δp e a variação relativa que ela acarreta no volume, $-\Delta V/V$, é denominada *módulo volumétrico*, B , do corpo. Então, $B = -\Delta P V / \Delta$, que é positivo, pois um elemento na pressão acarreta uma diminuição no volume. A velocidade do pulso longitudinal no meio representado é dada por $v = \sqrt{B/\rho_o}$, observe que a velocidade da onda é determinada pelas propriedades do meio no qual ela se propaga, note ainda a presença de uma propriedade elástica, e uma propriedade de inércia, ρ_o [9].

Referências

- [1] Hudson Azevedo Errobidart, Shirley Takeco Gobara, Nádia Cristina Guimarães Errobidart, in *Anais do XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Vitória, 2009 (Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 2009), v. 1, p. 1-10.
- [2] D. Halliday, R. Resnick, e J. Walker, *Fundamentos de Física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora SA, Rio de Janeiro, 1996).
- [3] Antônio Ribeiro da Luz Máximo e Beatriz Álvares Alvarenga, *Física: Ensino Médio* (Scipione, São Paulo, 2008).
- [4] Alberto Gaspar, *Física* (Ática, São Paulo, 2008).
- [5] S.T. Gobara, N.C.G. Errobidart, S.M. Marques, M.I.A. Jardim, H.A. Errobidart e L.F. Placa, in *Anais do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*, organizado por E.F. Mortimer (UFMG, Belo Horizonte, 2007) v. 1, p. 1-12.
- [6] Herch Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica: Fluidos - Oscilações e Ondas - Calor* (Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2002), 4ª ed revisada.
- [7] Charles Kittel, *Introdução a Física do Estado Sólido* (Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1978).
- [8] Marcelo Alonso e Edward J. Finn, *Física Um Curso Universitário Volume II - Campos e Ondas* (Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1972).
- [9] R. Resnick, D. Halliday, *Física 2* (LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1984).